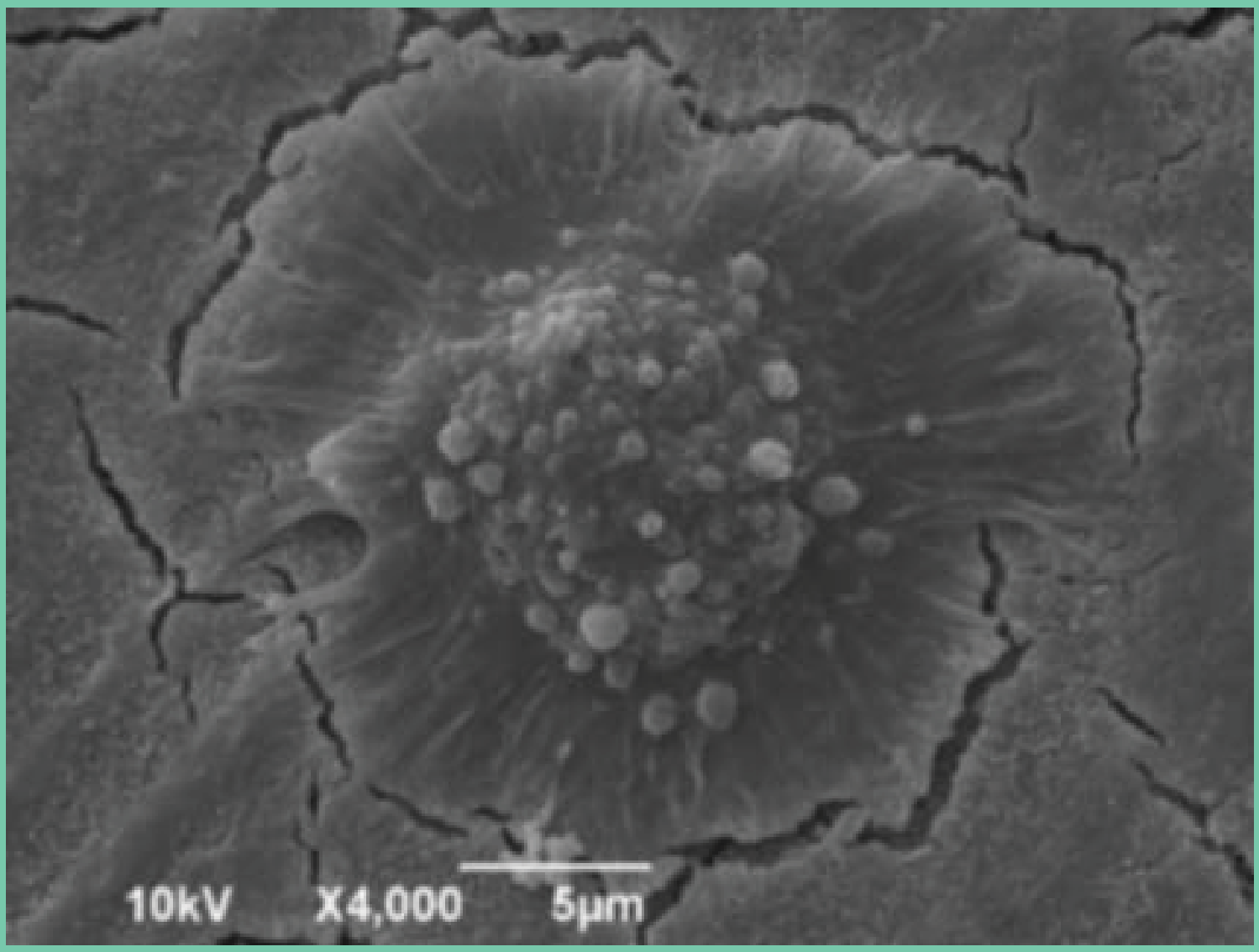
DYNA

Journal of the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Medellin Campus



DYNA 84 (203), December, 2017 - ISSN 0012-7353
Tarifa Postal Reducida No. 2014-287 4-72
La Red Postal de Colombia, Vence 31 de Dic. 2017.

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DYNA

http://dyna.medellin.unal.edu.co/

DYNA is an international journal published by the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín Campus since 1933. DYNA publishes peer-reviewed scientific articles covering all aspects of engineering. Our objective is the dissemination of original, useful and relevant research presenting new knowledge about theoretical or practical aspects of methodologies and methods used in engineering or leading to improvements in professional practices. All conclusions presented in the articles must be based on the current state-of-the-art and supported by a rigorous analysis and a balanced appraisal. The journal publishes scientific and technological research articles, review articles and case studies.

DYNA publishes articles in the following areas:

Organizational Engineering
Civil Engineering
Materials and Mines Engineering
Geosciences and the Environment
Systems and Informatics
Chemistry and Petroleum
Mechatronics
Bio-engineering
Other areas related to engineering

Publication Information

DYNA (ISSN 0012-73533, printed; 2346-2183, online) is published by the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, with a bimonthly periodicity (February, April, June, August, October, and December). Circulation License Resolution 000584 de 1976 from the Ministry of the Government.

Contact information

Web page: http://dyna.unalmed.edu.co
E-mail: dyna@unal.edu.co
Mail address: Revista DYNA
Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia - Medellín Campus
Carrera 80 No. 65-223 Bloque M9 - Of.:107
Telephone: (574) 4255068 Fax: (574) 4255343
Medellín - Colombia

© Copyright 2016. Universidad Nacional de Colombia
The complete or partial reproduction of texts with educational ends is permitted, granted that the source is duly cited. Unless indicated otherwise.

Notice
All statements, methods, instructions and ideas are only responsibility of the authors and not necessarily represent the view of the Universidad Nacional de Colombia. The publisher does not accept responsibility for any injury and/or damage for the use of the content of this journal.
The concepts and opinions expressed in the articles are the exclusive responsibility of the authors.

Institutional Exchange Request
DYNA may be requested as an institutional exchange through the e-mail canjebib_med@unal.edu.co or to the postal address:

Biblioteca Central “Efe Gómez”
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Calle 59A No 63-20
Teléfono: (57+4) 430 97 86
Medellín - Colombia

Indexing and Databases

DYNA is admitted in:

The National System of Indexation and Homologation of Specialized Journals CT+I-PUBLINDEX, Category A1

Science Citation Index Expanded
Web of Science - WoS, Thomson Reuters
Journal Citation Reports - JCR
SCImago Journal & Country Rank - SJR
Science Direct
SCOPUS
Chemical Abstract - CAS
Scientific Electronic Library on Line - SciELO
GEOREF
PERIÓDICA Data Base
Latindex
Actualidad Iberoaméricana
RedALyC - Scientific Information System
Directory of Open Acces Journals - DOAJ
PASCAL
CAPES
UN Digital Library - SINAB
CAPES
EBSCO Host Research Databases

Publisher’s Office
Juan David Velásquez Henao, Director
Mónica del Pilar Rada T., Editorial Coordinator
Catalina Cardona A., Editorial Assistant
Amilkar Álvarez C., Diagrammer
Byron Llano V., Editorial Assistant
Landsoft S.A., IT

Reduced Postal Fee
Tarifa Postal Reducida # 2014-287 4-72. *La Red Postal de Colombia,* expires Dec. 31st, 2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DYNA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

COUNCIL OF THE FACULTAD DE MINAS

Dean
Pedro Nel Benjumea Hernández PhD

Vice-Dean
Ernesto Pérez González, PhD

Vice-Dean of Research and Extension
Santiago Arango Aramburo, PhD

Director of University Services
Santiago Medina Hurtado, PhD

Academic Secretary
Francisco Javier Díaz Serna, PhD

Representative of the Curricular Area Directors
Wilfredo Montealegre Rubio, PhD

Representative of the Curricular Area Directors
Evelio Andrés Gómez Giraldo, PhD

Representative of the Basic Units of Academic-Administrative Management
Juan David Velásquez Henao, PhD

Representative of the Basic Units of Academic-Administrative Management
Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD

Professor Representative
Luis Hernán Sánchez Arredondo, MSc

Delegate of the University Council
León Restrepo Mejía, PhD

Student representative (alternate) undergraduate at the Faculty Council
Alejandra Jiménez Upegui

FACULTY EDITORIAL BOARD

Dean
Pedro Nel Benjumea Hernández, PhD

Vice-Dean of Research and Extension
Santiago Arango Aramburo, PhD

Members
Oscar Jaime Restrepo Baena, PhD
Juan David Velásquez Henao, PhD
Jaime Aguirre Cardona, PhD
Alfonso Espinosa Parada, PhD
Mónica del Pilar Rada Tobón, MSc

JOURNAL EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
Juan David Velásquez Henao, PhD
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Editors
George Barbastathis, PhD
Massachusetts Institute of Technology, USA

Tim A. Osswald, PhD
University of Wisconsin, USA

Juan De Pablo, PhD
University of Wisconsin, USA

Hans Christian Öttinger, PhD
Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland

Patrick D. Anderson, PhD
Eindhoven University of Technology, the Netherlands

Igor Emri, PhD
Associate Professor, University of Ljubljana, Slovenia

Dietmar Drummer, PhD
Institute of Polymer Technology University Erlangen-Nürnberg, Germany

Ting-Chung Poon, PhD
Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

Pierre Boulanger, PhD
University of Alberta, Canadá

Jordi Payá Bernabeu, Ph.D.
Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH)
Universitat Politècnica de València, España

Javier Belzunce Varela, Ph.D.
Universidad de Oviedo, España

Luis Gonzaga Santos Sobral, PhD
Centro de Tecnología Mineral - CETEM, Brasil

Agustín Bueno, PhD
Universidad de Alicante, España

Henrique Lorenzo Cimadevila, PhD
Universidad de Vigo, España

Mauricio Trujillo, PhD
Universidad Nacional Autónoma de México, México

Carlos Palacio, PhD
Universidad de Antioquia, Colombia

Jorge Garcia-Sucerquia, PhD
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Juan Pablo Hernández, PhD
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

John Willian Branch Bedoya, PhD
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Enrique Posada, Msc
INDISA S.A, Colombia

Oscar Jaime Restrepo Baena, PhD
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Moisés Oswaldo Bustamante Rúa, PhD
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Hernán Darío Álvarez, PhD
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jaime Aguirre Cardona, PhD
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

DYNA 84 (203), December, 2017. Medellin. ISSN 0012-7353 Printed, ISSN 2346-2183 Online

CONTENTS

Intermittent demand forecasting with time series methods and artificial neural networks: A case study 9
René Santa Cruz R. & Camila Corrêa

Comparing energy consumption for rail transit routes through Symmetric Vertical Sinusoid Alignments (SVSA), and applying artificial neural networks. A case study of Metro Valencia (Spain) 17
Juan Diego Pineda-Jaramillo, Pablo Salvador-Zuriaga & Ricardo Insa-Franco

Carbon nanotube dispersion for in-vitro applications 24
Claudia Espinosa, Isabel Cristina Ortiz-Trujillo, Jesús Antonio Carlos-Cornelio, Raúl Darío Zapata-Hernández & Lina Marcela Hoyos-Palacio

Surface hardness prediction based on cutting parameters in turning of annealed AISI 1020 steel 31
Omar José Zurita-Hurtado, Verónica Carmen Di Graci-Tiralongo & María Cristina Capace-Aguirre

Climate change effects on the climate dynamics of coastal Ecuador 37
Iker García-Garizábal, Paola Romero, Samantha Jimenez & Luis Jordá

Dam failure Vega de Tera, hydraulic simulation of the flood propagation (Zamora, Spain) 45
José Luis Prieto Calderón; Roberto Marínez-Alegría López; Javier Taboa Castro; Isabel Montequi Martín; Germán Sanz Lobón

Development of the magnesium alloy industry in Colombia - An opportunity 55
Luisa Fernanda Berrio-Betancur, Mónica Echeverry-Rendón, Esteban Correa-Bedoya, Alejandro Alberto Zuleta-Gil, Sara María Robledo-Restrepo, Juan Guillermo Castaño-Gonzalez & Félix Echeverría-Echeverría

Requirements for hybrid laboratories in Manufacturing Engineering 65
José Divitt Velosa-García, Fernando José Castillo-García, Eva Espíldora & Luis Cobo

Performance evaluation of M-ary algorithm using reprogrammable hardware 75
Sergio Andrés Arenas-Hoyos & Álvaro Bernal-Noreña

Variation of technological properties of field natural rubber lattices from Hevea brasiliensis clones and natural rubber-based compounds 80
Diego Hernán Giraldo-Vásquez & Sandra Milena Velásquez-Restrepo

High power printed circuit board design for automotive fuse block usage 88
Iván Juan Carlos Pérez-Olguín

Model for decision-making, change of LPG stove to induction stove, case in Ecuador 95
Freddy Benjamín Naula-Sigua, Jorge Arturo Campoverde-Campoverde & Denis Borenstein

Incidence of the mechanized sowing speed in irrigated rice 101
Mauricio González-Betancourt, Ana Milena Alonso-Fernández & Zaira Liceth Mayorga-Ruíz

Cooperative primary user detection in multiband environments based on uniform sub-Nyquist sampling in sparse domain 110
Evelio Astaiza-Hoyos, Héctor Fabio Bermúdez-Orozco & Wilmar Yesid Campo-Muñoz

Assesment of evaporative cooling efficiency in greenhouses equiped with wetted porous plates 118
Flávio Alves-Damasceno, Luciano Barreto-Mendes, Tadayuki Yanagi Junior, Jofran Luiz-de Oliveira & Jairo Alexander Osorio-Saraz

Identification of resilience factors, variables and indicators for sustainable management of urban drainage systems 126
Sergio Andrés Blanco-Londoño, Patricia Torres-Lozada & Alberto Galvis-Castaño

Manufacturing and evaluation of Chitosan, PVA and Aloe Vera hydrogels for skin applications 134
Diana Marcela Escobar-Sierra & Yuli Paola Perea-Mesa

A new mathematical model for coal flotation kinetics 143
Juan Sebastián Guerrero-Pérez & Juan Manuel Barraza-Burgos

Burr formation and control for polymers micro-milling: A case study with vortex tube cooling 150
Michael Miranda-Giraldo, David Serje-Martínez, Jovanny Pacheco-Bolívar & Jorge Bris-Cabrera

Ubiquitous learning model based on platforms of multi-screen TV (uLMTV) 160
Gustavo Alberto Moreno-López, Edgar de Jesús Ramírez-Monsalve & Jovani Alberto Jiménez-Builes

Improvement of the adhesion on Hydroxyapatite coatings produced by oxyfuel thermal spray from results of numerical simulation 170
Hamilton Copete, Fabio Vargas, Esperanza López, Jhonatan Gómez-Pérez & Tatiana Ríos

Model the green procurement based coloured Petri nets 177
Luz Maribel Guevara-Ortega & Leonardo Rodríguez-Urrego

Indicators of energetic performance: A path to sustainability. "A case study of a high-roasting industry of coffee" 184
Jenny Lorena Ibarguen-Valverde, Jorge Eduardo Angulo-Lopez, Judith Rodríguez-Salcedo & Omar Prías-Caicedo

Survey on IoT solutions applied to Healthcare 192
Diego Castro, William Coral, José Cabra, Julián Colorado, Diego Méndez & Luis Trujillo

Fuzzy index for swine thermal comfort at nursery stage based on behavior 201
Letícia Cibele da Silva Ramos Freitas, Alessandro Torres-Campos, Leonardo Schiassi, Tadayuki Yanagi Junior & Daiane Cecchin

Changes in liquid phase and mechanical properties during osmodehydrofreezing of papaya (*carica papaya l.*) 208
Alfredo Adolfo Ayala-Aponte & Martha Isabel Sánchez-Tamayo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Gaussian processes in ball bearing prognostics 214
Juan Fernando López-López & Jhouben Janyk Cuesta-Ramirez & Hector Fabio Quintero-Riaza

Productive development model of the fisheries chain Spanish 220
Carmenza Luna, Wilson Nieto, Hugo Mercado & Javier Pajares

Vapor-Liquid equilibria modeling using gray-box neural networks as binary interaction parameters predictor 226
Eduardo Vyhmeister, Jonathan Rodríguez-Pino, Lorenzo Reyes-Bozo, Rosa Galleguillos-Pozo, Héctor Valdés-González & Roman Rodríguez-Maecker

Fast estimation of chlorophyll content on plant leaves using the light sensor of a smartphone 233
Daniel Gaviria-Palacio, Juan José Guáqueta-Restrepo, Daniel Mauricio Pineda-Tobón & Juan C. Pérez

Wavelet denoising of partial discharge signals and their pattern classification using artificial neural networks and support vector machines 240
Ian Carlo Guzmán, José Luis Oslinger & Rubén Darío Nieto

Disintegration and recycling possibility of selected abrasives for water jet cutting 249
Andrzej Perec

A genetic algorithm to solve one mining selection problem 257
Orlando Belete-Fuentes, Rafael Zamora- Matamoros & Daimel Caballero-Echevarría

Determination of unsafe behavior in bus drivers and its relationship to traffic accidents. Case study of a company of public transport in Colombia 263
Fabian Alfredo Torres-Sandoval

Parametric analysis of the geothermal power: Dry-Steam, flash steam and hybrid cycle 273
Martín Salazar-Pereyra, Agustín Mora-Ortega, Angélica E. Bonilla-Blancas, Raúl Lugo-Leyte & Helen D. Lugo-Méndez

Effect of solid wastes leachates on a tropical soil 283
Alejandro Quintero-Ramírez, Yamile Valencia-González & Luis Augusto Lara-Valencia

Sugarcane bagasse and its potential use for the textile effluent treatment 291
Juan-Carlos Cueva-Orjuela, Angelina Hormaza-Anaguano & Andrés Merino-Restrepo

Influence of thermal residual stresses on the free vibration of reinforced laminates 298
Martha L. Sánchez, Gil Capote & Julián Carrillo

Sensitivity analysis of the scor metrics selected for the measurement of the management of a fruit-growing supply chain 306
Diego León Peña-Orozco & Leonardo Rivera

Statistical techniques in an alternative to support decision making with small samples: A contribution based on Bootstrap 316
Bárbara Mariela López-Aguilar, José Alberto Vilalta-Alonso, Carlos Vaquero-Puerta & Guillermo Vilalta-Alonso

Using the MACBETH Method to improve the scenario analysis tool PESTEL in large civil construction projects 322
José Geraldo Lamas Leite, Luiz Carlos Brasil de Brito Mello, João Carlos Correia Baptista Soares de Mello, Eduardo Picanço Cruz & Carlos Navarro Fontanillase

Analysis of constructive damage on single-family homes produced by vibrations induced by soil impacts in their surroundings 328
Luis Manuel Villa-García

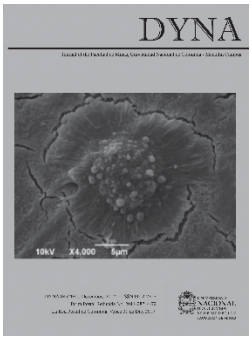
Composting of biowaste: Research trends and relevance in developing countries 334
Jonathan Soto-Paz, Ricardo Oviedo-Ocaña, Patricia Torres-Lozada, Luis Fernando Marmolejo-Rebellón & Pablo Cesar Manyoma-Velásquez

On the PM2.5/PM10 fraction estimation 343
Javier Olaya-Ochoa, Diana Paola Ovalle & Cristhian Leonardo Urbano

Study of elements behavior for integration management system with enterprise architecture approach 349
Annette Malleuve-Martínez, Daniel Alfonso-Robaina & José Lavandero-García

Our cover
Image alluding to Article:
Development of the magnesium alloy industry in Colombia - An opportunity

Authors:
Luisa Fernanda Berrio-Betancur, Mónica Echeverry-Rendón, Esteban Correa-Bedoya, Alejandro Alberto Zuleta-Gil, Sara María Robledo-Restrepo, Juan Guillermo Castaño-Gonzalez & Félix Echeverría-Echeverría



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

DYNA 84 (203), December, 2017. Medellin. ISSN 0012-7353 Printed, ISSN 2346-2183 Online

CONTENIDO

Previsión de demanda intermitente con métodos de series de tiempo y redes neuronales artificiales: Estudio de caso 9
René Santa Cruz R. & Camila Corrêa

Comparando el consumo energético para rutas de tránsito ferroviario mediante Alineamientos Verticales Sinusoidales Simétricos (SVSA), y aplicando redes neuronales artificiales. Un estudio de caso de MetroValencia (España) 17
Juan Diego Pineda-Jaramillo, Pablo Salvador-Zuriaga & Ricardo Insa-Franco

Dispersión de nanotubos de carbono para aplicaciones in-vitro 24
Claudia Espinosa, Isabel Cristina Ortiz-Trujillo, Jesús Antonio Carlos-Cornelio, Raúl Darío Zapata-Hernández & Lina Marcela Hoyos-Palacio

Predicción de la dureza superficial en base a los parámetros de corte en el torneado de acero AISI 1020 recocido 31
Omar José Zurita-Hurtado, Verónica Carmen Di Graci-Tiralongo & María Cristina Capace-Aguirre

Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático 37
Iker García-Garizábal, Paola Romero, Samantha Jimenez & Luis Jordá

Rotura de la presa de Vega de Tera, simulación hidráulica de la propagación de la avenida (Zamora, España) 45
José Luis Prieto Calderón; Roberto Marínez-Alegría López; Javier Taboa Castro; Isabel Montequi Martín; Germán Sanz Lobón

Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - Una oportunidad 55
Luisa Fernanda Berrio-Betancur, Mónica Echeverry-Rendón, Esteban Correa-Bedoya, Alejandro Alberto Zuleta-Gil, Sara María Robledo-Restrepo, Juan Guillermo Castaño-Gonzalez & Félix Echeverría-Echeverría

Requerimientos para laboratorios híbridos en Ingeniería de Manufactura 65
José Divitt Velosa-García, Fernando José Castillo-García, Eva Espíldora & Luis Cobo

Evaluación del desempeño del algoritmo M-ary en hardware reprogramable 75
Sergio Andrés Arenas-Hoyos & Álvaro Bernal-Noreña

Variación de las propiedades tecnológicas de látex de campo de caucho natural de variedades clonales de Hevea brasiliensis y de compuestos de caucho natural 80
Diego Hernán Giraldo-Vásquez & Sandra Milena Velásquez-Restrepo

Diseño de tablillas eléctricas de alta potencia para uso en cajas de fusibles automotrices 88
Iván Juan Carlos Pérez-Olguín

Modelo para la toma de decisiones, caso cambio de cocina de GLP a inducción en Ecuador 95
Freddy Benjamín Naula-Sigua, Jorge Arturo Campoverde-Campoverde & Denis Borenstein

Incidencia de la velocidad de siembra mecanizada en el arroz de riego 101
Mauricio González-Betancourt, Ana Milena Alonso-Fernández & Zaira Liceth Mayorga-Ruíz

Detección cooperativa de usuarios primarios en entornos multibanda basado en muestreo sub-Nyquist uniforme en el dominio disperso 110
Evelio Astaiza-Hoyos, Héctor Fabio Bermúdez-Orozco & Wilmar Yesid Campo-Muñoz

Evaluación de la eficiencia de equipos de enfriamiento evaporativo usando placas porosas en invernaderos 118
Flávio Alves-Damasceno, Luciano Barreto-Mendes, Tadayuki Yanagi Junior, Jofran Luiz-de Oliveira & Jairo Alexander Osorio-Saraz

Identificación de factores, variables e indicadores de resiliencia para la gestión sostenible de sistemas de drenaje urbano 126
Sergio Andrés Blanco-Londoño, Patricia Torres-Lozada & Alberto Galvis-Castaño

Fabricación y evaluación de hidrogeles de Quitosano, PVA y Aloe Vera para aplicaciones cutáneas 134
Diana Marcela Escobar-Sierra & Yuli Paola Perea-Mesa

Un nuevo modelo matemático para la cinética de flotación de carbones 143
Juan Sebastián Guerrero-Pérez & Juan Manuel Barraza-Burgos

Formación de rebabas y su control para el micro-fresado de polímeros: Un caso de estudio con refrigeración por tubo vortex 150
Michael Miranda-Giraldo, David Serje-Martínez, Jovanny Pacheco-Bolívar & Jorge Bris-Cabrera

Modelo de aprendizaje ubicuo basado en plataformas de televisión multipantalla (uLMTV) 160
Gustavo Alberto Moreno-López, Edgar de Jesús Ramírez-Monsalve & Jovani Alberto Jiménez-Builes

Mejoramiento de la adherencia en recubrimientos de Hidroxiapatita elaborados mediante proyección térmica oxiacetilénica, a partir de resultados de simulación numérica 170
Hamilton Copete, Fabio Vargas, Esperanza López, Jhonatan Gómez-Pérez & Tatiana Ríos

Modelado de compras verdes mediante redes de Petri coloreadas 177
Luz Maribel Guevara-Ortega & Leonardo Rodríguez-Urrego

Indicadores de desempeño energético: Una ruta hacia la sustentabilidad. "Caso de estudio una industria torrefactora de café" 184
Jenny Lorena Ibarguen-Valverde, Jorge Eduardo Angulo-López, Judith Rodríguez-Salcedo & Omar Prías-Caicedo

Revisión del estado del arte de soluciones IoT en salud 192
Diego Castro, William Coral, José Cabra, Julián Colorado, Diego Méndez & Luis Trujillo

Índice fuzzy para confort térmico de cerdos en la fase de pre-ceba con base en su comportamiento 201
Letícia Cibele da Silva Ramos Freitas, Alessandro Torres-Campos, Leonardo Schiassi, Tadayuki Yanagi Junior & Daiane Cecchin

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Cambios en fase líquida y propiedades mecánicas de papaya (*carica papaya l.*) osmodeshidratada durante la congelacion 208
Alfredo Adolfo Ayala-Aponte & Martha Isabel Sánchez-Tamayo

Procesos gaussianos en el pronóstico de vida útil en rodamientos de bolas 214
Juan Fernando López-López & Jhouben Janyk Cuesta-Ramirez & Hector Fabio Quintero-Riaza

Modelo de desarrollo productivo de la cadena pesquera española 220
Carmenza Luna, Wilson Nieto, Hugo Mercado & Javier Pajares

Modelamiento de equilibrio Líquido-Vapor usando redes neuronales grises como predictor de parámetros de interacción binaria 226
Eduardo Vyhmeister, Jonathan Rodríguez-Pino, Lorenzo Reyes-Bozo, Rosa Galleguillos-Pozo, Héctor Valdés-González & Roman Rodríguez-Maecker

Estimación rápida del contenido de clorofila en hojas usando el sensor de luz de un teléfono celular 233
Daniel Gaviria-Palacio, Juan José Guáqueta-Restrepo, Daniel Mauricio Pineda-Tobón & Juan C. Pérez

Filtrado wavelet de descargas parciales y su clasificación de patrones usando redes neuronales artificiales y máquinas de soporte vectorial 240
Ian Carlo Guzmán, José Luis Oslinger & Rubén Darío Nieto

La desintegración y el reciclado potencial posibilidad seleccionado abrasivo a chorros de agua de alta presión 249
Andrzej Perec

Técnicas genéticas en la solución de un problema minero 257
Orlando Belete-Fuentes, Rafael Zamora- Matamoros & Daimel Caballero-Echevarría

Determinación de conductas inseguras en conductores de bus y su relación con accidentes de tránsito. Estudio de caso de una empresa de transporte público en Colombia 263
Fabian Alfredo Torres-Sandoval

Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos 273
Martín Salazar-Pereyra, Agustín Mora-Ortega, Angélica E. Bonilla-Blancas, Raúl Lugo-Leyte & Helen D. Lugo-Méndez

Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical 283
Alejandro Quintero-Ramírez, Yamile Valencia-González & Luis Augusto Lara-Valencia

Bagazo de caña de azúcar y su potencial aprovechamiento para el tratamiento de efluentes textiles 291
Juan-Carlos Cueva-Orjuela, Angelina Hormaza-Anaguano & Andrés Merino-Restrepo

Influencia de las tensiones térmicas residuales en la vibración libre de laminados reforzados 298
Martha L. Sánchez, Gil Capote & Julián Carrillo

Análisis de sensibilidad de métricas scor seleccionadas para medir la gestión de una cadena de abastecimiento frutícola 306
Diego León Peña-Orozco & Leonardo Rivera

Técnicas estadísticas en una alternativa de apoyo a la toma de decisiones con muestras pequeñas: Una contribución basada en Bootstrap 316
Bárbara Mariela López-Aguilar, José Alberto Vilalta-Alonso, Carlos Vaquero-Puerta & Guillermo Vilalta-Alonso

Usando el Método MACBETH para mejorar la herramienta de análisis de escenarios PESTEL en grandes proyectos de construcción civil 322
José Geraldo Lamas Leite, Luiz Carlos Brasil de Brito Mello, João Carlos Correia Baptista Soares de Mello, Eduardo Picanço Cruz & Carlos Navarro Fontanillase

Análisis de los daños constructivos sobre una vivienda unifamiliar producidos por vibraciones inducidas por impactos contra el suelo en sus proximidades 328
Luis Manuel Villa-García

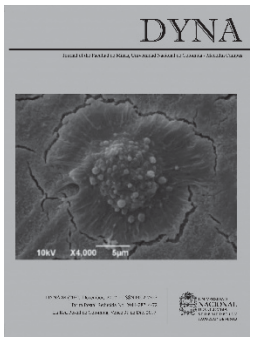
Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo 334
Jonathan Soto-Paz, Ricardo Oviedo-Ocaña, Patricia Torres-Lozada, Luis Fernando Marmolejo-Rebellón & Pablo Cesar Manyoma-Velásquez

Acerca de la estimación de la fracción PM2.5/PM10 343
Javier Olaya-Ochoa, Diana Paola Ovalle & Cristhian Leonardo Urbano

Estudio del comportamiento de variables para la integración del sistema de dirección de la empresa con enfoque de arquitectura empresarial 349
Annette Malleuve-Martínez, Daniel Alfonso-Robaina & José Lavandero-García

Nuestra carátula
Imagen alusiva al artículo:
Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - Una oportunidad

Autores:
Luisa Fernanda Berrio-Betancur, Mónica Echeverry-Rendón, Esteban Correa-Bedoya, Alejandro Alberto Zuleta-Gil, Sara María Robledo-Restrepo, Juan Guillermo Castaño-Gonzalez & Félix Echeverría-Echeverría



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Intermittent demand forecasting with time series methods and artificial neural networks: A case study

René Santa Cruz R. & Camila Corrêa

Ingeniería de Producción y Sistemas, Universidad del Estado de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil. adolfo.rodriguez@udesc.br, camilacorrea1209@gmail.com

Received: March 7th, 2017. Received in revised form: August 29th, 2017. Accepted: September 14th, 2017.

Abstract
This article aims to study the intermittent demand forecasting for a specific type of spare part of a Brazilian refrigeration industry that commercialize its products in the Latin American market. Demand characterization is performed in terms of their intermittency and variability. Results are obtained with classical intermittent forecasting methods outside the sample: Croston, Syntetos-Boylan Approximation (SBA), Shale-Boylan-Johnston Correction (SBJ), Multiple Aggregation Prediction Algorithm (MAPA) and with Artificial Neural Networks (ANN) based models. Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) are used for comparison and selection of forecast model. The comparative analysis results shows that the predictions based on a simple three-layer ANN model trained with the Resilient Backpropagation algorithm present better performance. The calculations were performed using R software with RStudio, "forecast", "tsintermittent" and "neuralnet" libraries.

Keywords: demand forecasting; intermittent demand; artificial neural networks.

Previsión de demanda intermitente con métodos de series de tiempo y redes neuronales artificiales: Estudio de caso

Resumen
Este artículo tiene como objetivo estudiar la previsión de la demanda intermitente de un tipo específico de pieza de reposición en una industria brasilera de sistemas de refrigeración que comercializa sus productos en el mercado latinoamericano. La demanda es caracterizada en términos de intermitencia y variabilidad. Los resultados son calculados usando métodos clásicos de previsión intermitente fuera de la muestra: Croston, Aproximación Syntetos-Boylan (SBA), Corrección Shale-Boylan-Johnston (SBJ), Algoritmo de Previsión de Agregación Múltiple (MAPA) y modelos basados en Redes Neuronales Artificiales (RNA). El Error Cuadrático Medio (RMSE) y Desvío Medio Absoluto (MAE) son utilizados para efectos de comparación y selección del modelo de previsión. El análisis comparativo de los resultados muestra que las previsiones basadas en modelos RNA simple de tres capas y entrenadas con el algoritmo *Resilient Backpropagation* presentan mejor desempeño. Los cálculos fueron realizados con el software R, RStudio, bibliotecas "forecast", "tsintermittent" y "neuralnet".

Palabras clave: previsión de la demanda; demanda intermitente; redes neuronales artificiales.

1. Introducción

La previsión de la demanda es una de las funciones más importantes y cruciales en la gestión y toma de decisión en las organizaciones. En particular, los departamentos de producción y operaciones utilizan la previsión como base para tomar decisiones, de forma continua, acerca de todos los recursos necesarios en el sistema productivo.

La sobre estimación de la demanda puede originar niveles de "sobre producción", riesgos de generar volúmenes indeseables de inventarios, y consecuentemente, desencadenar una elevación de costos. De forma similar, sub estimar la demanda puede traducirse en incumplimiento de compromisos, posibles pérdidas de oportunidades de

How to cite: Santa Cruz, R. and Corrêa, C., Previsión de demanda intermitente con métodos de series de tiempo y redes neuronales artificiales: Estudio de caso DYNA, 84(203), pp. 9-16, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

negocios, y ventas futuras comprometidas. En ambas situaciones, la competitividad de la organización será afectada significativamente. El nivel de precisión de los pronósticos de la demanda tiene un gran impacto en todos los niveles de la cadena de suministro de las organizaciones [1].

En el marco de la globalización, y con escenarios cada vez más competitivos, la estimación de la demanda futura de un producto encierra cierta dificultad. Esta situación se intensifica substancialmente cuando la demanda de productos presenta un comportamiento intermitente en el tiempo. Estimar valores futuros de demanda de un producto que registra valores iguales a cero, o demanda nula durante algunos períodos, es una tarea muy compleja. En función de esa particularidad, durante las últimas décadas varios métodos y modelos fueron propuestos en la literatura para auxiliar la previsión de la demanda intermitente.

El presente artículo tiene como objetivo estudiar la previsión de la demanda intermitente de una industria de sistemas de refrigeración. La industria está localizada en el Brasil y actúa en el mercado, nacional e internacional, hace más de cuatro décadas. Son comercializados sistemas de refrigeración y sus respectivos componentes. Los productos son exportados a mercados de todo el mundo. Este estudio se concentra en el mercado Latinoamericano, específicamente en el segmento de piezas de reposición.

En el análisis son abordados y comparados resultados de dos enfoques de previsión de demanda intermitente. Por un lado, se realiza la previsión usando los principales métodos clásicos estadísticos. Por otro lado, la previsión es estimada a través de modelos basados en Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Para cumplir con el objetivo propuesto, el resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se realiza una breve descripción de los principales modelos y métodos clásicos utilizados en la previsión de la demanda intermitente. En esta sección también son descritos los modelos basados en redes neuronales artificiales. En la Sección 3 se presenta la metodología y los datos usados en el presente trabajo. Los resultados y la discusión de los mismos son descritos en la sección 4. Finalmente, las consideraciones finales son presentadas en la Sección 5.

2. Métodos de previsión de demanda intermitente

Las series de demanda que presentan períodos con valores cero, consideradas demandas nulas, pueden ser caracterizadas en cuatro tipos según los grados de intermitencia y desempeño errático [2]. Para este fin son calculados dos indicadores: un Coeficiente de Variación Cuadrática (CV2), y el Promedio del Intervalo entre Demandas (ADI). Este último valor puede ser clasificado en otros cuatro grupos: i) errática, cuando el tamaño de la demanda presenta elevada variabilidad; ii) intermitente, cuando la serie presenta varios valores nulos de demanda; iii) granulada ó irregular (en la literatura es conocida como lumpy) cuando la variabilidad del tamaño de la demanda y los períodos entre dos demandas no nulas son altos; y iv) atenuada, cuando la variabilidad del tamaño de la demanda y el período entre dos demandas no nulas son bajas [3-5]. La Fig. 1 muestra esta tipología y los límites de CV2 y ADI.

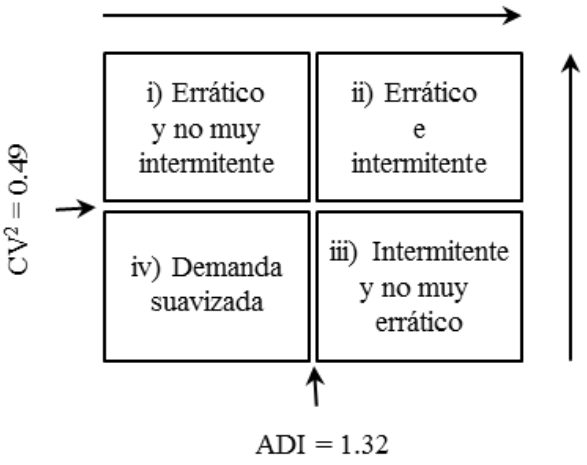


Figura 1. Padrones de demanda intermitente
Fuente: Modificado de [4].

2.1. Métodos clásicos de previsión

La suavización exponencial (SE) es uno de los principales métodos clásicos de previsión cuantitativa, es sencillo, robusto y ampliamente utilizado para la previsión de la demanda [6]. Los valores pasados de la serie de tiempo son ponderados y desvalorizados en relación a los más recientes. Ese proceso se realiza en función de parámetros de atenuación que varían en el intervalo [0,1]. De esta manera, con la atenuación de los valores extremos de la serie, es posible definir el patrón básico de la demanda.

Por un lado, los valores de demanda cero en la serie temporal, y por otro, la variabilidad del tamaño de la demanda y del patrón de comportamiento de los datos, dificultan la aplicación de los modelos clásicos de previsión [7].

Croston [8] fue uno de los primeros autores en mostrar que el uso de los métodos clásicos de atenuación exponencial generaba desvíos importantes en la previsión de demandas intermitentes. El método de Croston (CRO) utiliza como base la atenuación exponencial simple separando la serie de tiempo en dos partes: la primera, una serie con valores positivos de demanda, y la segunda, con los tiempos entre demandas consecutivas no nulas. En cada una de esas series se estima la previsión por medio de suavización exponencial y luego, ambos valores son actualizados cuando existe un valor no nulo de demanda. En ambos casos se utiliza el mismo valor del parámetro de atenuación alfa (α).

Una de las características particulares del método CRO es el resultado expresado en términos de una tasa prevista de demanda intermitente, y entendida como la razón "demanda/período" [9]. La Fig. 2 presenta el algoritmo del método Croston donde:

d_t : demanda en el periodo t;

$\widehat{D}_t$: previsión de la demanda no nula para el período siguiente t;

ft : tiempo entre dos demandas no nulas;

$\hat{F}_t$: previsión del intervalo de demanda;

k : intervalo desde la última demanda no nula;

α : parámetro de atenuación, $0 \leq \alpha \leq 1$;

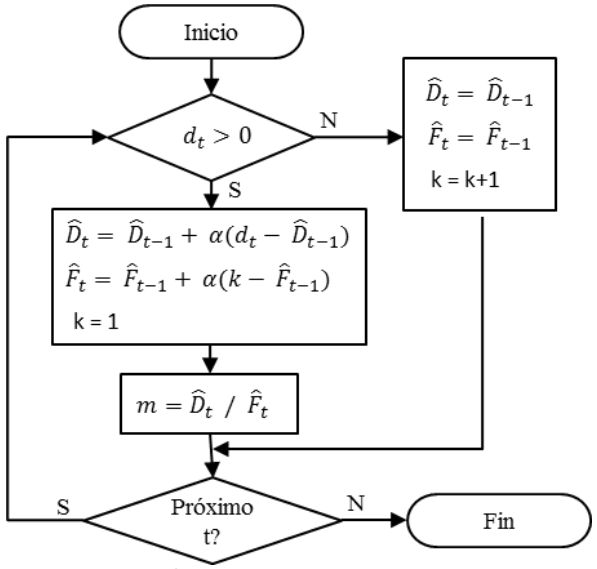


Figura 2. Algoritmo método Croston.
Fuente: Modificado de [2].

m : demanda promedio en el período.

Así, la previsión para el próximo período es estimada como la razón entre $\hat{D}_t$ y $\hat{F}_t$, y calculada mediante la siguiente expresión:

$$m = \frac{\hat{D}_t}{\hat{F}_t} \tag{1}$$

Si bien el método de Croston es ampliamente utilizado en previsión intermitente, estudios posteriores identificaron cierto desvió positivo en la estimación de la demanda. Syntetos y Boylan [7] mostraron que para valores de alfa inferiores a 0.15 los resultados del modelo son satisfactorios incrementándose, de forma significativa, el desvío positivo a medida que se incrementa este parámetro.

La corrección introducida al modelo original [10], conocido como modelo SBA (iniciales de los nombres de los autores), modifica el factor que multiplica la previsión de la demanda del período mediante la expresión 2.

$$m = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\frac{\hat{D}_t}{\hat{F}_t} \tag{2}$$

El método modificado SBA presenta mejores resultados que el método original cuando las series de tiempo pertenecen a la clasificación i, ii y iii según la caracterización mostrada en Fig. 1, [11-12].

En [13] fue propuesta otra modificación, denominada corrección SBJ, cuando la llegada de los pedidos sigue comportamiento de tipo Poisson, introduciendo el siguiente factor de corrección:

$$m = \left(1 - \frac{\alpha}{2-\alpha}\right)\frac{\hat{D}_t}{\hat{F}_t} \tag{3}$$

Estudios posteriores presentan modificaciones al método original de Croston acrecentando algunas características particulares. Según [14] una de las propuestas más interesantes considera el aspecto de la obsolescencia en la previsión de la demanda intermitente. Denominado modelo TSB [11] propone la previsión para el período como la multiplicación del resultado de la atenuación exponencial de las demandas positivas por la probabilidad de no tener demanda nula en ese período. De esta manera la estimación de la probabilidad de una demanda es actualizada para cada período.

Otro enfoque que viene ganando espacio se basa en la agregación temporal para previsión de la demanda intermitente. Conocido como método ADIDA (*Aggregate, Disaggregate, Intermittent Demand Approch*, por sus iniciales en inglés) transforma la serie inicial en otra serie modificando la frecuencia en que se agregan las demandas de esos periodos, por ejemplo, de mensual a trimestral. Con la serie alternativa se realiza la extrapolación y luego se procede con la desagregación para estimar la previsión de la demanda para un determinado período [15].

2.2. Previsión con redes neuronales artificiales

Las RNA son unidades interconectadas de procesamiento de información inspiradas en las neuronas biológicas imitando su estructura, capacidad de procesamiento paralelo y aprendizaje. La neurona es la estructura básica de una RNA. En la Fig. 3 se muestran los elementos básicos de una neurona artificial, a saber:

i) conjunto de datos P_i, representando información de entrada;
ii) pesos W_i, asociada a cada entrada representando la sinapsis entre neuronas, elemento que permite la modulación de la intensidad de la señal de entrada;
iii) sumatoria de todas las señales de entrada ponderadas por sus pesos sinápticos;
iv) una función φ de transferencia o activación que permite limitar la amplitud de la señal de salida de una neurona a un valor finito;
v) sesgo *B* (*bias*) un factor externo que permite aumentar o disminuir el valor de la entrada neta de la función de activación;
vi) salida (A), respuesta de la RNA.

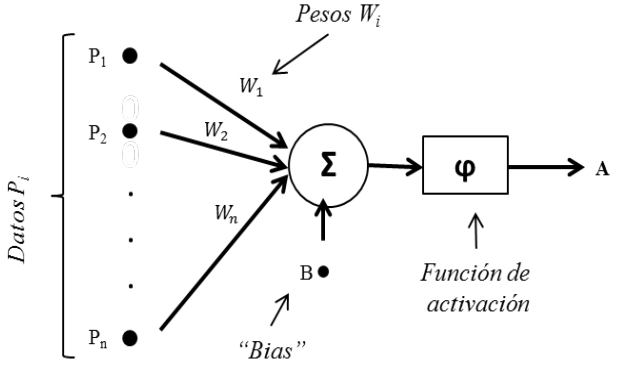


Figura 3. Estructura básica de una RNA
Fuente: Modificado de [16].

Para una determinada neurona *k* las siguientes expresiones permiten obtener la señal de respuesta:

$$A_i = \varphi(Z_k + B_k) \tag{4}$$

$$Z_k = \sum_{i=1}^{n} W_{ki}\ P_i \tag{5}$$

Una serie de funciones no lineales fueron utilizadas en la literatura para transformar las señales ponderadas de entrada en una señal de salida con valor finito Ai. Dos son las más comunes: las de tipo umbral o de límite, generalmente utilizadas para redes con entradas y salidas binarias, y la función de tipo "sigmoidal". Esta última función es la más común en aplicaciones con redes neuronales de varias capas [17].

Las neuronas artificiales son dispuestas en niveles o capas formando la estructura de una RNA. Estas capas son generalmente clasificadas en tres grupos: la primera para la entrada de información, una o varias capas ocultas responsables por la mayor parte del procesamiento, y una capa de salida que proporciona la respuesta final de la red [16].

La forma como están organizadas y conectadas las neuronas entre las capas de la red determina la topología de la RNA. Dos son las configuraciones básicas, i) conexión hacia adelante (*feed forward*) cuando la salida de la neurona en la i-esima capa no puede ser usada como entrada de neuronas de capas precedentes; y ii) conexión hacia atrás (*feed back*) en situación contraria a la anterior donde la red de conexiones presenta, por lo menos, un ciclo de retroalimentación. Una red *feed forward* con una única capa es conocida como perceptron [16].

Según [18] algunas de las características de las RNA son muy valiosas y atractivas para estimar la previsión, a saber: i) son considerados "aproximadores" funcionales universales [19]; ii) son no lineales; iii) son métodos "autoadaptativos"; y iv) previamente entrenadas pueden generalizarse para inferir sobre otros sistemas.

En esta línea, corresponde señalar la popularidad de las redes neuronales como "aproximadores universales". Esto debido a su capacidad de aproximar funciones no lineales complejas a partir de muestras de entrada relativamente pequeñas [20].

Otra de las características de esa estructura es la capacidad de aprendizaje [17]. La RNA es entrenada para que pueda proporcionar la respuesta adecuada a determinado estímulo de entrada. Durante la etapa de entrenamiento son modificados de forma paulatina los parámetros de la RNA, fundamentalmente sus pesos sinápticos y sesgos para que el resultado sea el correcto. Los criterios matemáticos que determinan las modificaciones de los parámetros de la RNA son denominadas reglas de aprendizaje. Una de las más utilizadas es la *backpropagation* (BP) principalmente en RNA no lineales.

Gracias a la flexibilidad de las RNA y su capacidad de resolver problemas no lineales, varias configuraciones de redes artificiales fueron propuestas, investigadas y aplicadas con éxito en predicción de series de tiempo, algunos ejemplos pueden ser encontrados en [21-29]. La RNA *feed forward* multicapa (MLP) entrenada con el algoritmo *backpropagation* es la más utilizada [30-31].

Gutierrez et al. [32], usando un MLP configurado como (2,3,1) y entrenado con BP, obtuvo previsiones de demanda intermitente con menores errores en relación a los métodos tradicionales. En la entrada de la red fueron utilizadas dos variables: i) la demanda al final del periodo inmediatamente anterior y ii) el número de períodos que separan las dos últimas demandas distintas de cero al final del período inmediatamente anterior. De esta manera, la respuesta de la RNA representa la previsión para ese período.

3. Datos y método

La presente investigación de previsión de la demanda intermitente corresponde a una empresa instalada en Brasil. Esta industria está presente en el mercado de sistemas de refrigeración hace más de cuatro décadas. Ofrece productos reconocidos por su tecnología, alta calidad y exporta a más de 80 países atendiendo a los más diversos clientes alrededor del mundo. El análisis de la previsión se concentra en la demanda de un tipo específico de pieza de reposición de sistemas de refrigeración destinado al mercado latinoamericano.

Mediante el método de clasificación ABC [33] fueron seleccionados 10 clientes que corresponden a la clase A de la curva de Pareto y que presentan, en conjunto, los mayores volúmenes de la demanda. De cada uno de los clientes fueron recolectadas demandas mensuales (en unidades) de los últimos cinco años y medio.

Para la previsión dentro de la muestra fueron utilizadas 66 observaciones. Para la previsión fuera de la muestra las series fueron divididas en dos grupos, el primero con 54 valores para estimar la previsión y el segundo, con 12 datos para efectos de validación y control de errores.

El análisis de la demanda es realizado en tres fases. Inicialmente son caracterizadas las series de tiempo en intermitente, atenuada, errática ó granulada de acuerdo con los coeficientes CV2 y ADI. Para la previsión de la demanda se utilizan dos enfoques: i) métodos estadísticos clásicos de previsión intermitente, y ii) modelo basado en Redes Neuronales Artificiales.

En el primer caso, se estima la previsión de la demanda dentro y fuera de la muestra usando los métodos: CRO, SBA, SBJ y MAPA (*Intermitent Multiple Aggretation Prediction Algorithm*). Los cálculos son realizados con el software R, GNU RStudio, bibliotecas "*forecast*" y "*tsintermittent*".

En el segundo caso, la previsión de la demanda fuera de la muestra es estimada usando RNA de tipo simple con tres capas, y entrenadas mediante el algoritmo "*rprop - Resilient Backpropagation*". Los cálculos son efectuados con el mismo software R utilizando la biblioteca "*neuralnet*".

Para la validación y control de la previsión en todos los casos se usan como estadísticos de ajuste los dos más recurrentes en la literatura: el error cuadrático medio RMSE y el error medio absoluto MAE.

Tabla 1.
Características de las series de tiempo

C	Prom.	D.S	P(%)	CV2	ADI	Tipo
1	1668	1491	34.33	0.18	1.52	Interm.
2	1513	2188	52.24	0.48	2.00	Interm.
3	2081	1934	34.33	0.22	1.41	Interm.
4	1108	1008	31.34	0.25	1.46	Interm.
5	1090	1232	49.25	0.15	1.94	Interm.
6	1829	1712	34.33	0.23	1.52	Interm.
7	690	480	4.48	0.42	1.05	Suave
8	914	1006	40.30	0.32	1.68	Interm.
9	4482	3324	10.45	0.39	1.10	Suave
10	1149	1514	58.21	0.14	2.29	Interm

C: cliente.
Prom: promedio de la serie en unidades.
D.S.: desviación standard.
P(%): proporción de demanda nula en porcentaje.
CV2: coeficiente de variación cuadrática.
ADI: promedio del intervalo entre demandas.
Fuente: los autores, 2017

4. Resultados y discusión

La Tabla 1 muestra las particularidades de las series de demanda, los valores ADI, CV^2 y la categorización según la regla especificada en la Fig. 1.

De las 10 series de tiempo sólo dos presentan menor grado de intermitencia y variabilidad. En función de ello, ambas pueden ser enmarcadas como demandas suaves. Conforme [4] en estos dos casos es recomendable estimar los pronósticos mediante el método CRO original. En las otras 8 series es oportuno realizar los pronósticos mediante el método SBA. Esto se debe a que las series muestran ser intermitentes con poca variabilidad, o son erráticos con poca intermitencia. Ninguna de las series muestra un padrón errático e intermitente (*lumpy*).

Esta situación se refleja también con las demandas nulas de las series 7 y 9, con 4.48% y 10.45% de valores mensuales iguales a cero, respectivamente. Las demás series muestran mayores porcentajes llegando hasta un 58.21%. Otra característica que merece atención es la elevada desviación estándar que muestran todas las series.

Los resultados de la previsión de la demanda intermitente dentro de la muestra se detallan en la Tabla 2.

Para cada cliente la previsión para los próximos 12 meses es estimada mediante cuatro métodos: CRO, SBA, SBJ, MAPA con sus respectivos errores RMSE y MAE. En este caso, la información de los últimos 66 meses es utilizada para establecer el modelo de previsión intermitente. No obstante, los resultados *in-sample* permiten determinar el modelo que podría ser usado para la previsión de la demanda, en realidad los mismos datos constituyen la base para verificar su capacidad predictiva. Considerando las características de la información disponible, es oportuno, en el presente este caso, que los datos utilizados para formalizar el modelo de previsión sean diferentes de aquellos usados para validar sus resultados. En este caso, es pertinente el análisis *out-sample* para estimar la demanda.

Tabla 2.
Previsión de la demanda dentro de la muestra.

	CROSTON			SBA			SBJ			MAPA		
C	Prev.	RMSE	MAE	Prev.	RMSE	MAE	Prev.	RMSE	MAE	Prev.	RMSE	MAE
1	1680	1504.73	1240.62	1673	1505.03	1240.82	1673	1505.03	1240.82	1781	1527.64	1248.19
2	1557	2203.41	1756.33	1560	2204.33	1755.45	1560	2202.7	1753.41	1541	2349.13	1940.45
3	2231	1945.84	1668.37	2213	1942.69	1664.86	2213	1943.29	1665.34	2078	1862.94	1624.27
4	1031	1077.61	818.33	1015	1076.02	817.46	1007	1076.26	817.50	1103	986.04	791.15
5	1105	1232.60	1131.93	1105	1232.62	1131.95	1105	1232.62	1131.95	1113	1266.03	1166.45
6	1744	1741.72	1483.66	1734	1741.97	1483.57	1734	1742.18	1483.64	1869	1788.08	1568.67
7	706	485.84	377.45	706	485.87	377.45	706	486.05	377.601	700	487.86	377.66
8	909	1007.28	850.81	899	1007.36	850.40	898	1007.36	850.37	895	1026.44	875.44
9	4491	3354.70	2612.67	4495	3351.51	2609.74	4496	3350.67	2608.62	4719	3371.49	2552.25
10	1167	1512.34	1354.09	1167	1512.36	1354.10	1167	1512.33	1354.08	1176	1533.79	1373.19

Fuente: los autores, 2017

Tabla 3.
Previsión de la demanda fuera de la muestra.

	CROSTON			SBA			SBJ			MAPA		
C	Prev.	RMSE	MAE	Prev.	RMSE	MAE	Prev.	RMSE	MAE	Prev.	RMSE	MAE
1	1570	1556.92	1288.17	1571	1556.80	1287.99	1571	1556.80	1287.99	1632	1538.03	1257.23
2	1568	2455.44	1720.46	1620	2463.82	1737.82	1619	2463.72	1737.62	1658	2470.69	1750.64
3	2107	2503.27	2308.33	2107	2503.28	2308.33	2107	2503.28	2308.33	2020	2511.76	2308.33
4	1068	966.59	780.59	1014	961.97	789.61	1022	962.43	788.37	1133	976.04	769.79
5	1048	1448.86	1310.68	1048	1448.84	1310.66	1048	1448.93	1310.72	1028	1454.98	1313.98
6	2007	1268.38	1110.83	2005	1267.66	1110.32	2004	1267.11	1109.94	1932	1234.86	1085.90
7	705	593.89	516.85	710	594.00	517.58	705	593.89	516.85	737	595.41	522.12
8	999	837.24	772.43	1001	838.18	773.27	1000	837.79	772.92	973	828.09	763.89
9	4997	3389.47	3052.1	4986	3379.92	3042.75	4997	3389.15	3051.79	5016	3405.76	3068.03
10	1152	1951.09	1714.92	1154	1950.90	1715.60	1155	1950.86	1715.75	1134	1952.87	1708.77

Fuente: los autores, 20017

De acuerdo con esta práctica, la Tabla 3 resume los resultados de la previsión de la demanda intermitente fuera de la muestra. En esa tabla se observan las previsiones estimadas con los métodos clásicos: CRO, SBA, SBJ, MAPA, y sus respectivos errores RMSE y MAE. Como son estimaciones de demanda de piezas de reposición, los valores de las previsiones son redondeadas a números enteros.

Como se observa en la Tabla 3, los resultados estimados con métodos CRO y sus derivados SBA y SBJ no se ajustan exactamente a las recomendaciones vertidas en [4]. Esta constatación se explica porque en la mayoría de las series de tiempo los resultados, con estos tres métodos, se mostraron bastante próximos, y en algunos casos son prácticamente iguales. La mayor diferencia de las previsiones con CRO, SBA y SBJ es de 5.34%, calculada con base en la menor previsión, y que corresponde al cliente número 4. La diferencia en el caso del segundo cliente es de 3.32% y en los restantes no alcanza al 1%.

Desde el punto de vista de la RMSE, los resultados muestran que el método CRO original es el más adecuado para estimar la demanda futura de 30% de clientes, el modelo MAPA para otros 30%, el modelo SBA para otros 30%, y finalmente, 10% corresponde al modelo SBJ.

De igual forma, considerando el MAE, el modelo MAPA pasa a ser el más adecuado para estimar la previsión de cinco de los clientes, es decir, del 50%, seguido por el modelo CRO en 30%, y el SBA el 20% restante. Estos resultados son mostrados en las últimas 4 columnas de la Tabla 4.

Por otro lado, fueron utilizados modelos basados en RNA de tres capas para estimar la previsión de la demanda intermitente. En todos los casos, las redes fueron entrenadas utilizando los algoritmos "Backpropagation" y "Resilient Backpropagation-RProp" [34]. Fueron testadas varias configuraciones de MLP (4,N,1) modificando, fundamentalmente, el número de neuronas en la capa oculta. Las redes que fueron entrenadas usando el algoritmo RProp presentaron menor RMSE y MAE. La Tabla 5 muestra, por ejemplo, los resultados obtenidos para el primer cliente.

Tabla 4.
RMSE y MAE: previsión clásica fuera de la muestra y RNA.

	Rede neuronal		Met. Clásicos (min errores)			
C	**RMSE**	**MAE**	**RMSE**	**Mét.**	**MAE**	**Mét.**
1	960.32	765.71	1538.03	MAPA	1257.23	MAPA
2	2350.69	1352.84	2455.44	CRO	1720.46	CRO
3	1676.46	1021.32	2503.27	CRO	2308.33	CRO
4	566.35	458.09	961.97	SBA	769.79	MAPA
5	751.98	530.84	1448.84	SBA	1310.66	SBA
6	826.38	601.47	1234.86	MAPA	1085.9	MAPA
7	578.80	501.61	593.89	CRO	516.85	CRO
8	409.76	221.98	828.09	MAPA	763.89	MAPA
9	3000.30	2783.29	3379.92	SBA	3042.75	SBA
10	1560.53	1307.33	1950.86	SBJ	1708.77	MAPA

Fuente: los autores, 2017

Tabla 5.
RMSE y MAE para los algoritmos usados en las RNA.

	"Resilient Backprop."		***Backpropagation***	
Configuración	**RMSE**	**MAE**	**RMSE**	**MAE**
(4,4,1)	960.32	765.71	1590.73	1379.06
(4,6,1)	979.95	782.16	1715.39	1437.97
(4,8,1)	1004.55	795.04	1757.12	1520.99
(4,12,1)	1025.24	834.46	1771.45	1493.19

Fuente: los autores, 2017

De esa manera, las dos primeras columnas de la Tabla 5 muestran los errores RMSE y MAE resultantes de la previsión usando o algoritmo "*RProp*". Esos resultados muestran que la RNA configurada como (4,4,1) presentó mejores resultados. Para esa configuración se consideraron cuatro señales de entrada en la primera capa:

i) La demanda del período precedente inmediato
ii) El número de períodos que separan las dos últimas demandas no nulas a partir de la inmediatamente precedente.
iii) El número acumulado de períodos sucesivos que presentan demanda nula o cero.
iv) La antepenúltima demanda.

La Fig. 4 muestra una RNA, generada con el software RStudio, con cuatro neuronas en la primera capa, otras cuatro en la capa oculta y una en la capa de salida.

A diferencia de los métodos clásicos CRO, SBA, SBJ y MAPA, que presentan las previsiones como una razón "demanda/período", la RNA permite estimar demandas directas en unidades para cada período. La Fig. 5 muestra un ejemplo de la previsión para uno de los clientes utilizando el método clásico SBA y una RNA.

Como se observa, la previsión del método SBA es una razón constante durante los meses proyectados, en cuanto que con la RNA se obtienen valores específicos para cada período.

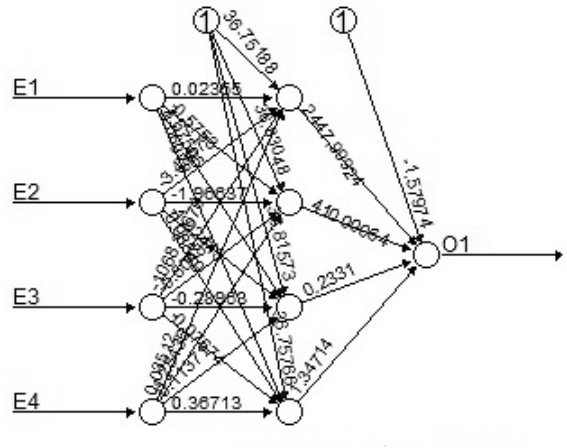


Figura 4. Configuración de la RNA.
Fuente: los autores, 2017

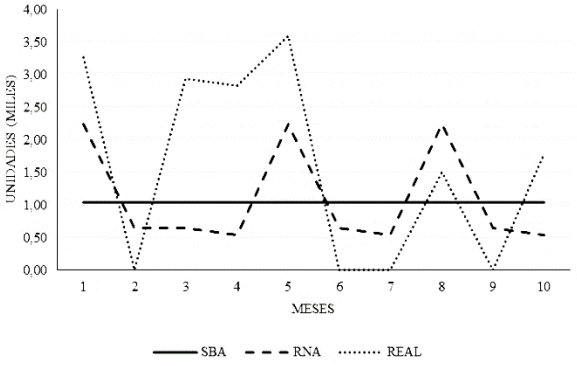


Figura 5. Previsión fuera de la muestra: CRO y RNA.
Fuente: los autores, 2017

En la figura también se puede apreciar la diferencia de los pronósticos entre estos dos métodos y los datos reales de demanda para ese período.

Los resultados de la RNA acompañan de mejor manera el comportamiento de la demanda. En mayor o menor grado ese mismo comportamiento fue observado en todos los casos. Los valores previstos usando RNA se aproximan más del comportamiento de las demandas reales que los obtenidos con los métodos clásicos CRO y sus derivados.

Como se observa en la Tabla 4, en todos los casos analizados, las previsiones con RNA presentaron mejores resultados que los obtenidos con los métodos clásicos, los valores de RMSE y MAE fueron menores en las previsiones con RNA.

5. Consideraciones finales

Con base en información histórica, en el presente artículo, se realizó un análisis extensivo de la previsión de demanda intermitente de piezas de reposición de sistemas de refrigeración. Se analizaron las series de tiempo caracterizándolas en función de sus valores CV^2 y ADI. Esta caracterización mostró que la demanda de piezas presenta, mayoritariamente, comportamiento intermitente. Los resultados develaron que el 80% de las demandas son intermitentes, y que el 20% presentan menor grado de intermitencia y variabilidad. Esta característica permitió que puedan ser catalogas como demandas suaves.

La previsión de la demanda fue estimada usando los métodos de previsión clásicos: CRO, SBA, SBJ, MAPA, y modelos con base en RNA.

Los resultados de la previsión fuera de la muestra usando modelos con base en RNA develaron menores valores de RMSE y MAE que aquellos obtenidos con los modelos clásicos. Lo anterior corrobora estudios de la literatura que comparan estos dos enfoques aplicados a la previsión de demanda con estas características. Algunos de estos estudios pueden ser encontrados en [22,27,32].

Los resultados también mostraron que la previsión usando métodos clásicos son términos de razón "demanda / período" y, de cierta manera, constantes durante el horizonte de previsión. En contrapartida, los resultados mediante RNA mostraron valores mucho más próximos del comportamiento real de la demanda fuera de la muestra, lo que explica menores valores de RMSE y MAE.

Del presente trabajo se concluye que, no obstante, la previsión de la demanda intermitente usando RNA presentó mejores resultados, cuando comparada con los métodos tradicionales, la especificación de las redes y la fase de entrenamiento constituyen procesos muy sensibles y de cierta manera relativamente críticos.

En el presente estudio de caso varias configuraciones de RNA fueron testadas para obtener resultados satisfactorios. Por un lado, los resultados de esta investigación permitirán a la industria contar con un conjunto mayor elementos de juicio para la toma de decisión final en la gestión de sus inventarios. Esto permitirá una mejor gestión y conciliación entre la cantidad demandada y la cantidad producida. Por otro lado, es evidente todavía la dificultad en su aplicación directa con la automatización de la previsión mediante RNA en los actuales sistemas ERP (*Entrerprise Resource Planning*) utilizados en la industria.

Referencias

[1] Kumar, P., Herbert, M. and Rao, S., Artificial Neural Network approach to industrial demand forecast. Proceeding of 23rd The IIER International Conference Singapure, 25 th April. ISBN: 978-93-82702-99-3. 2015.

[2] Sahin, M., Kizilaslan, R. and Demirel, O.F., Forecasting aviation spare parts demand using croston based methods and artificial neural networks. Journal of Economic and Social Research, 15(2), pp. 1-21, 2013. ISSN: 13021060.

[3] Willemain, T.R., Smart, C.N., Shockor, J.H. and DeSautels, P.A., Forecasting intermittent demand in manufacturing: A comparative evaluation of Croston's method. International Journal of Forecasting, 10(4), pp. 529-538, 1994. DOI: 10.1016/0169-2070(94)90021-3.

[4] Ghobbar, A. and Friend, H.C., Sources of intermittent demand for aircraft spare parts within airline operations. Journal of Air Transport Management, 8(4), pp. 221-231, 2002. DOI: 10.1016/S0969-6997(01)00054-0.

[5] Babiloni, E., Cardós, M., Albarracín, J.M. and Palmer, M.E., Demand categorisarion, forecasting, and inventory control for intermittent demand items. South African Journal of Industrial Engineering, 21(2), pp. 115-130, 2010. DOI: 10.1128/JCM.00418-10.

[6] Billah, B., King, M.L., Snyder, R.D. and Koehler, A.B., Exponential smoothing model selection for forecasting. International Journal of Forecasting, 22, pp. 239-247, 2006. DOI: 10.1016/j.ijforecast. 2005.08.002.

[7] Syntetos, A.A. and Boylan, J.E., On the bias of information estimates. International Journal of Production Economics, 71(2), pp. 457-466, 2001. DOI: 10.1037/h0026857.

[8] Croston, J.D., Forecasting and stock control for intermittent demands. Journal of Operational Research Society, 23(3), pp. 289-303, 1972. DOI: 10.1057/jors.1972.50.

[9] Xu, Q., Wang, N. and Shi, H., A review of Croston's method for intermittent demand forecasting. Proceedings 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery FSKD, pp. 1456-1460, 2012. DOI: 10.1109/FSKD.2012.6234258.

[10] Syntetos, A.A. and Boylan, J.E., The accuracy of intermittent demand estimates. Internatoinal Journal of Forecasting, 21(2), pp. 303-314, 2005. DOI: 10.1016/j.ijpe.2010.07.005.

[11] Teunter, R.H., Syntetos, A.A. and Babai, M.Z., Intermittent demand: Linking forecasting to inventory obsolescence. European Journal of Operational Reseasrch, 214(3), pp. 606-615, 2011. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.05.018.

[12] Kourentzes, N., On intermittent demand model optimisation and selection. International Journal of Production Economics, 156, pp. 180-190, 2014. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.06.007.

[13] Shale, E.A., Boylan, J.E. and Johnston, F.R., Forecasting for intermittent demand: the estimation of an unbiased average. Journal of the Operational Research Society, 57(5), pp.588-592, 2006. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2602031

[14] Babai, M.Z., Syntetos, A. and Teunter, R., Intermittent demand forecasting: An empirical study on accuracy and the risk of obsolescence. International Journal of Production Economics, 157(1), pp. 212-219, 2014. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.08.019.

[15] Nikolopoulos, K., Syntetos, A., Boylan, J., Petropoulos, F. and Assimakopoulos, V., An Aggregate-Disaggregate Intermittent Demand Approach (ADIDA) to forecasting: An empirical proposition and analysis. Journal of the Operational Research Society, 62(3), pp. 544-554, 2011. DOI: 10.1057/jors.2010.32.

[16] Basheer, I.A. and Hajmeer, M., Artificial neural networks: Fundamentals, computing, design, and application. Journal of Microbiological Methods, 43, pp. 3-31, 2000. DOI: 10.1016/S0167-7012(00)00201-3.

[17] Warner, B. and Misra M., Understanding neural networks as statistical tools. The American Statisticians, [online]. 50(4), pp. 284-293, 1996. [date of reference, August 31th of 2017]. Available at http://www.jstor.org/stable/2684922.

[18] Khashei, M. and Bijari, M., An artificial neural network (p,d,q) model for timeseries forecasting. Expert Systems with Applications, 37, pp. 479-489, 2010. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.05.044.

[19] Hornik, K., Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. Neural Networks, 4(2), pp. 251-257, 1991. DOI: http://doi.org/10,1016/0893-6080(91)90009-T
[20] Guang-Bin H., Learning capability and storage capacity of two-hidden-layer feedforward networks. IEEE Transactions on Neural Networks, 14(2), pp.274-281. 2003. DOI: 10.1109/TNN.2003. 809401.
[21] Peralta, J., Li, X., Gutierrez, G. and Sanchis de Miguel, A., Time series forecasting by evolving artificial neural networks with genetic algorithms, differential evolution and estimation of distribution algorithm. Neural Comput. & Applic., 22(1), pp. 11-20, 2013. DOI: 10.1007/s00521-011-0741-0.
[22] Mitrea, C.A., Lee, C.K. M. and Wu, Z., A comparison between neural networks and traditional forecasting methods: A case study. International Journal of Engineering Business Management, 1, pp. 19-24, 2009. DOI: 10.5772/6777.
[23] De Gooijer, J. and Hyndman, R.J., 25 years of time series forecasting. International Journal of Forecasting, 22(3), pp. 443-473, 2006. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.01.001.
[24] Yadav, R.N., Kalra, P.K. and John, J., Time series prediction with single multiplicative neuron model. Applied Soft Computing Journal, 7, pp. 1157-1163, 2007. DOI: 10.1016/j.asoc.2006.01.003.
[25] Zhang, G.P., Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. Neurocomputing, 50, pp.159-175, 2003. DOI: 10.1016/S0925-2312(01)00702-0.
[26] Wang, W., A neural network model on the forecasting of inventory risk management of spare parts. 2012 International Conference on Information, Technology and Management Science (Icitms 2012), [online]. pp. 649-660, 2012. [date of reference: September 15th of 2016]. Available at: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-34910-2_34\nhttp://link.springer.com/10.1007/978-3-642-34910-2.
[27] Nasiri-Pour, A., Rostami-Tabar, B. and Rahimzadeh, A., A hybrid neural network and traditional approach for forecasting lumpy demand. World Academy of Science. Engineering and Technology, [online]. 40(4), pp. 384-390, 2009. [date of reference: September 20th of 2016]. Available at: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78651581595&partnerID=tZOtx3y1
[28] Yolcu, U., Egrioglu, E. and Aladag, C.H., A new linear & nonlinear artificial neural network model for time series forecasting. Decis Support Systems, 54(3), pp. 1340-1347, 2013. DOI: 10.1016/j.dss.2012.12.006.
[29] Hakan-Aladag, C., Yolcu, U. and Egrioglu, E., A new multiplicative seasonal neural network model based on particle swarm optimization. Neural Process Lett, 37, pp. 251-262, 2013. DOI: 10.1007/s11063-012-9244-y.
[30] Gheyas, I.A. and Smith, L.S., A neural network approach to time series forecasting. Engineering II(1), [online]. pp. 1-5, 2009. [date of reference, september 22th of 2016]. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890407003032.
[31] Zhang, G. and Berardi, V., Time series forecasting with neural network ensembles: An application for exchange rate prediction. Journal of the Operational Researche Society, 52, pp. 652-664, 2001. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601133.
[32] Gutierrez, R.S., Solis, A.O. and Mukhopadhyay, S., Lumpy demand forecasting using neural networks. Int. J. Production Economics, 111(2), pp. 409-420, 2008. DOI: 10.1016/j.ijpe.2007.01.007
[33] Sipper, D. y Bulfin, R., Planeación y control de la producción. Mexico: McGrawHill, 1998.
[34] Igel, C. and Husken, M., Empirical evaluation of the improver Rprop learning algorithms. Neurocomputing, 50, pp. 105-123, 2003. DOI: DOI: 10.1016/S0925-2312(01)00700-7.

R. Santa Cruz R., es Ing. Industrial, MSc. en Ingeniería de Producción y Dr. en Ingeniería de Producción, 1994 de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. Fue profesor de la Universidad Católica UCB y actualmente es profesor adjunto de la Universidad del Estado de Santa Catarina (UDESC), Brasil, donde coordina el Laboratorio de Apoyo a Decisión LABAD. Sus áreas de interés son: métodos cuantitativos aplicados a los sistemas productivos, investigación de operaciones, gestión de operaciones, modelaje y simulación de sistemas.
ORCID: 0000-0003-4175-7299

C. Correa, es Ing. de Producción y Sistemas en 2016 de la Universidad del Estado de Santa Catarina (UDESC), Brasil. Técnica en Calidad de la Facultad de Tecnología Assessoritec. Actualmente desempeña funciones de planeación de la demanda en una Empresa Brasilera de Sistemas de Refrigeración.
ORCID: 0000-0001-6339-8245



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
de Sistemas e Informática

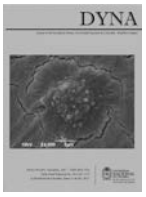
Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas
Especialización en Mercados de Energía
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: acsei_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5365

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Comparing energy consumption for rail transit routes through Symmetric Vertical Sinusoid Alignments (SVSA), and applying artificial neural networks. A case study of Metro Valencia (Spain)

Juan Diego Pineda-Jaramillo, Pablo Salvador-Zuriaga & Ricardo Insa-Franco

Department of Transport Engineering and Infrastructure, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain. jdpineda@unal.edu.co, pabsalzu@ter.upv.es, rinsa@tra.upv.es

Received: May 25th, 2017. Received in revised form: August 23th, 2017 Accepted: September 14th, 2017

Abstract
This paper presents the training of an artificial neural network using consumption data measured in the metropolitan network of Valencia, Spain, to estimate the energy consumption of a metro system. After calibration and validation of the neural network, the results obtained show that it can be used to predict energy consumption with high accuracy. Once fully trained, the neural network is used for testing hypothetical operational scenarios aimed to reduce the energy consumption of a metro system. These operational scenarios include different vertical alignments that prove that Symmetric Vertical Sinusoid Alignments (SVSA) can reduce energy consumption by 18.41% in contrast to a flat (0% gradient) alignment.

Keywords: Symmetric Vertical Sinusoid Alignments (SVSA); gradient; energy consumption; artificial neural networks; metro system.

Comparando el consumo energético para rutas de tránsito ferroviario mediante Alineamientos Verticales Sinusoidales Simétricos (SVSA), y aplicando redes neuronales artificiales. Un estudio de caso de MetroValencia (España)

Resumen
Este artículo presenta el entrenamiento de una red neuronal artificial usando el consumo energético medido en la red metropolitana de Valencia, España, para estimar el consumo energético de un sistema metro. Después de la calibración y validación de la red neuronal, los resultados obtenidos muestran que esta puede ser utilizada para predecir el consumo energético con una gran precisión. Una vez entrenada, la red neuronal es utilizada para probar diferentes escenarios de operación hipotéticos con el objetivo de reducir el consumo energético de un sistema metro. Estos escenarios de operación incluyen diferentes trazados verticales que prueban que los Alineamientos Verticales Sinusoidales Simétricos (SVSA, por sus siglas en inglés) pueden reducir el consumo energético en un 18.41 % en contraste con un alineamiento plano (pendiente del 0%).

Palabras clave: Alineamientos Verticales Sinusoidales Simétricos (SVSA, por sus siglas en inglés); pendiente; consumo energético; redes neuronales artificiales; sistema metro.

1. Introduction

There is no doubt that the transport sector contributes so vastly to total energy consumption that according to the International Energy Agency [1], the world's overall energy consumption in 2013 was a whopping 2.56 Billion Tonnes of Oil Equivalent (Mtoe) - and 27.6% of it is from the transport sector.

Railways are generally much more efficient in terms of energy consumption than road transport systems in transporting both freight and passengers [2-4]. Despite this advantage, it is still necessary to reduce its energy

How to cite: Pineda-Jaramillo, J.D., Salvador-Zuriaga, P. and Insa-Franco, R., Comparing energy consumption for rail transit routes through Symmetric Vertical Sinusoid Alignments (SVSA), and applying artificial neural networks. A case study of MetroValencia (Spain) DYNA, 84(203), pp. 17-23, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

consumption to improve competitiveness and contribute to a more sustainable world. For this reason, many strategies are nowadays being implemented to reduce energy consumption in railways and they include strategies that involve line design, rolling stock and operations [5].

To optimize many aspects of this mega transport system, some researchers have modelled electric train energy consumption [6], while other authors have estimated its energy consumption and explored improvements in rail transport through track layout optimisation using Geographic Information Systems (GIS) [6,7]. There are also other authors that have used genetic algorithms to optimise different aspects of the said transport system, such as its track alignments, operators, user costs for rail operation [6-8] and crew scheduling [9,10]. There are also methods created that aim to optimise travel time and coasting points by using models based on artificial neural networks and genetic algorithms [11]. These methods, however, do not include gradient or real time measured energy consumption as data.

Kim and Schonfeld [12] introduced the Dipped Vertical Alignment (DVA) concept for urban rail systems. They considered Symmetric Vertical Sinusoid Alignment (SVSA) profiles (Fig. 1) which is a function of the total curve length *S* and the maximum depth *d* halfway between two stations having the same elevation. There are three sections in the SVSA between two stations:

- Section 1: The train must accelerate upon leaving the station, and in this case, it will find a slope and, using gravity, the train will reach an adequate rate of acceleration easier than that in a flat alignment. Here, acceleration and slope resistances are reduced - which leads to a reduction in the power requirement.
- Section 2: The train reaches its cruising speed (optimum speed between two points).
- Section 3: The train is coasting, and the existence of an uphill section in the part where it must decelerate to stop means requiring less power to brake, which in turn, is equivalent to less energy dissipation. This translates to energy advantage when a station is located at a relatively higher elevation than adjacent sections.

They compared the alignment below to flat alignments and identified its significant potential benefits in energy consumption. Their equations for the DVA are shown in eq. (1) [12].

$$\begin{aligned} y_1 &= -\frac{12\delta}{S^2}x^2 && For\ 0 \le x \le \frac{S}{6} \\ y_2 &= \frac{6\delta}{S^2}x^2 - \frac{6\delta}{S}x + \frac{\delta}{2} && For\ \frac{S}{6} \le x \le \frac{5S}{6} \\ y_3 &= -\frac{12\delta}{S^2}x^2 - \frac{24\delta}{S}x - 12\delta && For\ \frac{5S}{6} \le x \le S \end{aligned} \quad (1)$$

where:

- y_1, y_2, y_3: Difference in elevation relative to the initial station [m].
- x: Horizontal distance from the center of the initial station [m].
- δ: Maximum depth at the intermediate of the two stations [m].
- S: Total length between the two stations [m].

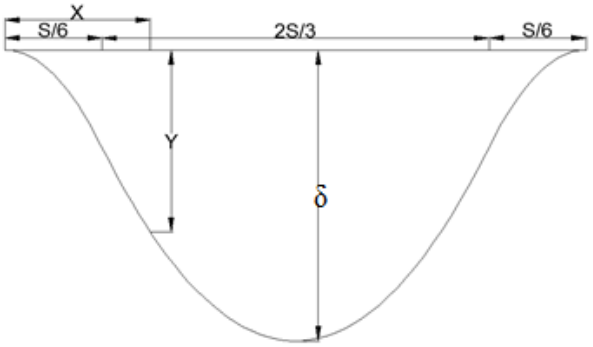


Figure 1. SVSA at the same station elevations
Source: Adapted from [12]

It is important to note that there is no trace of studies of this nature - one with a certain capacity of validation for a model with real data of operation in a metropolitan line, and a posterior application of energy consumption saving methods for railways.

This paper thus aims to develop, train and validate a neural network to simulate the energy consumption of a metropolitan line using measured empirical data, and use the neural network to predict the energy consumption at each instant. Finally, the neural network will be used to compare different vertical alignments to improve or reduce energy consumption between two stations with the same elevation.

2. Methodology

2.1. Data gathering and processing

In order to check the energy consumption of one train, three MSAVDC meter devices, manufactured by Mors-Smitt, were installed in the front car of the train: one in the pantograph (circuit breaker), another in the auxiliary converter input, and the third in the braking resistors. These devices will allow the measurement of not only the overall train energy consumption in real time, but also the energy consumed by each subsystem: traction, auxiliary devices and rheostatic brake.

The train's speed was measured by a Knorr sensor (model BB0457681100), fed by a phonic wheel on one axis of another car of the train.

After verifying the correct functionality of all the devices, measurements were made on August 4th, 2014 with passengers on board. Twelve trips were measured in line 5 of MetroValencia, between Marítim-Serrería and

Alameda stations; six trips towards Alameda and six trips towards Marítim-Serrería.

2.2 Neural networks

The structure chosen to accomplish this objective is a two-layer *feed-forward* neural network because it is a common and a tested scheme, with great ability to adjust functions [14,15]. In addition, these networks are known by its classification in layers and connections between the units strictly forward, and do not form cycles or loops in the

network. *Feed-forward* neural networks are the most commonly used in practical applications that use neural networks, obtaining very satisfactory results, fundamentally as pattern classifiers and function estimators.

The first layer, called the *hidden layer*, has a number of neurons that it is necessary to define. The second layer (*the output layer*) has a single neuron with a linear transfer function. Eq. (2) shows the formula of the network:

$$O_k = \tilde{g}(\sum_{j=0}^{M} w2_{kj} \cdot g(\sum_{i=0}^{N} w_{ji} \cdot I_i)) \qquad (2)$$

where O_k is the network output, M is the number of output elements, I_i is the input data, N is the number of input variables, w_{ji} is the synaptic weight of the first layer and $w2_{kj}$ is the synaptic weight of the second layer. The synaptic weight w_{ji}, for example, defines the strength of a synaptic connection between two neurons, the presynaptic neuron j and the postsynaptic neuron i. This structure can identify non-linear relations between *input* and *output* data [14] using the Log-Sigmoid function as a transfer function between the hidden layer and the output layer.

The training method used is called the *Back-Propagation*, where the network is evaluated, the results are checked based on certain criteria, and the synaptic weights are changed in an iterative loop [14]. The chosen calibration criterion is the minimization of the Mean Square Error (MSE) between the network *output* and the *target* data, which is verified by deriving the MSE with respect to the network synaptic weights. The specific training algorithm used is called the *Levenberg-Marquardt* algorithm, which is very efficient and widely checked [14].

The neural network presented in this paper uses speed, acceleration, gradient and traction effort as *input* data and measured empirical energy consumption as *target* data. These input data provide good accuracy, thus making it unnecessary to consider another input data to calibrate on energy consumption. Once trained, the neural network may predict the train's energy consumption (*output*) data with high accuracy, as proven when compared to the measured empirical data (*target data*).

2.3. Simulation model development

After training the neural network, hypothetical vertical alignments are specified with their respective speed profile, considering the optimal indications for efficient driving between two stations [14-16]:

- To accelerate to maximum acceleration, to maintain maximum speed, and to reduce speed in coasting before each of the points in which it is necessary to reduce speed.
- The same strategy as above, but with the difference of the coasting not occurring until minimum speed (or until a stop), but until a greater speed to this one below which the service brake is applied to reduce speed.
- Accelerating to the maximum acceleration to recover the maximum speed and so on.

Once the hypothetical vertical alignments have been determined, the trained neural network is applied to achieve the energy consumption (*output*) verifying them in each alignment, comparing them and obtaining the vertical alignment with the lowest energy consumption. It is necessary to clarify that speed optimization was not considered in this paper, but for each alignment, it was verified that the travel time between both stations were the same.

The following assumptions used by Yeh [17] are considered in this simulation:

- The vertical track profile is symmetrical regarding to a central axis.
- Parabolic curvatures are applied to the vertical curves while the gradient cannot exceed the maximum climbing ability of the train.
- Horizontal curvatures are negligible for this analysis.
- A concentrated mass is used to represent trains in motion.
- A train accelerates to its full power unless it exceeds the comfort-limited acceleration.
- The braking system can provide the maximum allowable comfort-limited deceleration rate.

3. Case study

3.1. Introduction

MetroValencia has six subway lines and three tram lines. It also has 132 stations with a total length of 146.8 km and has 121 trains [18]. Trips along line 5 were analysed, between Marítim-Serrería and Alameda stations. As for the traction and power systems of the network, there is only a single input voltage to the substations with a magnitude of 20 kV AC. There are, however, two different output voltages: 1,500 V DC, (used in all six subway lines) and 750 V DC (used in all three tram lines), with an annual energy consumption of around 64.4 GWh and 18.1 GWh, respectively. This energy is consumed by all elements and systems of MetroValencia. Considering the energy consumption of each network component, 70% of the overall energy goes to traction (53 GWh) while 24% goes to stations. Other power consumptions from the remaining elements are negligible [19].

3.2. Input data

Four variables were chosen as *input* data (gradient, speed, traction effort and acceleration). During the neural network training, all *input* variables and their combinations were tested until the one that provided the best fit with the *target* data was chosen.

Focusing on Line 5 of MetroValencia, particularly between the chosen stations, it is important to consider that there are three stations in between them, namely: Ayora, Amistat and Aragón. They have a total length of 2,720 m and the chosen route has four stops. There is a maximum gradient of 2% in this route. Fig. 2 shows a diagram of the vertical track layout of the studied route, indicating the gradient profile along the five stations of Metro Valencia's line 5.

Speed was measured using an odometer placed in one of the wheels of the monitored train. Acceleration is directly derived from the speed. Fig. 3 shows these two variables of the first trip.

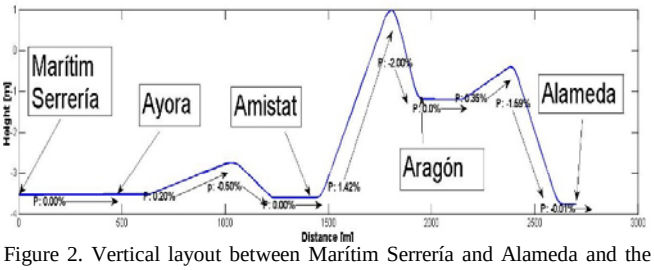


Figure 2. Vertical layout between Marítim Serrería and Alameda and the stations (stops) in between them.
Source: The authors

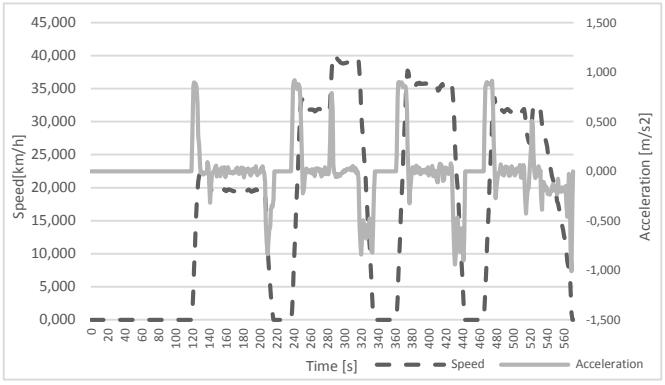


Figure 3. Speed (blue) and acceleration (orange) of the first trip between Marítim-Serrería and Alameda
Source: The authors

3.3. Target data

The monitored train was a Metro Series 4300 (Vossloh) with 4 cars, a maximum speed of 80 km/h, a nominal tension of 1,500 V DC and a power of 1,480 kW.

The energy consumption in the pantograph (measured in the circuit breaker) was monitored real time while the train performed conventional services with passengers on board. The measured energy consumption was used as *target* data.

The measuring devices provide the energy consumption measured in the circuit breaker of the train every second, as shown in Fig. 4. The Fig. 4 represents the training *target* of the neural network on the first trip.

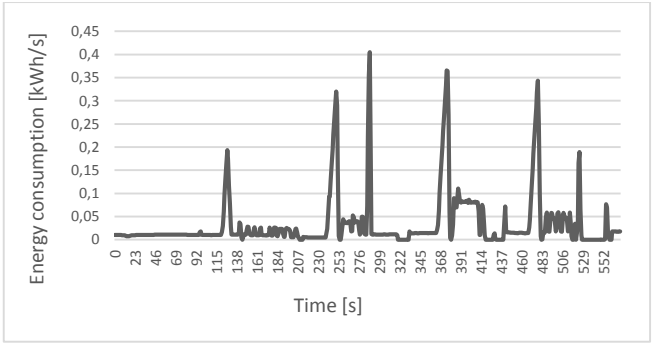


Figure 4. Example of the energy consumption measured in the circuit breaker on the first trip between Marítim-Serrería – Alameda stations
Source: The authors

4. Results and discussion

4.1. Training of the Artificial Neural Network

Two different criteria were used to assess the performance of the network and to decide whether its training was successful. The first of which was the Pearson correlation coefficient (R) between the neural network *output* (modelled energy consumption) and the *target* data (measured energy consumption), which needs to be equal or greater than 90% for all the three subsets (training, validation and testing).

The second criterion was the relative Mean Square Error (rMSE), which is defined as follows in eq. (3):

$$rMSE = \frac{MSE}{Var(Q)} \leq 0.2 \qquad (3)$$

where MSE is the Mean Square Error, and Var(Q) is the variance of the measured consumption data (*target*). The rMSE needs to be lower than 20% of the variance of the data for all three subsets (training, validation and testing) [20], in order to control the dependence of the neural network to the specific data used for training. The process of the creation, training, and validation of the neural network was performed using the Neural Fitting Tool, from MATLAB R2014a (The MathWorks, Inc.)

Different tests were performed by combining the four input variables previously defined so as to identify which fits the energy consumption data better. If the input variables are speed, acceleration, gradient and traction effort, the neural network satisfies all the criteria; with the rMSE being lower than 20% and the R coefficient being greater than 90% [21]. Those input variables were, therefore, chosen for the analysis due its significant impact on energy consumption.

The results (Fig. 5) show an average measured energy consumption of 7.29 kWh per km, while the network estimated an energy consumption of 7.11 kWh per km, which has a small deviation of 0.176 kWh per km (2.42%). Every trip was the same: each with four stops between the first station and the last, and in terms of train load.

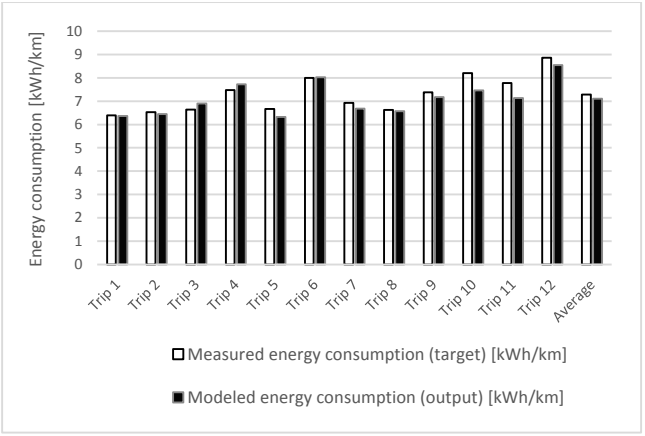


Figure 5. Energy consumption by trip
Source: The authors

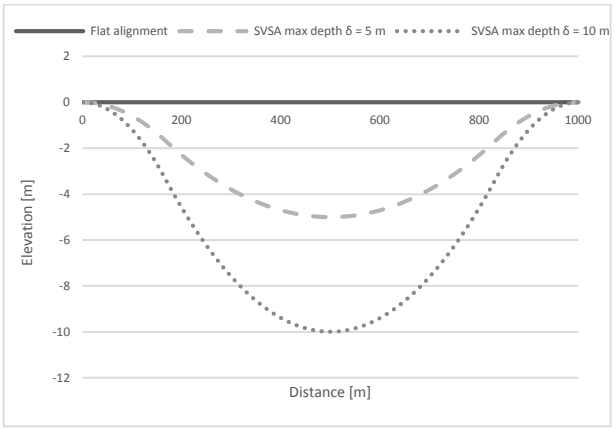


Figure 6. Hypothetical scenarios of vertical alignments between two stations oft the same elevation
Source: The authors

4.2. Application of artificial neural networks on hypothetical vertical alignments

For applying the trained artificial neural network on alignments, three hypothetical vertical alignments scenarios between two stations with a length of 1,000 m were considered: the first scenario is a flat alignment; the second is the SVSA profile with a maximum depth *d* halfway between two stations of δ = 5 m (0.5% of total length) having the same elevation. The last is the SVSA profile with a maximum depth *d* halfway between two stations of δ = 10 m (1.0% of total length) having the same elevation. Fig. 6 shows the three hypothetical scenarios.

After which, the trained neural network was implemented to estimate the energy consumption for every case using the *input* variables for each hypothetical scenario.

The results show a total energy consumption of 5.81 kWh per km for the flat alignment between two stations, 4.74 kWh per km for the SVSA with a maximum depth of δ = 5 m between two stations, and 4.94 kWh per km for the SVSA with a maximum depth of δ = 10 m between two stations. It was observed that the SVSA with a maximum depth of δ = 5 m between two stations recorded the lowest energy consumption, reducing it by 18.41% in comparison to the flat alignment (Fig. 7). Each trip had a duration of 86 seconds, which did not affect the travel time element of one trip from the other.

Fig. 8 shows the energy consumption estimated by the neural network for the three cases in every location in the alignment.

4.3. Discussion

Fig.5 shows that the network adjusts the energy consumption, measured in the circuit breaker, reasonably well, reproducing the peaks from traction and valleys, where the train is coasting. However, the network omitted small oscillations in consumption, and indeed shows small oscillations and negative peaks that do not correspond to the registration. This shows that there is still room to further refine the training of the network, possibly with a post-processing of the output.

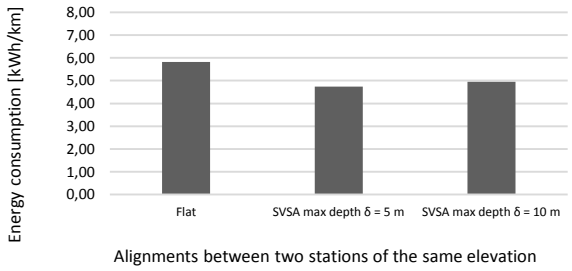


Figure 7. Total energy consumption in the hypothetical vertical alignments
Source: The authors

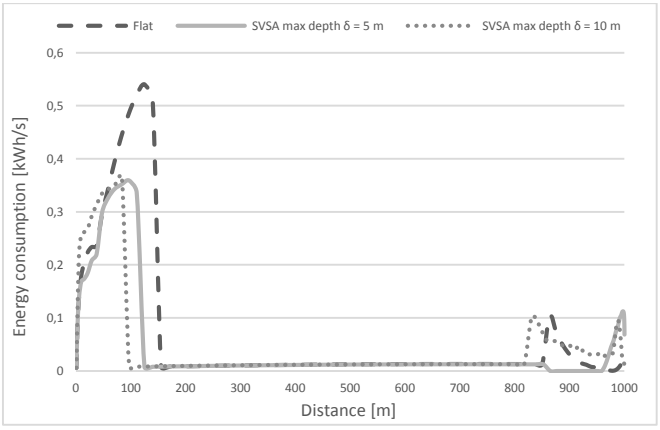


Figure 8. Energy consumption in the hypothetical alignments in every step
Source: The authors

In any case, the trained network as shown above, with four input variables, provides a good estimation of the energy consumption of the train, and since it is always within the range considered for every variable, the network could be used to test other alternatives like other hypothetical vertical alignments so as to reduce energy consumption and improve efficiency.

The results of applying the neural network on the hypothetical vertical alignments scenarios between two stations oft the same elevation, with a length of 1,000 m, show that the SVSA with a maximum depth of δ = 5 m between two stations yields the lowest energy consumption, reducing it by 18.41% as compared to a flat alignment. This technical advantage is facilitated by gravity, both as the train accelerates at the first station and as it decelerates at the steep final station.

As for the flat alignment, Fig. 8 shows a peak of energy consumption at the beginning of the route when the train accelerates to reach cruising speed. Then, when the train coasts, energy consumption is reduced. Finally, when service brake is applied, a traction energy consumption of almost zero results.

As for both SVSA alignments, Fig. 8 shows a peak of energy consumption at the beginning of the route when the train accelerates to reach cruising speed. Then, when the train coasts, energy consumption is reduced. Later, while the train

is coasting, it arrives to a slope which gradually increases energy consumption. Finally, there is a point where energy consumption presents another peak just before service brake is applied to stop at the next station.

5. Conclusions

This paper describes the training and validation of a neural network to model the energy consumption of a metro line in Valencia's metro network operated by Metro Valencia. Actual energy consumption was measured using a monitored train operating normally along line 5 of the metro network. This data was analysed and used to train and validate the neural network. Four *input* variables were chosen: speed, acceleration, gradient and traction effort. These combined *input* variables predict energy consumption with high accuracy, proving that just one variable cannot explain this phenomenon by itself.

Total energy consumption shows an average measured energy consumption of 7.29 kWh per km, while the trained neural network estimates an energy consumption of 7.11 kWh per km, having a small deviation of 0.176 kWh per km (just 2.42%).

A fully trained neural network is a useful tool in studying the energy consumption of the metro system. The advantages of this method lie in its adjustment of speed and simulation, and, particularly, in the fact that the neural network may function as a virtual laboratory where it is possible to test hypothetical scenarios, modify variables such as track layout and train driving style in order to reduce a train's energy consumption.

Three hypothetical vertical alignments scenarios between two stations were considered for the application of the trained artificial neural network, the first scenario was a flat alignment; the second was the SVSA profile with a maximum depth *d* halfway between two stations of $\delta = 5$ m having the same elevation, the third was the SVSA profile with a maximum depth *d* halfway between two stations of $\delta = 10$ m having the same elevation. After which, the trained neural network was implemented to estimate the energy consumption for every case using the *input* variables for each scenario.

The model results show an energy consumption of 5.81 kWh per km for the flat alignment between two stations, 4.74 kWh per km for the SVSA with a maximum depth of $\delta = 5$ m between two stations, and 4.94 kWh per km for the SVSA with a maximum depth of $\delta = 10$ m between two stations. Results show that the SVSA with a maximum depth of $\delta = 5$ m between two stations yielded the lowest energy consumption, reducing it by 18.41% as compared to the one with flat alignment.

These results highlight the importance of designing energetically efficient geometric alignments. As this strategy already allows obtaining significant energy consumption reduction, it can be accompanied by other strategies such as economic driving to come up with a better and efficient transport system in terms of energy consumption.

The next step of research will involve an analysis on how the model can be improved if energy recuperation is included, so as to use it to test hypothetical operation and construction scenarios, with the aim of minimizing the energy consumption of the system.

References

[1] International Energy Agency., Key World Energy STATISTICS 2015. [Online]. [Accessed 13 Junio 2016]. Available at: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2015.html.

[2] García-Álvarez, A., High speed, energy consumption and emissions. Study and research group for railway energy and emissions, Madrid, 2010.

[3] Kim, K. and Chien, S.I., Optimal train operation for minimum energy consumption considering schedule adherence. TRB Anual Meeting Compendium. Transportation Research Board, 2010.

[4] Kosinski, A. Schipper, L. and Deakin, E., Analysis of high-speed rail's potential to reduce CO2 emissions from transportation in the United States. TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board, 2011.

[5] García-Álvarez, A., High speed, energy consumption and emissions. Study and Research Group for Railway Energy and Emissions, Madrid, 2010.

[6] Wang J. and Rakha, H., Electric train energy consumption modeling. Journal of Applied Energy, 193, pp. 346-355, 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.058, DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.087

[7] Lai, X. and P. Schonfeld, P., Optimizing rail transit alignment connecting several major stations. TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board, 2010.

[8] Jha, M.K., Schonfeld, P. and Samanta, S., Optimizing rail transit routes with genetic algorithms and geographic information systems. J. Urban Plann. Dev., 133(3), pp. 161-171, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9488(2007)133:3(161)

[9] Samanta, S. and Jha, M.K., Modeling a rail transit alignment considering different objectives. Transportation Research: Part A, 45(1), pp. 31-45, 2011. DOI: 10.1016/j.tra.2010.09.001

[10] Dundar, S. and Sahin, I., A genetic algorithm solution for train scheduling. TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board, 2011.

[11] Liu, M., Haghani, A. and Toobaie, S., A genetic Algorithm-based column generation approach to passenger rail crew scheduling. TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board, 2010. DOI: 10.3141/2159-05

[12] Acýkbas, S. and Soylemez, M., Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms. IET Electric Power Applications, 2(3), pp. 172-182, 2008. DOI: 10.1049/iet-epa:20070381

[13] Kim, D.N. and Schonfeld, P., Benefits of dipped vertical alignment for rail transit routes. Journal of Transportation Engineering, 123(1), pp. 20-27, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1997)123:1(20)

[14] Schmidhuber, J., Deep learning in neural networks: An overview, Journal of Neural Networks, 61, pp. 85-117, 2015. DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003

[15] Insa-Franco, R., Salvador, P., Villalba, I., Martínez, P. García, C., Pineda-Jaramillo, J.D. and Sánchez, R., Monitorización, modelización y simulación del consumo energético en el ferrocarril, Valencia, Universitat Politècnica de València, 2016. Availablemat: https://riunet.upv.es/handle/10251/79338

[16] García-Álvarez, A., Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril, Madrid, 2011.

[17] Yeh, S., Integrated analysis of vertical alignment and speed profiles for rail transit routes. Maryland, 2003.

[18] MetroValencia, "www.metrovalencia.es," [Online]. [Accessed 15 October 2015]. Available at: http://www.metrovalencia.es/descargas/pdf/Plano%20de%20red_2011_1200x1760_ok.pdf.

[19] Villalba-Sanchis, I., Estudio y optimización de la eficiencia energética en la conducción de trenes metropolitanos de la ciudad de Valencia, Msc Theses, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2015.

[20] Molines, J., Stability of crown walls of cube and cubipod armoured mound breakwaters. PIANC E-Magazine, 144, pp. 29-44, 2011.

[21] Pineda-Jaramillo, J.D., Insa, R. and Martínez, P., Modelling the energy consumption of trains applying neural networks. Journal of Rail and Rapid Transit, 2017. First Published February 21, 2017. DOI: 10.1177%2F0954409717694522

J.D. Pineda-Jaramillo, is BSc. Eng. in Civil Engineering in 2011, the MSc. degree in Infrastructure and Transportation Systems in 2014, both from the Universidad Nacional de Colombia, Medellin, Colombia; and the PhD. degree in Civil Engineering in 2017 from the Polytechnic University of Valencia, Valencia, Spain. His research interests include: transportation planning; transportation forecasting; simulation and modeling in railway engineering; and optimization using metaheuristics.
ORCID: 0000-0002-4657-7521

P. Salvador-Zuriaga, is MSc. in Civil Engineering (2008) and PhD. in Civil Engineering (2014), both at the Polytechnic University of Valencia. In 2008 carried out his Master Thesis entitled "Potential energy-saving strategies for railway operations", at the Vienna University of Technology, conducted by Dr. Ing Bernhard Rüger and Univ. Prof. Norbert Östermann. In 2009 took a specialization course on Railway Engineering and Transportation, and since that year works as a researcher at the Institute for Transport and Territory at the Polytechnic University of Valencia. He has been involved in different research projects under the guidance of PhD. Ricardo Insa in some railway-related topics such as track monitoring, dynamic train-track interaction, ground-borne vibration and energy optimisation in railway operations
ORCID: 0000-0002-7824-0368

R. Insa-Franco, is MSc. in Civil Engineering (1982) and PhD. in Civil Engineering (1992), both at the Polytechnic University of Valencia. Since 1987 teaches at different universities in the area of railway engineering. In 1982 began its professional career in different private companies, all of them in the railway sector. Since then, he has been devoted to the design, construction and management of railway infrastructure. He has acted as a head of work, head of group of works and manager of large railway works and projects in Europe, Asia and America. He has been the main researcher in different research projects funded by the Spanish National Government and the Regional Government, as well as some contracts from private companies, all of them regarding the assessment on track maintenance, track structural design and energy efficiency in railway operations.
ORCID: 0000-0002-6655-4458

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

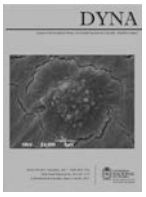
Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Carbon nanotube dispersion for *in-vitro* applications

Claudia Espinosa[a], Isabel Cristina Ortiz-Trujillo[a], Jesús Antonio Carlos-Cornelio[a], Raúl Darío Zapata-Hernández[b] & Lina Marcela Hoyos-Palacio[a]

[a] *Grupo de Investigación Biología de Sistemas, Facultad de Medicina, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín Colombia espinosa.claudia.e@gmail.com, isabel.ortiz@upb.edu.co, iqcornelio@gmail.com, lina.hoyos@upb.edu.co*
[b] *Grupo de Microbiología del Suelo, Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. rdzapata@unal.edu.co*

Received: Abril 19th, de 2017. Received in revised form: August 23th, 2017. Accepted: September 18th, 2017

Abstract
Carbon nanotubes (CNTs) have gained popularity due to their many characteristics which make them the promising material for biomedical applications. A major challenge when working with CNTs is the difficulty to distribute them evenly throughout liquids. This research is a comparative analysis of the dispersion of multi wall CNTs (MWCNTs) in different liquid media (distilled water, ultrapure water of type I [Milli-Q], ethanol, dimethyl sulfoxide [DMSO] and cell culture medium [RPMI-1640]) by using two different sonication techniques (probe-type sonication and ultrasonic bath sonication) as well as determining the effect of sterilization in the presence and absence of fluid before dispersion. The results indicate that the best method to achieve a CNTs dispersion is to use a probe-type sonicator as well as to sterilize the CNTs samples in the presence of fluid.

Keywords: Carbon Nanotube; Dispersion; Ultrasound.

Dispersión de nanotubos de carbono para aplicaciones *in-vitro*

Resumen
Los nanotubos de carbono (CNTs) han atraído un enorme interés debido a sus muchas características que los convierten en un material prometedor para aplicaciones biomedicas. Un desafío importante cuando se trabaja con CNTs es la dificultad de dispersarlos homogéneamente en un fluido. Esta investigación es un análisis comparativo de la dispersión de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs) en diferentes fluidos (agua destilada, agua ultrapura de tipo I [Milli-Q], etanol, dimetilsulfóxido [DMSO] y medio de cultivo celular [RPMI-1640]). Utilizando dos diferentes técnicas de sonicación (sonicación con lanza ultrasónica y sonicación ultrasónica de baño), así como la determinación del efecto de la esterilización en presencia y ausencia de fluido antes de la dispersión. Los resultados indican que el mejor método de dispersión de los CNTs es usando un sonicador tipo lanza y esterilizarlos en presencia de fluido.

Palabras clave: Nanotubos de Carbono; Dispersión; Ultrasonido.

1. Introduction

Sumio Iijima accidentally discovered CNTs in 1991 [1]; ever since his discovery new approaches for CNTs synthesis and applications have been explored. Their implementation in many areas has augmented due in part to their physico-chemical characteristics which make them a novel material with a wide range of applications [2,3]. The possibility of dispersing CNTs in fluids makes them promising candidates for their implementation in different systems due to their many properties. However, effective dispersants and mechanical mixing methods are necessary to produce uniform dispersions and stable over long periods of time. Factors that affect the rheology of nanotube dispersions include the chemistry of the continuous phase (the base fluid), nanoparticle loading throughout the fluid volume, the average aspect ratio and surface chemistry of the nanoparticles (mechanical mixing methods and chemical treatments) and the dispersants employed [4].

Temperature influences the rheological properties of the base fluid, but can also affect the stability of the CNTs dispersions be it by changes in the dispersant conformation in the liquid or by changes in the interactions between the dispersant and the solid surface of the CNTs. Therefore, the

How to cite: Espinosa, C., Ortiz-Trujillo, I.C., Carlos-Cornelio J.A., Zapata-Hernández, R.D. and Hoyos-Palacio, L.M., Carbon nanotube dispersion for in-vitro applications DYNA, 84(203), pp. 24-30, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

rheological properties of the CNTs dispersions are crucial for their application in different systems [5]. CNTs tend to form bundles and aggregates in the dry form as well as when they are suspended in a liquid, CNT agglomeration can be attributed to their morphology, high aspect ratio, van der Waal's forces, π-π stacking and hydrophobic interaction between the tubes; such molecular forces are influenced by the chirality and surface curvature of the CNTs hence increasing the dispersion difficulty [6,7]. Agglomeration of CNTs interfere with some of the CNTs properties such as size distribution, surface to volume ratio as well as the surface reactivity, which could become an obstacle in the application of CNTs in the biological field. Uniform and reproducible dispersions of CNTs in liquid phases could be challenging to accomplish [8-12] but are also crucial when it comes to biological applications of nanoparticles, failure to disperse CNTs could account for inaccurate *in vitro* interpretation of their effects [13,14].

The use of CNTs in the field of medicine and other industries has gained popularity due to their physicochemical properties. However, exposure to nano-engineered materials is of great concern due to the potential harm they pose on the environment and the human body. Several researchers have emphasized the importance of studying the adverse effects of nanomaterials on the environment and biological tissues. Extensive reviews have provided a better explanation of the many factors behind the nanotoxicology of engineered nanomaterials [15,16]. Physicochemical properties of nanoparticles such as size, chemical composition and surface structure exhibit adverse biological effects at the cellular level. Biological alterations such as genotoxicity and immunogenic changes are attributed to engineered nanoparticles; therefore, new approaches such as computer simulation are currently being explored to decipher and help understand the interaction of CNTs with the cell [17].

This work evaluated the dispersion of CNTs in several fluids (distilled water, ultrapure water of type I [Milli-Q], ethanol, dimethyl sulfoxide (DMSO) and cell culture medium [RPMI-1640]) at concentrations ranging from 0.01 to 0.1 mg/mL. Pristine and Nitrogen doped (N-doped) CNTs were used to compare the dispersion state with respect to each fluid tested, in addition turbidity tests were performed to the different dispersions in order to determine the amount of CNTs suspended in the fluid.

2. Materials and methods

2.1. Carbon nanotube synthesis

Carbon nanotubes employed in this research were synthesized by chemical vapor deposition (CVD) in the Synthesis and Special Processes Laboratory at Universidad Pontificia Bolivariana. The catalyst used was a mixture of Co_2O_4+Fe_2O_3 (40-10%) [18]. Both pristine and N-doped CNTs tested had an average wall number between one and ten. The purification process of the CNTs samples was done by microfiltration with 10% hydrofluoric acid and hydrochloric acid [1M] resulting in a purity >95%. Characterization was achieved by micro-Raman with a confocal Horiba Jobin Yvon, high spectra resolution analytical Raman microscope Model LabRAM HR at a confocal distance of 800 mm, Laser spot size of 1 to 300 mm, CCD detector with a resolution of 1024x256 pixels, optimized spectral range of 400-1100 nm and diffraction gratings of 1800 and 600 lines/m. The scanning electron microscope (SEM) used was a JEOL JSM-6490 LV as well as a FEI Nova NanoSEM 200 to verify the vibrational features and structure of the CNTs.

2.2. Carbon nanotube dispersion in different fluids

CNTs were dispersed in distilled water, ultrapure water of type I (Milli-Q) it was obtained through Synergy Water Purification System de Millipore Sigma, ethanol (absolute for analysis EMSURE®), dimethyl-sulfoxide (DMSO) for analysis EMSURE® with a purity of ≥ 99.9 % and cell culture medium (RPMI-1640 with L-glutamine). The dispersion process was achieved in the following manner: 1mg of the CNTs sample (either pristine or N-doped) was mixed with 10mL of fluid, dispersion was achieved by using a 130-watt Cole-Parmer ultrasonic processor at amplitude of 50% during 2 minutes and 30 second pulsations. Sonication time, frequency and choice of equipment was determined based on the results reported by Hilding et al. [19]. Serial dilutions ranging from 0.01mg/mL to 0.1mg/mL with a dilution factor of 0.01 were prepared from the stock dispersion (0.1mg/mL) of the pristine and the N-doped CNTs samples. Turbidity measurements were taken with a Multiskan-GO Microplate Spectrophotometer from Thermo Scientific, in order to determine an optimal base fluid for dispersing the CNTs. Turbidity measurements were taken at 692nm for all fluids tested, after determining a no absorbance reading for the cell culture medium RPMI-1640.

2.3. Probe-type vs ultrasonic bath sonicator

After determining the most suitable liquid for the dispersion of CNTs based on the results obtained from the turbidity tests, the effectiveness and efficiency of two sonication techniques (probe-type and ultrasonic bath) were evaluated. The Cole Parmer Ultrasonic Processor Model CPX 130, 20 kHz ultrasonic frequency was used to sonicate the samples by immersing the probe in the sample and sonicating at an amplitude of 50% during 2 minutes and 30 second. The Elmasonic Ultrasonic Bath Model E30H, 37 kHz ultrasonic frequency was used to sonicate the samples which were placed in a sealed container and sonicated during 2 minutes. Turbidity measurements were performed with a Multiskan-GO Microplate Spectrophotometer from Thermo Scientific at 692nm.

2.4. CNT sterilization in the presence and absence of fluid

Pristine and N-doped CNTs were autoclaved in the presence and absence of cell culture medium RPMI-1640 prior to dispersing them either by probe-type or ultrasonic bath sonication. The CNTs samples were autoclaved in a Yamato Scientific America Series SM52, 1mg of CNTs was place in a glass bottle and covered with a rubber stopper, while in a different glass bottle 1mg of CNTs was mixed with

10 mL cell culture medium RPMI-1640. The samples were sterilized during 15 minutes at 121ºC, and let to cool off during 24 hours, then 10 mL of RPMI-1640 were added to the sample autoclaved in the absence of liquid. Dispersion was achieved using the probe-type sonicator and ultrasonic bath sonicator for comparison reasons. The stock dispersions were used to prepare serial dilutions ranging from 0.01-0.1mg/mL, turbidity measures were taken at 692nm during five different moments with a time interval of 10 minutes over a 40-minute period.

3. Results and discussion

3.1. CNTs synthesis

Fig. 1 shows SEM micrographs of CNTs. The high productivity obtained through the use of the catalyst can be observed qualitatively. Fig. 1b shows the carbon nanotubes after the purification process grown from the catalyst mentioned in section 2.1.

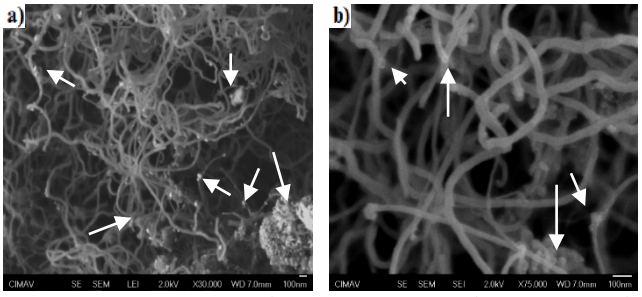


Figure 1. SEM micrographs of CNTs a) prior to purification, and b) after purification.
Source: The authors

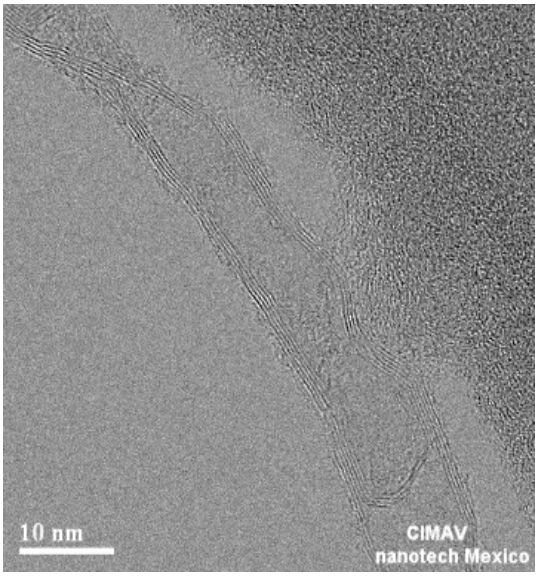


Figure 2. TEM micrograph of multi walled CNTs grown from Co. Average wall number ranging between 1 and 10 walls.
Source: The authors

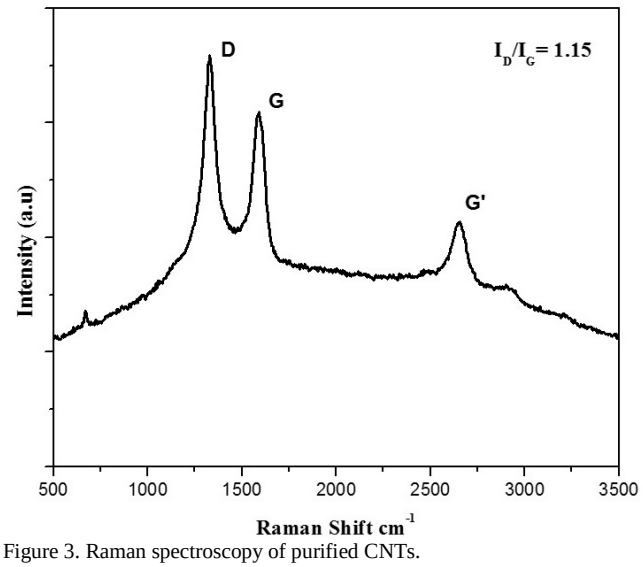


Figure 3. Raman spectroscopy of purified CNTs.
Source: The authors

The TEM micrograph corresponding to Fig. 2 shows CNTs from a different perspective, the micrograph shows evidence of the number of walls obtained by the synthesis method chosen. The average number of walls observed is between 1 and 10. The inner diameter is about 6.5 nm and the outer diameter corresponds to 8 nm; it may also be noted that the nanotube is closed tip.

The Raman spectra depicted in Fig. 3 shows bands D, G and G' respectively, as well as the ratio of band D and G (I_D/I_G) which equals to 1.15. Such band ratio indicates that once the catalyzer is eliminated from the CNTs structure, the walls are shifted generating an increase in the CNTs crystallinity [15].

3.2. CNTs dispersion: Probe-type vs ultrasonic bath sonicator

Figs. 4 and 5 account for for turbidity measurements of both N-doped and pristine CNTs after being dispersed with a probe-type ultrasonic processor (Fig. 4) and an ultrasonic bath sonicator (Fig. 5). The measurements were taken during five different times with a time interval of ten minutes in order to determine which of the two sonication techniques was best at breaking up the CNTs agglomerates and allowing the CNTs to remain suspended in the fluid. As it can be observed in Fig. 5 both types of CNTs were more or less uniformly dispersed when the probe-type sonicator was used. In contrast, the turbidity measurements obtained from the samples sonicated with the ultrasonic bath (Fig. 6) indicate that the CNTs were not as uniformly dispersed and remained agglomerated.

3.3. CNTs sterilization in the presence and absence of fluid

The information shown in Fig. 6 accounts for turbidity measures of ten concentrations of pristine (Fig. 6a) and N-doped (Fig. 6b) CNTs. The readings were taken in order to

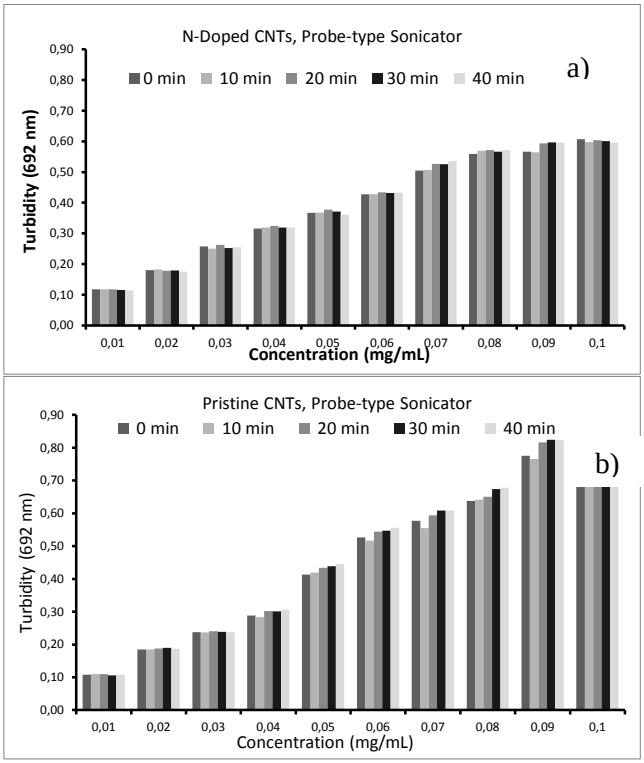


Figure 4. CNTs dispersed with a probe-type sonicator in RPMI-1640. a) N-Doped CNTs and b) Pristine CNTs.
Source: The authors

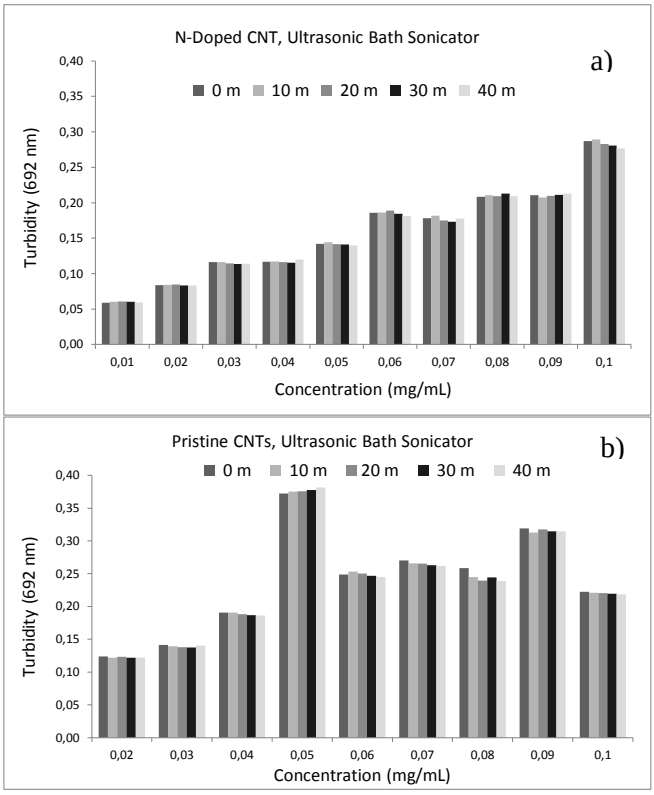


Figure 5. CNTs dispersed in RPMI-1640 with an ultrasonic bath sonicator a) N-Doped CNTs and b) Pristine CNTs.
Source: The authors

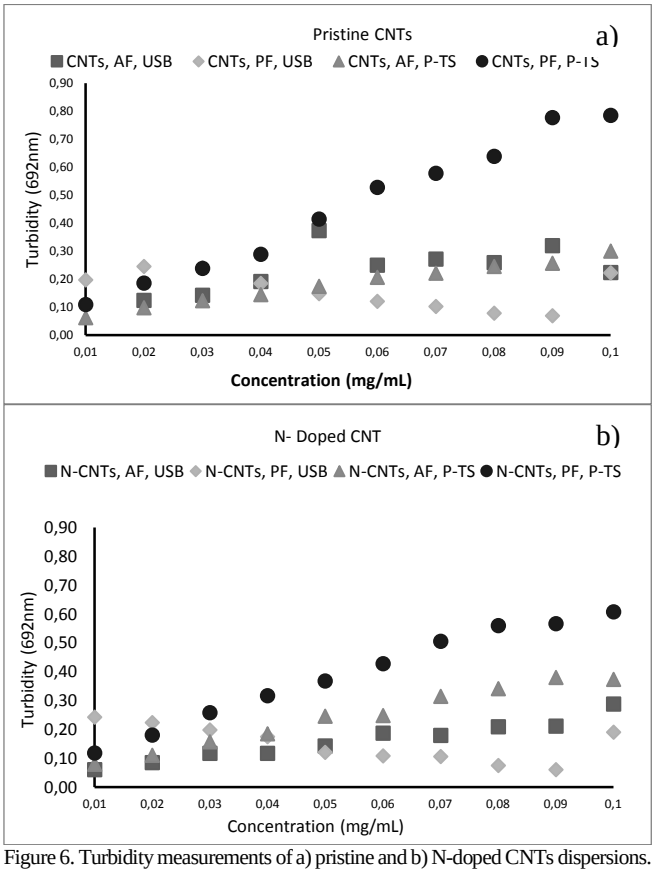


Figure 6. Turbidity measurements of a) pristine and b) N-doped CNTs dispersions. Prior to dispersing the CNTs with either ultrasonic bath (USB) or probe-type sonicator (P-TS), the samples were autoclaved in the presence (PF) and absence of fluid (AF).
Source: The authors

determine if the sterilization process in combination with the dispersion technique caused any effect in the ability of the CNTs to remain suspended in the liquid. As it can be seen in both Figures, CNTs that were sterilized in the presence of fluid (RPMI-1640) and dispersed with the probe-type sonicator yield higher turbidity measurements for all the ten concentrations tested. Overall N-doped CNTs performed better than pristine CNTs when sterilized with fluid and dispersed with the probe-type sonicator.

3.4. Turbidity measurements of CNTs in five different fluids

Turbidity measurements of both types of CNTs were taken at 692nm after dispersing the CNTs samples in five different fluids. Fig. 7 illustrates the measurements obtained for each of the fluids tested; as it can be observed the cell culture medium RPMI-1640 yield the highest turbidity measurements for all ten concentrations when compared to the other fluids. A possible explanation for this behavior would be that the nitrogen atoms present in the doped CNTs have an affinity for the components of the cell culture medium, therefore facilitating their dispersion; such observation indicates that the RPMI-1640 was the optimal fluid to disperse the CNTs, since a substantial amount of CNTs remained suspended in the fluid.

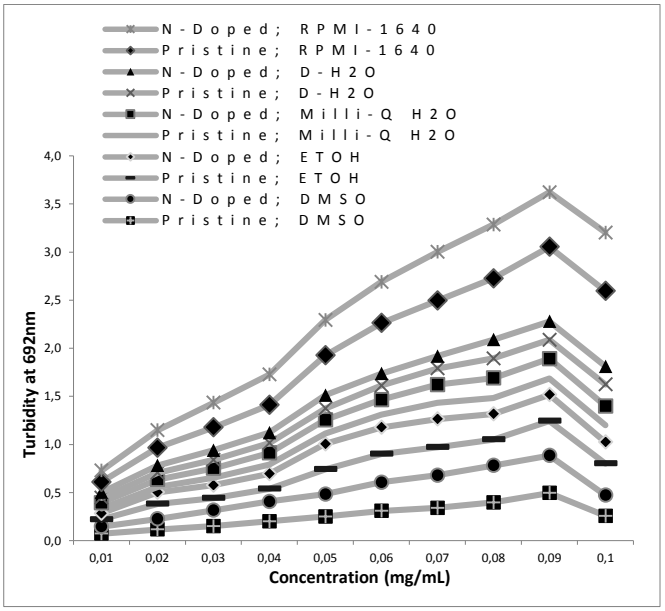


Figure 7. Turbidity measurements of ten concentrations of pristine and N-Doped CNTs in RPMI-1640, ethanol (ETOH), DMSO, distilled (D) and Milli-Q water.
Source: The authors

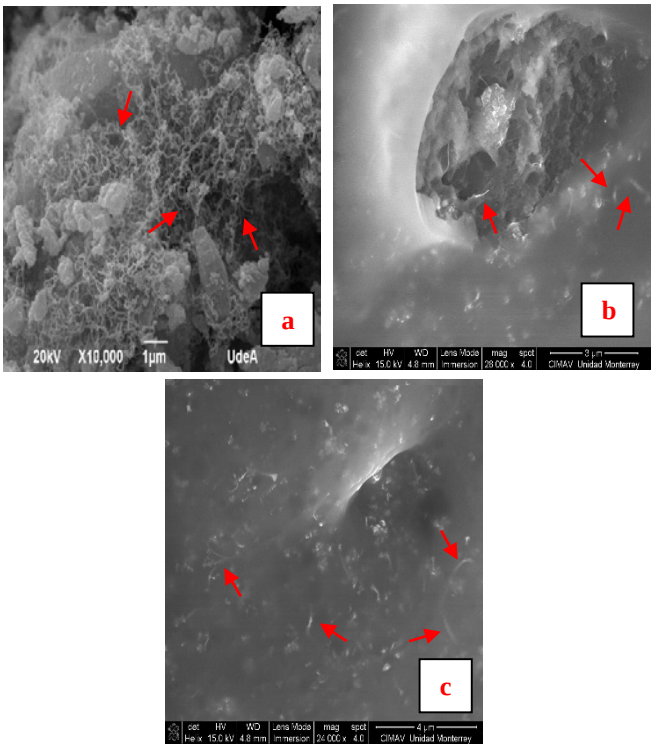


Figure 8. SEM micrographs of a) N-doped CNTs grown from Cobalt before dispersion, b) and c) N-doped CNTs [0.1mg/mL] dispersed in RPMI-1640, with an average size of less than 1μm, image magnified at 28000X and 24000X respectively.
Source: The Authors.

Fig. 8 shows the appearance of the carbon nanotubes obtained after each process. Fig. 8a shows a SEM micrograph of intact N-doped CNTs before being sonicated, it is important to note that CNTs appear clumped and tangled (see arrows). Figs. 8b and 8c show the dispersed N-doped CNTs [0.01mg/mL] samples after being autoclaved and sonicated during 2 minutes it can be seen that the carbon nanotubes used are dispersed in the cell culture medium (see arrows).

The data obtained was consistent with the objective of this research, since the application of CNTs for in-vitro testing has gained popularity in the last few years. Some authors have dispersed CNTs in aqueous solutions [16-20], but the dispersion is slightly different since tenso-active agents are employed to stabilize the solution and inhibit the agglomeration of CNTs. Murdock et al. [21] also prepared CNTs dispersions prior to in vitro exposure of cells, the authors used water as the dispersion liquid as well as cell culture media and serum. It is worth to mention that RPMI-1640 supplemented with 5% fetal bovine serum (FBS) was one of the first dispersion liquids used to sonicate CNTs samples employed in this research, but the attempt resulted in failure due to excessive foaming of the dispersion liquid caused by the probe-type sonicator. In this research, the dispersion of the CNTs samples was finally achieve in RPMI-1640 without FBS.

It is important to note that factors that could potentially affect the rheology of the CNTs dispersions include the chemistry of the continuous phase (base fluid), the amount of CNTs in the total volume of fluid, the aspect ratio and the average surface chemistry of the CNTs (mechanical dispersion methods and chemical treatments).

Another parameter that must be kept in mind when dispersing CNTs is the sonication technique chosen to achieve the separation of CNT agglomerates; however, separation methods could compromise the length and number of walls of the CNTs, which results in CNTs fragmentation as well as layer shedding. Authors such as Hilding et al. [19] have investigated the sonication effects on the CNTs morphology and have reported that such dispersion methods could alter the length and diameter of the CNTs structure. The data obtained in this research are congruent with the data reported in the literature [19] where a probe-type sonicator is employed to successfully dispersed CNTs. A possible explanation for such result could be due to the uniform distribution of the sound waves compared to the ultrasonic bath, also the probe-type sonicator excels the ultrasonic bath by a factor of 1000 (1000x higher energy input per volume) [19], therefore it is possible to achieve a homogenous dispersion with this sonication technique. Another important factor that influences the CNT dispersion is temperature, which has an effect on the rheological properties of the base fluid. Temperature could also affect the stability of the CNTs dispersion by changing the dispersant conformation of the liquid or by changing the interactions between the dispersant and the solid surface of the CNTs. Therefore, the rheological properties of CNTs dispersions are quite important for their application in biological systems [5]. Our data shows a better dispersion of CNTs when the CNTs samples were sterilized in the presence of the base fluid (RPMI-1640). This behavior could be explained due to the thermic stability conferred by the CNTs to the base fluid [22].

4. Conclusions

This study evaluated the dispersion capacity of carbon nanotubes using different fluids and two dispersion

techniques. It was possible to obtain carbon nanotubes by means of the CVD method, as well as their purification to obtain that they were dispersed in the different fluids. The results obtained indicate that the best dispersion of the carbon nanotubes for in vitro applications is the cell culture medium (RPMI-1640), using the probe-type sonicator.

In order to achieve a successful dispersion there needs to be full control over the most important sonication parameters to ensure the linear scalability of the process and completely reproducible results. The possibility of achieving a favorable CNT dispersion makes N-doped CNTs promising candidates for in-vitro testing. Moreover, when CNTs were dispersed using a bath sonicator, their dispersion state did not last over long periods of time although time was not a determinant factor to achieve a successful dispersion.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the Systems Biology Research Group at Universidad Pontificia Bolivariana for the technical support, the technicians at Centro de Investigacion en Materiales Avanzados (CIMAV) and Universidad de Antioquia for all their help with the sample analysis.

References

[1] Iijima, S., Helical microtubules of graphitic carbon. Nature, 354(6348), pp. 56-58, 1991. DOI: 10.1038/354056a0

[2] Ema, M., Imamura, T., Suzuki, H., Kobayashi, N., Naya, M. and Nakanishi, J., Evaluation of genotoxicity of multi-walled carbon nanotubes in a battery of in vitro and in vivo assays. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 63(2), pp. 188-195, 2012. DOI: 0.1016/j.yrtph.2012.03.014

[3] Stern, S.T. and McNeil, S.E., Nanotechnology safety concerns revisited. Toxicological Sciences, 101(1), pp. 4-21, 2008. DOI: 10.1093/toxsci/kfm169

[4] Yang, Y., Grulke, E.A., Zhang, Z.G. and Wu, G., Temperature effects on the rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 298(3), pp. 216-224, 2007. DOI:10.1016/j.colsurfa.2006.10.065

[5] Carlos-Cornelio, J.A., Cuervo-Velásquez, P.A., Ardila, M.I., Orozco-Murillo, O.M., Jaramillo-Zuluaga, L.F., Hoyos-Palacio, L.M., Lara-Romero, J. y Toro, A., Propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un fluido lubricante DYNA, 83(199), pp. 229-236, 2016. DOI: 10.15446/dyna.v83n199.54900

[6] Dhawan, A. and Sharma, V., Toxicity assessment of nanomaterials: Methods and challenges. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 398(2), pp. 589-605, 2010. DOI: 10.1007/s00216-010-3996-x

[7] Koh, B.E., Dispersion of Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs) in aqueous solution and reversion of SWCNT aggregates. University of Michigan, 2013. [On line]. Available in: https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/102316/ericlo_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[8] Jiang, L., Gao, L. and Sun, J., Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes. Journal of Colloid and Interface Science, 260(1), pp. 89-94, 2003. DOI:10.1016/S0021-9797(02)00176-5

[9] Monteiro-Riviere, N.A., Inman, A.O., Wang, Y.Y. and Nemanich, R.J., Surfactant effects on carbon nanotube interactions with human keratinocytes. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, 1(4), pp. 293-299, 2005. DOI: 10.1016/j.nano.2005.10.007

[10] Rastogi, R., Kaushal, R., Tripathi, S.K., Sharma, A.L., Kaur, I. and Bharadwaj, L.M., Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants. Journal of Colloid and Interface Science, 328(2), pp. 421-428, 2008. DOI: 10.1016/j.jcis.2008.09.015

[11] Sager, T.M., Porter, D.W., Robinson, V.A., Lindsley, W.G., Schwegler-Berry, D.E. and Castranova, V., Improved method to disperse nanoparticles for in vitro and in vivo investigation of toxicity. Nanotoxicology, 1(2), pp. 118-129, 2007. DOI: 10.1080/17435390701381596

[12] Vaisman, L., Wagner, H.D. and Marom, G., The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. Advances in colloid and interface science, 128, pp. 37-46, 2006. DOI: 10.1016/j.cis.2006.11.007

[13] Arora, S., Rajwade, J.M. and Paknikar, K.M., Nanotoxicology and in vitro studies: The need of the hour. Toxicology and applied pharmacology, 258(2), pp. 151-165, 2012. DOI: 10.1016/j.taap.2011.11.010

[14] Yanamala, N., Kagan, V.E. and Shvedova, A.A. Molecular modeling in structural nano-toxicology: Interactions of nano-particles with nano-machinery of cells. Advanced drug delivery reviews, 65(15), pp. 2070-2077, 2013. DOI: 10.1016/j.addr.2013.05.005

[15] Du, J., Wang, S., You, H. and Zhao, X., Understanding the toxicity of carbon nanotubes in the environment is crucial to the control of nanomaterials in producing and processing and the assessment of health risk for human: A review. Environmental Toxicology and Pharmacology, 36(2), pp. 451-462, 2013. DOI: 10.1016/j.etap.2013.05.007

[16] Zhao, X. and Liu, R., Recent progress and perspectives on the toxicity of carbon nanotubes at organism, organ, cell, and biomacromolecule levels. Environment International, 40, pp. 244-255, 2012. DOI: 10.1016/j.envint.2011.12.003

[17] Madani, S.Y., Mandel, A. and Seifalian, A.M., A concise review of carbon nanotube's toxicology. Nano Reviews & Experiments, 4, 2013. DOI: 10.3402/nano.v4i0.21521

[18] Hoyos-Palacio, L.M., Efecto de los catalizadores hierro, cobalto, níquel, molibdeno, y mezclas soportadas sobre sílice sol gel, para la síntesis de nanotubos de carbono mediante deposición química de vapor, Tesis de Doctorado en Ingeniería. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia 2010, 204 P.

[19] Hilding, J., Grulke, E.A., George-Zhang, Z. and Lockwood, F., Dispersion of carbon nanotubes in liquids. Journal of Dispersion Science and Technology, 24(1), pp. 1-41, 2003. DOI: 10.1081/DIS-120017941

[20] López, J., Síntesis de nanopartículas metálicas de Ce y Zr soportadas sobre nanotubos de carbono y su aplicación en la adsorción de colorantes sintéticos. Tesis Dr. en Ingeniería Química. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, 2014, 135 P.

[21] Murdock, R.C., Braydich-Stolle, L., Schrand, A.M., Schlager, J.J. and Hussain, S.M., Characterization of nanomaterial dispersion in solution prior to in vitro exposure using dynamic light scattering technique. Toxicological Sciences, 101(2), pp. 239-253, 2008. DOI: 10.1093/toxsci/kfm240

[22] Ruan, B. and Jacobi, A.M., Ultrasonication effects on thermal and rheological properties of carbon nanotube suspensions. Nanoscale Research Letters, 7(127), 2012. DOI: 10.1186/1556-276X-7-127

C. Espinosa, received a BSc. in Biology from SUNY Oswego, USA. Has been a member of the Systems Biology Research Group at Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, since 2013 and recently completed a MSc. in Biomedical Engineering at the same institution.
ORCID: 0000-0003-1085-0992

I.C. Ortiz-Trujillo, received her MSc and PhD in Biology from Universidad de Antioquia, Colombia, is coordinator of the Systems Biology Research Group and faculty member at the school of Health Sciences at Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Has published several original research articles in the area of mutagenesis and epigenetics.
ORCID: 0000-0002-1620-2809

J.A. Carlos-Cornelio, is a BSc. In Chemical Engineer from Instituto Tecnológico de Villahermosa, México, 2010. MSc and PhD in Chemical Engineer from Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. His research interests include nanomaterials, tribology, and surface chemistry.
ORCID: 0000-0003-1953-6887

R.D. Zapata-Hernández, received his MSc. and PhD in Soil Science from Universidad Central de Venezuela, is an associate professor at the Geoscience School at the Universidad Nacional de Colombia in Medellin, colombia; is an active member of the Soil Microbiology Research Group at the same institution and has published several books on soil related topics.
ORCID: 0000-0003-4014-5207

L.M. Hoyos-Palacio, is a BSc. in Chemical Engineer from Universidad Nacional de Colombia at Medellin, Colombia, in 2005. In 2006, initiated her doctorate degree and became a researcher of the New Materials Research Group at Universidad Pontificia Bolivariana, Medellin, Colombia. In 2011 culminated her doctorate degree and obtained a PhD in Engineering, Energy and Thermodynamics. Has published several articles in indexed journals and has participated in international symposiums. Participates as a project evaluator for Colciencias as well as article reviewer.
ORCID: 0000-0003-2430-8504

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Surface hardness prediction based on cutting parameters in turning of annealed AISI 1020 steel

Omar José Zurita-Hurtado, Verónica Carmen Di Graci-Tiralongo & María Cristina Capace-Aguirre

Department of Mechanics, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. ozurita@usb.ve, vdigraci@usb.ve, mccapace@usb.ve

Received: June 5th, 2017. Received in revised form: August 23th, 2017. Accepted: September 18th, 2017.

Abstract
The influence of various cutting parameters, cutting speed (*Vc*), feed rate (*f*), and depth of cut (*d*) on the surface hardness developed by turning annealed AISI 1020 steel using carbide insert tools was investigated. It was shown from the measured results that hardness increases with the increase in all the studied parameters. An analysis of variance (ANOVA) was employed to determine the contributions of each parameter on the response variable. From the results, it was found that cutting speed has the most significant role in producing surface hardness (69.2 %) followed by feed rate (24.4 %), while the depth of cut has the lesser effect (6.4%). Finally, a simple equation is proposed, for the prediction of the values of surface hardness, which accounts for the effects of process parameters.

Keywords: AISI 1020; ANOVA; cutting speed; depth of cut; feed rate; surface hardness; turning.

Predicción de la dureza superficial en base a los parámetros de corte en el torneado de acero AISI 1020 recocido

Resumen
La influencia de varios parámetros de corte, velocidad de corte (*Vc*), velocidad de avance (*f*), y la profundidad de corte (*d*) en la dureza superficial desarrollada por torneado en acero AISI 1020 recocido utilizando herramientas de insertos de carburo fue investigada. Se demostró a partir de los resultados medidos que la dureza aumenta con el aumento en todos los parámetros. Se empleó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar las contribuciones de cada parámetro estudiado en la variable de respuesta. A partir de los resultados, se encontró que la velocidad de corte tiene el rol más importante en la producción de dureza superficial (69.2 %), seguido de la velocidad de avance (24.4 %), mientras que la profundidad de corte tiene el efecto menor (6.4 %). Finalmente, se propone una ecuación simple, para la predicción de los valores de dureza superficial, que representa los efectos de los parámetros del proceso.

Palabras clave: AISI 1020; ANOVA; velocidad de corte; profundidad de corte; velocidad de avance; dureza superficial; torneado.

1. Introduction

Turning is a process whereby a single cutting edge is used to remove small chips of material from a rotating workpiece to create a cylindrical shape. After the process, the surface layers are deformed and hardened. The hardness of a material is the property that enables it to resist permanent plastic deformation, which is usually measured by indentation. For designers, this is important in analyzing corrosion resistance, and fatigue crack initiation on components during their applications. Therefore, attention must be paid to when selecting cutting parameters.

Several studies have demonstrated that a lower cutting speed increases the values of surface hardness on turning of AISI 304 - stainless steel [1], 12-Mn austenitic steel [2] and duplex stainless steel [3]. However, a deviation from this conclusion was reported for titanium based alloy Ti-64 [4], as less hardness resulted when decreasing the cutting speed. Additionally, on AISI 316 austenitic stainless steel [5] it was confirmed that this parameter has no significant effect on hardness.

The influence of feed rate on surface hardness in turning has also been investigated. For example, many authors agree that this cutting parameter has negligible influence on the

How to cite: Zurita-Hurtado, O.J., Di Graci-Tiralongo, V.C. and Capace-Aguirre, M.C., Surface hardness prediction based on cutting parameters in turning of annealed AISI 1020 steel DYNA, 84(203), pp. 31-36, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

hardness of AISI 316 austenitic stainless steel [5], AISI 4340 steel [6], AISI 1045 steel [7] and 34CrNiMo6 alloy steel [8]. While other studies suggest that higher feed rates have an impact on increasing the surface hardness on turning of AISI 304 - stainless steel [1], titanium based alloy Ti-64 [4] and nickel-based alloy IN-718 [9]. Meanwhile, the result from a study conducted on 12-Mn austenitic steel [2] has shown that hardness increases as feed rates are lower.

In literature, some efforts have been made to analyze how the depth of cut affects the surface hardness. In most cases, it was found that higher values of hardness are obtained by increasing this cutting parameter on turning of AISI 304 stainless steel [1], AISI 316 stainless steel [5] and nickel based alloy INCONEL 718 [9].

Despite this research, few works have assessed the impact of individual cutting parameters on surface hardness, to determine which may have more, and which may have less. The depth of cut was found to have more influence on hardness after turning AISI 316 austenitic stainless steel [5], while on the other hand, cutting speed has a significant influence on titanium based alloy Ti-64 [4].

The prevailing literature indicates that the effect of cutting parameters on surface hardness is still not well understood. Therefore, this study is concerned with the relation of turning cutting parameters, cutting speed (*Vc*), feed rate (*f*), and depth of cut (*d*) as input variables on the surface hardness of annealed AISI 1020 steel, and the development of a simple mathematical expression for the prediction of its value.

2. Experimental procedure

The workpiece material for this work consisted in cylinders of 31.75 mm in diameter and 170 mm in length, cut from a round bar of commercial AISI 1020 steel (0.18 ± 0.01% C, 0.035 ± 0.001% S, and 0.40 ± 0.01% Mn). To achieve a homogenized microstructure, the samples were annealed at 910 °C for 1 h, followed by slow cooling inside the furnace.

The specimens were machined 15 mm in length from the edge by turning in a numerically controlled lathe; all performed with an abundant supply of water-soluble oil as coolant and using ISO code - DCMT11T308MU grade TN2000 coated carbide inserts. For each experiment, a new insert's edge was used, which not only ensures same cutting conditions, but also avoids the presence of changes in the properties near the surface of the material due to the tool wear [10].

Three factors were considered for evaluation and arranged by using a technique of variables [11], with three levels of feed rate, three levels of depth of cut, and two levels of cutting speed for 18 combinations in total. The limit values shown in Table 1, were restricted by the lathe, and were selected based on previous experience with AISI 1020 steel [12].

After turning, the samples were cut perpendicular to the axis direction of the bar, within the machined length. The cross-sectional areas were then prepared according to ASTM E3-11 standard metallographic techniques [13].

Table 1.
Input parameters and their levels.

Level	d (mm)	f (mm/rev)	Vc (m/min)
1	1	0.05	20
2	2	0.15	-
3	3	0.25	70

Source: The authors

The Vickers microhardness profile was measured for each sample on the cross-section starting from the edge along the radius to the center, with 70 µm spacing. For each distance, five indentations at randomly chosen locations were made, discarding the extreme values. Finally, three measurements were used to calculate the average value of hardness. A Buehler Vickers tester was used and tests were carried out at a load of 200 gf for 15 s according to ASTM E384-11 standard [14].

The results obtained from the average maximum hardness were treated using statistical parametric analyses of variance approach (ANOVA) with Minitab. In the analysis, the microhardness (HV) represented the dependent variable, while the depth of cut (*d*), feed rate (*f*) and cutting speed (*Vc*) were the independent variables. This analysis was carried out for a confidence level of 95%. The significance level was based on the P-value [15] as:

Insignificant if $P > 0.10$
Mildly significant if $0.05 < P < 0.10$
Significant if $P < 0.05$

Then, a Pareto-Anova analysis was performed to determine the relative importance of each parameter and their percentage contribution.

Finally, using multiple linear regression methods [15], a statistical mathematical model was derived for the prediction of the maximum surface hardness.

3. Results and discussion

The graph on Fig. 1 shows the microhardness profiles measured along the radii for tests with low and high-level limits on each evaluated parameter. This tendency was the same for the other combination of conditions.

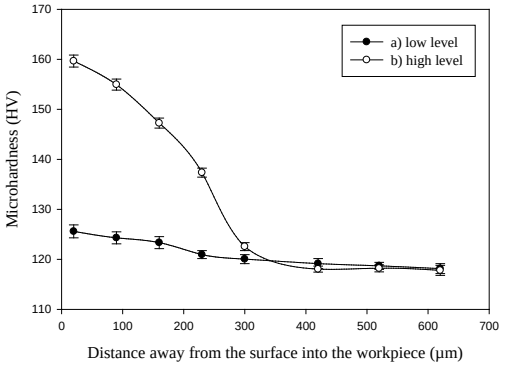


Figure 1. Microhardness profiles through depth after turning, a) low level (v = 20 m/min, f= 0.05 mm/rev, d = 1 mm), and b) high level (v = 70 m/min, f= 0.25 mm/rev, d = 3 mm).
Source: The authors

Table 2.
Experimental runs with measured surface average hardness

Trail No.	Vc (m/min)	F (mm/rev)	d (mm)	HV
1	20	0.05	1	125.6
2	20	0.05	2	126.8
3	20	0.05	3	132.5
4	20	0.10	1	128.0
5	20	0.10	2	130.0
6	20	0.10	3	136.0
7	20	0.15	1	135.1
8	20	0.15	2	141.3
9	20	0.15	3	146.0
10	70	0.05	1	142.0
11	70	0.05	2	144.0
12	70	0.05	3	147.0
13	70	0.10	1	149.0
14	70	0.10	2	150.0
15	70	0.10	3	153.0
16	70	0.15	1	156.0
17	70	0.15	2	158.0
18	70	0.15	3	159.0

Source: The authors

As expected, the curves describe a cascade shape, with higher values of hardness on the surface of the samples. Then as the depth below the surface reaches the bulk material, the hardness decreases to a value that becomes steady-state. This is due to the severe plastic deformation at the surface, and residual stresses introduced in the material after the tearing by the tool during the cutting process.

Table 2 shows 18 set of cutting parameters listed as per orthogonal array with corresponding surface average hardness values.

Influence of feed rate on the average maximum values of microhardness is shown in Fig. 2. The maximum hardness was studied since it is more significant and is the value exposed to the higher loading conditions on a component in service.

It can be observed that in every test, microhardness increased with the increase in feed rate. This is consistent with the findings of previous researchers [1,4,9]. The reason might be that as feed increases, cutting force also increases, as higher resistance is exerted the tool propagation [16]. The results obtained showed a minimum and maximum difference in hardness for fixed cutting speed and depth of cut, of 7% and 11% respectively.

An analysis of Fig. 3 indicates that an increase in depth of cut causes greater average maximum values of hardness. These results are consistent with previous experiments [1,5,9]. This trend suggests that an augmentation in the value of the depth of cut leads to an increase of the cutting forces, resulting in a more severely work-hardened surface layer [16]. A very small increment in the hardness with the depth of cut is indicated by the slopes of the curves, resulting in differences values of 2% and 8%, corresponding to fixed cutting speed and feed rate.

From Fig. 4 it can be observed that as cutting speed increases, the average maximum values of hardness also increase. This is consistent with previous works [4]. This fact is related to the increase in the cutting energy in the surface region, which is sufficient to increase the surface stresses, leading to hardening as a result of the introduced deformation [17]. The experimental results show that measured hardness differences corresponding to a fixed feed rate and depth of cut have values between 9% and 17%.

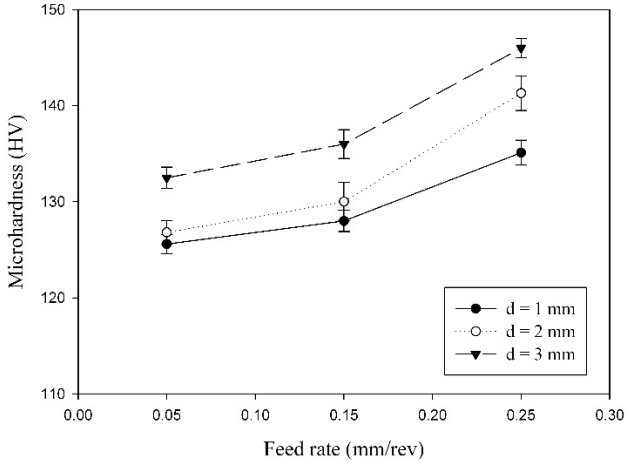
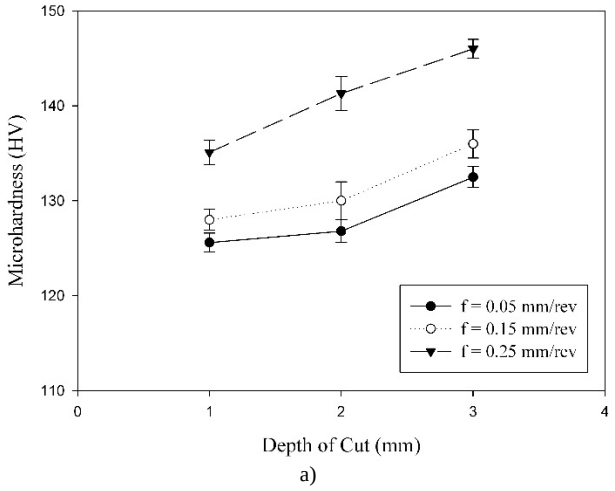
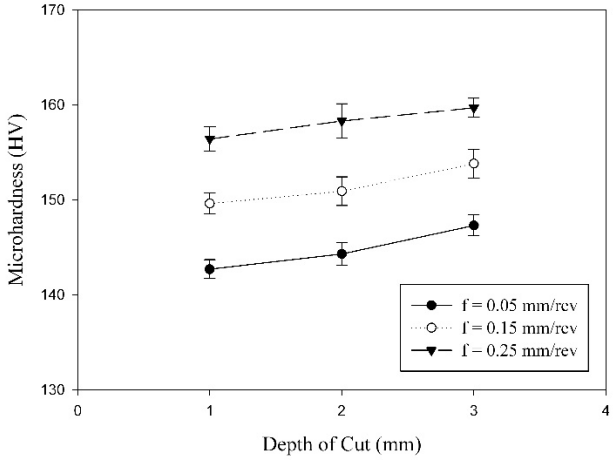


Figure 2 Microhardness plotted against feed rate for the turned annealed AISI 1020 steel, with a cutting speed of (a) 20 m/min; and (b) 70 m/min
Source: The authors

A statistical analysis of experimental data using the analysis of variance (ANOVA) for maximum values of microhardness was calculated and is presented in Table 3. The results obtained show significant ($P<0.05$) effects for the depth of cut (*d*), feed rate (*f*) and cutting speed (*Vc*) on the hardness values. Additionally, F-test decides whether the parameters are significantly different. A larger F-value shows the greater impact on the machining performance characteristics [18]. Larger F-values are observed for speed as 477.59.

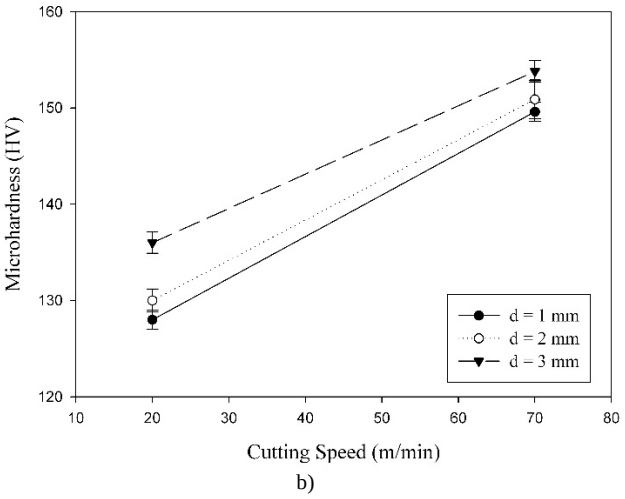


a)

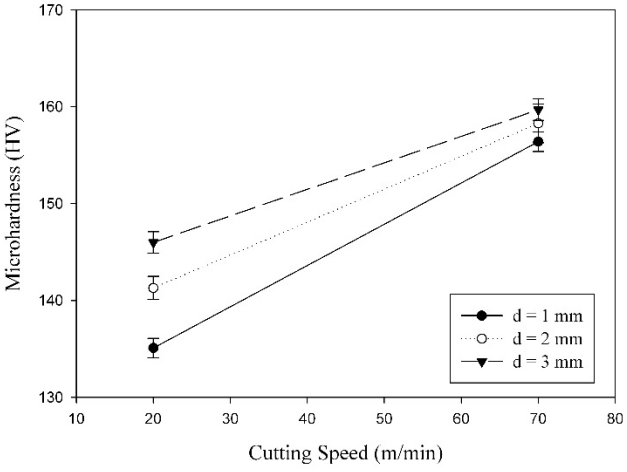


b)

Figure 3 Microhardness plotted against depth of cut for turned annealed AISI 1020 steel, with a cutting speed of (a) 20 m/min; and (b) 70 m/min
Source: The authors

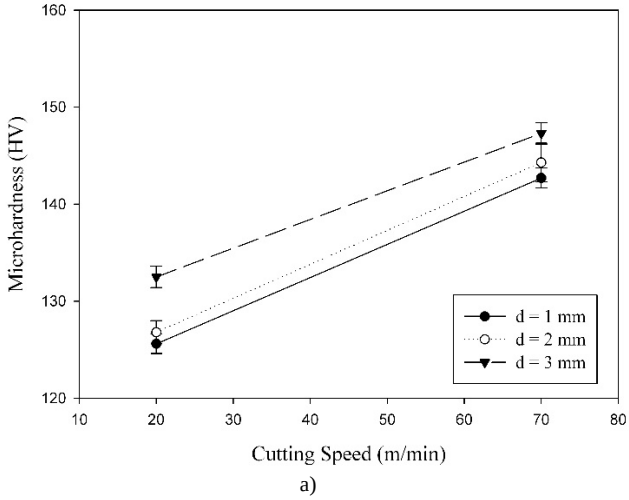


b)



c)

Figure 4 Microhardness plotted against cutting speed for the turned annealed AISI 1020 steel, with a feed rate of (a) 0.05 mm/rev; (b) 0.15 mm/rev; and (c) 0.25 mm/rev
Source: The authors



a)

Table 3.
ANOVA for surface microhardness.

Source of variance	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean squares	F - value	P - value
Vc	1	1424.00	1424.00	477.59	0.00
f	2	501.53	250.77	84.10	0.00
d	2	131.74	65.87	22.09	0.00
Error	12	35.78	2.98		
Total	17	2093.06			

Source: The authors

As far as the influence of individual effects of these factors, as well as their interactions, is concerned, results can be discussed from the Pareto-Anova results shown in Table 4. The numerical estimates indicate that the contribution of the speed of cut is the largest (69.2%), and the interaction of the depth of cut is less significant (6.4%).

Table 4.
Pareto-Anova analysis of standardized effects for surface microhardness

Contributions	Vc	f	d
Simple (%)	69.2	24.4	6.4
Cumulative (%)	69.2	93.6	100

Source: The authors

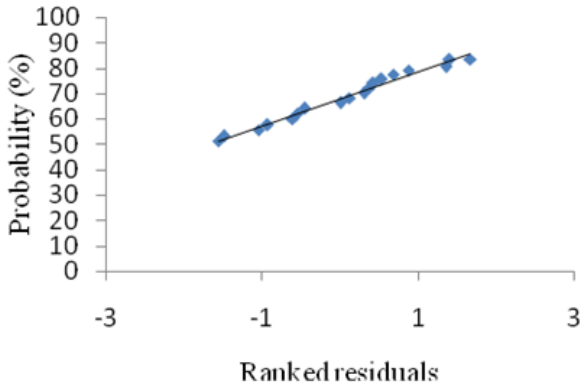


Figure 5. Probability plot for the mathematical expression (Eq. 1)
Source: The authors

Using the significant regression coefficients, the final model for the prediction of the maximum surface microhardness could be constructed as given in eq. (1):

$$HV = 110.1214 + 0.3610*Vc + 63.5892*f + 3.2589*d \quad (1)$$

$R^2 = 0.9755$
$R^2ajust = 0.9702$
$S = 0.0136$

The R^2 and R^2_{adj} values above 95%, indicate that the obtained model fit is on the higher side of the acceptable limit. Finally, the low value for the standard deviation (S), indicates that this expression is adjusted to the experimental values [19].

The plot in Fig. 5 reveals that the residuals follow a straight line and so the errors appear to show that the dependability of the expression is completely proven [15].

4. Conclusions

Based on the results obtained by this investigation, the following conclusions may be drawn which are valid for the range investigated.

- The surface microhardness increases when the cutting parameters, depth of cut (*d*), feed rate (*f*) and cutting speed (*Vc*) increase.
- The speed of cut plays an important role and contributes 69.2% on surface hardness to the overall turning parameters. The depth of cut was found to be the least contribution cutting parameter (6.4%).
- The proposed mathematical model can be used to adequately predict the maximum surface microhardness within the specified limits of the process parameters.

References

[1] Senussi, G.H., Interaction effect of feed rate and cutting speed in CNC - turning on chip micro - hardness of 304 - austenitic stainless steel. World Academy of Science, Engineering and Technology, [online]. 28, pp. 121-126, 2007. Available at: http://waset.org/publications/4706

[2] Cebron, M., Kosel, F. and Kopac, J., Effect of cutting on surface hardness and residual stresses for 12-Mn austenitic steel, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, [online]. 55(1), pp. 80-89, 2012. Available at: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol55_1/55111.pdf

[3] Krolczyk, G., Nieslony, P. and Legutko, S., Microhardness and surface integrity in turning process of duplex stainless steel (DSS) for different cutting conditions, Journal of Materials Engineering and Performance, 23(3), pp. 859-866, 2014. DOI: 10.1007/s11665-013-0832-4

[4] Che-Haron, C.H. and Jawaid, A., The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti–6% Al–4% V, Journal of Materials Processing Technology, 166(2), pp. 188-192, 2005. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.08.012

[5] Patil, P.M., Kadi, R.V., Dundur, S.T. and Pol, A.S., Effect of cutting parameters on surface quality of AISI 316 austenitic stainless steel in CNC turning, International Research Journal of Engineering and Technology, [online]. 02(04), pp. 1453-1460, 2015. Available at: https://www.irjet.net/volume-2-issue-4

[6] Sadat, A.B., Effect of high cutting speed on surface integrity of AISI, 4340 steel during turning, Materials Science and Technology, 6(4), pp. 371–375, 1990. DOI: 10.1179/026708390790190955

[7] Sasahara, H., The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45%C steel, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(2), pp. 131-136, 2005. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.08.002

[8] Javidi, A., Rieger, U. and Eichlseder, W., The effect of machining on the surface integrity and fatigue life, International Journal of Fatigue, 30(10-11), pp. 2050-2055, 2008. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005

[9] Pawade, R.S., Joshi, S.S. and Brahmankar, P.K., Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(1), pp. 15-28, 2008. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.08.004

[10] Sharman, A.R.C., Hughes, J.I. and Ridgway, K., An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718TM when turning, Journal of Materials Processing Technology, 173, pp. 359-367, 2006. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2005.12.007

[11] Montgomery, D.C., Design and analysis of experiments, USA, Wiley, 2012.

[12] Suhail, A.H., Ismail, N., Wong, S.V. and Abdul-Jalil, N.A., Optimization of cutting parameters based on surface roughness and assistance of workpiece surface temperature in turning process, American Journal of Engineering and Applied Sciences, 3(1), pp. 102-108, 2010. DOI: 10.3844/ajeassp.2010.102.108

[13] ASTM E3-11, Standard guide for preparation of metallographic specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/E0003-11

[14] ASTM E384-11, Standard test method for knoop and vickers hardness of materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/E0384-11

[15] Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, G.G., Introduction to linear regression analysis, USA, Wiley, 2012.

[16] Deepakkumar, P. and Sadaiah, M., Investigations on finish turning of AISI 4340 steel in different cutting environments by CBN insert, International Journal of Engineering Science and Technology, [online]. 3(10), pp. 7690-7706, 2011. Available at: http://www.ijest.info/docs/IJEST11-03-10-114.pdf

[17] Gunnberg, F., Escursell, M. and Jacobson, M., The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburised steel, Journal of Materials

Processing Technology, 174, pp. 82-90, 2006. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.262
[18] Ross, P.J., Taguchi techniques for quality engineering, USA, McGraw-Hill Book Company, 1996.
[19] Peña, D., Estadística; modelos y métodos (Statistics; models and methods), Spain, Alianza Editorial S.A., 2001. (in Spanish).

O. Zurita, received the BSc. Eng. in Materials Engineering in 1992 and the MSc. degree in Mechanical Engineering in 1997, both from Universidad Simón Bolívar in Caracas, Venezuela. Since 1993 he has worked as professor in the Mechanics Department at the Universidad Simón Bolívar, Venezuela, teaching undergraduate courses of manufacturing processes for industrial, materials and mechanical engineering students. His research interests include: machining, surface integrity, numerical control and cold working.
ORCID: 0000-0002-7290-3941

V. Di Graci, received the BSc. Eng. in Materials Engineering in 1993 and the MSc. degree in Mechanical Engineering in 2002, both from Universidad Simón Bolívar in Caracas, Venezuela. Since 1994 she has worked as professor in the Mechanics Department at the Universidad Simón Bolívar, Venezuela, teaching undergraduate courses of manufacturing processes for industrial, materials and mechanical engineering students. Her research interests include: mechanical properties of metals, cold and hard working, rolling, wire drawling and torsion.
ORCID: 0000-0003-2763-2107

M. Capace, received the BSc. Eng. in Materials Engineering in 2009 and the MSc. degree in Mechanical Engineering in 2014, both from Universidad Simón Bolívar in Caracas, Venezuela. Since 2014 she has worked as professor in the Mechanics Department at the Universidad Simón Bolívar, Venezuela, teaching undergraduate courses of manufacturing processes for industrial, materials and mechanical engineering students. Her research interests include: welding of metals, mechanical properties of steels and surface finish in machining.
ORCID: 0000-0001-8711-6978



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

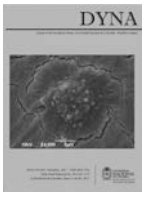
Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Climate change effects on the climate dynamics of coastal Ecuador

Iker García-Garizábal [a,b], Paola Romero [a], Samantha Jiménez [a] & Luis Jordá [a]

[a] *Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. ikerggarizabal@gmail.com, plromero@espol.edu.ec, sjimenez@espol.edu.ec, ljbordehore@gmail.com*
[b] *PROMETEO. Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación –SENESCYT. Quito, Ecuador.*

Received: August 16th, 2016. Received in revised form: June 26th, 2017. Accepted: September 18th, 2017

Abstract
The study presented herein characterizes climate for historical series (1982-2011) of average temperature and precipitation, also including future projections (2012-2099) for the Province of Santa Elena, westernmost point of continental Ecuador, which presents desert environment in the intertropical belt. The historical analysis shows increasing temperatures (0,038 ºC/year) and precipitation (0,196 mm/year). Comparison of historical and generated (65 climate models) climate determines scenario ECHOG A2 as the most appropriate to reproduce the climate of the zone. This model predicts increases in temperature (+2,7 ºC), precipitation (+8,2%), and in maximum annual rain values, at the end of the XXI century. Evolution of temperature and precipitation does not lead to changes in annual climate characteristics, which is maintained as Semiarid, but the aridity index decreases monthly, from January to April.

Keywords: Temperature, precipitation; aridity index; climate models; trend.

Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático

Resumen
Este trabajo caracteriza el clima de la serie histórica (1982-2011) de temperatura media y precipitación y sus proyecciones futuras (2012-2099) en la Provincia de Santa Elena, región más occidental del Ecuador continental con características desérticas en el cinturón intertropical. El análisis histórico muestra aumentos de temperatura (0,038 ºC/año) y precipitación (0,196 mm/año). La comparación del clima histórico y generado por 65 modelos climáticos determina al escenario ECHOG A2 como más adecuado para reproducir el clima de la zona. Dicho modelo predice a final del siglo XXI aumentos en la temperatura media (+2,7 ºC), precipitación (+8,2%) y en los valores máximos de lluvia anual. La evolución de la temperatura y precipitación no lleva cambios en las características de clima anual que se mantiene como Semidesértico árido, si bien mensualmente disminuye la aridez de enero a abril.

Palabras clave: Temperatura; precipitación; índice de aridez; modelos climáticos; tendencia.

1. Introducción

El grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC) pone de manifiesto que el calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero es un hecho constatado con el que se prevén importantes cambios en gran cantidad de variables climáticas [1]. Entre ellas, destacan precisamente la temperatura, en la que se detecta una tendencia creciente de 0,74 ºC entre 1901-2005, y las precipitaciones, en las que a pesar de su alta variabilidad espacial puede evidenciarse un aumento generalizado en regiones septentrionales y una reducción en las más meridionales.

El IPCC recoge la necesidad de establecer medidas de adaptación y mitigación de cara al cambio climático, si bien, dada la complejidad del sistema Tierra, es imposible detallar actuaciones a nivel mundial y resulta necesario desarrollar estudios locales. Con el propósito de estudiar el impacto del cambio climático y poder anteponerse a los cambios previstos, centros de investigación han desarrollado modelos capaces de hacer proyecciones climáticas. Web-sites como la del Canadian Climate Change Scenarios Network (www.cccsn.ec.gc.ca) recopilan estos modelos y los ponen a disposición.

How to cite: García-Garizábal, I., Romero, P., Jimenez, S. and Jordá, L., Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático DYNA, 84(203), pp. 37-44, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

Los modelos climáticos están orientados a la creación de escenarios climáticos futuros que permitan crear y evaluar con tiempo estrategias de gestión a las nuevas condiciones climáticas. No obstante, resulta imprescindible analizar cada modelo de manera individual, ya que a escala local los diferentes modelos y escenarios pueden arrojar resultados variados para una misma zona de estudio. Aun así, todos los modelos coinciden con que las regiones áridas y semiáridas son más sensibles a los cambios climáticos que las regiones húmedas [2].

En la costa pacífica de Sudamérica se han desarrollado algunos estudios que analizan la evolución de la temperatura [3-7] y la precipitación [5,8-16] y que han permitido crear una línea base de información para analizar las características del clima actual y su futura evolución. En este sentido, aunque para la temperatura los trabajos detectaron tendencias positivas similares a los encontrados a nivel mundial, son de destacar los valores de negativos de la costa Chilena [3,6]. Para la precipitación se encontraron comportamientos mucho más heterogéneos espacial y temporalmente, si bien parece aumentar el número de eventos de alta precipitación y espaciado de las lluvias [9].

Aunque los trabajos anteriores aportan valiosa información del comportamiento y tendencias del clima, es necesario desarrollar estudios climáticos más locales a fin de conocer la problemática climática de cada zona para poder planificar actuaciones concretas [17-19].

Este hecho debe ser tenido en cuenta especialmente en el entorno del Ecuador, al plantearse como un caso particular en Sudamérica, pues por su posición en la región del ecuatorial-tropical bajo la influencia de las corrientes de Humboldt y El Niño [20-22] y la dinámica de los vientos alisios con la cordillera andina, confiere a esta región una alta variedad climática, que abarca desde regiones interiores con climas tropicales de abundantes y constantes lluvias hasta regiones con características desérticas en los que la ocurrencia de precipitaciones es casi mínima [23-25].

Así pues, este trabajo pretende caracterizar la dinámica termo-pluviométrica y determinar el modelo de cambio climático más adecuado para analizar el impacto del cambio climático en la evolución climática de la Provincia de Santa Elena (PSE), región más occidental de Ecuador continental y que presenta características desérticas.

2. Metodología

2.1. Información climática de la zona de estudio

La zona de estudio está localizada en la región más occidental del Ecuador, siendo limitada al oeste por el Océano Pacífico y de norte a este por la cordillera Chongón-Colonche. Se extiende entre -1,6° y -2,5° S a -81,0 y -80,2° W y cubre una extensión de 3782 km2. La topografía es plana y homogénea con una ligera pendiente W-SW que le lleva en su zona Norte a 807 m de altitud, y una altura media es de 125 msnm (Fig. 1).

La zona dispone de seis series homogéneas de temperatura media (T) [26] y cinco de precipitación (P) [27] con registros históricos desde 1982 hasta la actualidad gestionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador

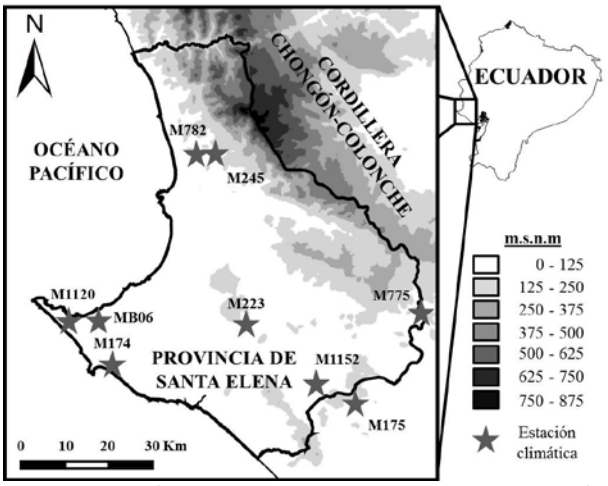


Figura 1. Localización de la Provincia de Santa Elena y estaciones climáticas de temperatura y precipitación disponibles.
Fuente: Los autores.

(INAMHI) y el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR). A partir de las 11 series climáticas se construyeron las series de referencia de temperatura media y precipitación de la PSE calculadas bien como la media de los datos de temperatura mensual o como la mediana de la precipitación mensual.

2.2. Caracterización climática

Dado que el panel intergubernamental del cambio climático aconseja periodos de estudio mínimos de 30 años y los modelos climáticos disponibles en la web (www.cccsn.ec.gc.ca) necesitan datos entre 1961 y el año actual, el periodo 1982-2011 fue el utilizado para caracterizar la evolución histórica del clima en la zona.

A partir de los datos anuales y mensuales de precipitación se determinó el Índice de Aridez de De Martonne (IA) [28] que clasifica el clima en Desierto hiperáridos (IA< 5), Semidesértico árido (IA: 5-10), Semiárido mediterráneo (IA: 10-20), Subhúmedo (IA: 20-30), Húmedo (IA: 30-60) y Perhúmedo (IA> 60).

$$\mathrm{IA_{anual}} = \frac{\mathrm{P_{anual}}}{(\mathrm{T_{anual}}+10)} \qquad \mathrm{IA_{mes}} = 12 \cdot \frac{\mathrm{P_{mes}}}{(\mathrm{T_{mes}}+10)}$$

Para analizar la evolución del clima se elaboraron análisis de tendencia (τ). Dada la no normalidad en las series de precipitación y con el propósito de aplicar una única metodología de análisis para todas las series de datos, se aplicó el test no paramétrico de rangos de Mann-Kendall [29-30] a un nivel de significancia estadística del 5%, calculando la pendiente de Sen [31] como cuantificador de la tendencia. Así mismo, se empleó la mediana como medida más adecuada de la tendencia central de distribuciones de datos debido al régimen pluviométrico de carácter extremo positivo y negativo que se da en esta región costera asociada al fenómeno ENSO.

2.3. Proyecciones de cambio climático

Para seleccionar el modelo-escenario climático que más se ajusta a las condiciones de la zona de estudio, se llevó a cabo un análisis de la evolución temperatura media y precipitación de 24 modelos climáticos y sus diferentes escenarios de evolución desarrollados por 16 instituciones de investigación y disponibles a través de la web Canadian Climate Change Scenarios Network (www.cccsn.ec.gc.ca) y basados en el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático: BCM2.0-Run 1, CGCM3T47-Mean, CGCM3T63-Run 1, CNRMCM3-Run 1, CSIROMk3.0-Run 1, CSIROMK3.5-Run 1, ECHAM5OM-Mean, ECHO-G-Mean, FGOALS-g1.0-Mean, GFDLCM2.0-Run 1, GFDLCM2.1-Run 1, GISS-AOM-Mean, GISS-EH-Mean, GISS-ER-Run 1, HADCM3-Run 1, HADGEM1-Run 1, INGV-SXG-Run 1, INMCM3.0-Run 1, IPSLCM4-Run 1, MIROC3.2 hires-Run 1, MIROC3.2 MEDRES-Mean, MRI CGCM2.3.2a-Mean, NCARCCSM3-Mean, NCARPCM-Mean.

En este sentido, todos los escenarios son igualmente válidos, y no tienen asignadas probabilidades de hacerse realidad. Los tres escenarios que proponen los modelos fueron tomados de las cuatro familias propuestas por el IPCC, y que describen las relaciones entre las distintas influencias de las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles así como su evolución durante el siglo XXI. Cada línea evolutiva representa un cambio demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental:

- Línea evolutiva y familia de escenarios A1: describe un mundo futuro con rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B)
- Línea evolutiva y escenarios A2: describe un mundo muy heterogéneo con una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- Línea evolutiva y escenarios B1: describe un mundo convergente con una misma población mundial, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos.
- Línea evolutiva y escenarios B2: describe un mundo en el que predominan soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, con aumento progresivo de población mundial aunque a menor ritmo que A2, y niveles de desarrollo económico intermedios.

La elección del modelo climático más adecuado se hizo en base a la comparación de las medias (temperatura), medianas (precipitación) y tendencias históricas (1982-2011) respecto a las proyecciones que arrojan los modelos (2012-2099). Esta hipótesis ya fue empleada por Moratiel et al. (2010) [32] y García-Garizábal et al. (2014) [19] para elaborar predicciones de cambio climático, y es acorde a la propuesta de mantenimiento de tendencias [33-34] en parámetros de calibración-validación de escenarios de cambio climático. En este sentido, al elegir el modelo, la tendencia de temperatura prevaleció sobre la precipitación al resultar un parámetro menos complejo de cálculo en las proyecciones de cambio climático [34-35].

Para organizar la información generada en los 65 escenarios de cambio climático y elegir el escenario de más adecuado para la PSE, se utilizaron las aplicaciones informáticas GCMgen (Global Climate Models generator) [36] y FuCHSIA (Future Climate and Hydrological ScenarIos for environmental management and Assessment) [37], que además de automatizar el proceso de generación de escenarios climáticos de temperatura y precipitación para 2012-2099, ejecuta el cálculo de tendencias según el test de Mann-Kendall.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización climática histórica

La temperatura media anual en la PSE es de 24,3 ºC con una baja variabilidad interanual (CV= 2,7 %; Fig. 2). Intraanualmente se diferencia un periodo de alta temperatura de Diciembre a Mayo (25,8 ºC) y otro de menor temperatura de Junio a Noviembre (22,9 ºC), si bien en ambos la variación de temperaturas también resulta baja (CV= 4,0 a 4,9 %).

La mediana de la precipitación entre 1982-2011 fue de 260,4 mm/año, con una alta variabilidad (CV= 227%) asociada al régimen pluviométrico extremo que se da en esta región costera asociada al fenómeno ENSO y que alcanza los 2579 mm en 1998 (Fig. 2). De igual manera, la precipitación está irregularmente distribuida en el año, con una estación lluviosa de diciembre a mayo en la que ocurre el 97% de la lluvia, y una seca de junio a noviembre con unas precipitaciones prácticamente nulas.

De acuerdo al índice de aridez, el clima de la PSE queda clasificado como Semidesértico árido (IAanual 1982-2011= 7,6), si bien la variabilidad pluviométrica que hay en la zona

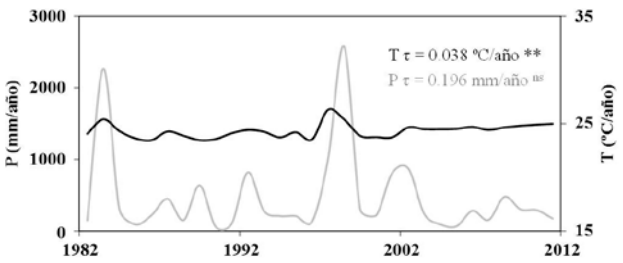


Figura 2. Evolución anual y tendencia (τ) de la temperatura media (T, ºC/año; negro) y la precipitación (P, mm/año; gris) en la zona de estudio el periodo 1982-2011. Significancia estadística: ^{ns} = No significativo; $^{+}$ = p<0,1; * = p<0,05; ** = p<0,01; *** = p<0,001.
Fuente: Los autores.

lleva al índice anual hasta valores anuales de Perhúmedo (IAanual 1998= 72,9) asociado a la ocurrencia de altos eventos de precipitación producto del fenómeno climático de "El Niño". Mensualmente el IA también presenta una alta variabilidad debido a la estacionalidad de las precipitaciones, y mientras que durante la estación seca el clima es siempre Desierto hiperárido (IA= 0), durante la estación de lluviosa varía de Desierto hiperárido (IAdiciembre= 1,2) a Húmedo (IAmarzo= 36,5).

El análisis de la serie histórica de temperatura evidencia un aumento significativo de 0,038 ºC/año, y aunque a nivel mensual todas las tendencias de temperatura resultan positivas, los incrementos mensuales resultan heterogéneos. Así, los mayores valores de tendencia ocurren en el periodo de más altas temperaturas diciembre-mayo con tasas de 0,035 a 0,065 ºC/mes, mientras que entre junio y noviembre los valores de tendencia se sitúan entre los 0,017 ºC/mes y los 0,045 ºC/mes, agrupando los únicos meses en los que las tendencias carecieron de significancia estadística (Fig. 3).

En relación a otros estudios de tendencia de temperatura desarrollados en la costa Pacífica, las tasas de incremento superiores a los 0,01 ºC/año detectados por Vuille et al. (1939-2006) [5] y los 0,025 ºC/año de Falvey y Garreaud (1976-2006) [6] y similares a las 0,036 ºC/año de Mark y Seltzer (1951-1999) [4] en Perú.

En el caso de la precipitación, aunque durante el periodo histórico 1982-2011 se detecta una tasa positiva en la evolución de precipitación de 0,196 mm/año, dicho aumento no fue estadísticamente significativo (Fig. 2).

Así mismo, la evolución de la precipitación mensual tiene un comportamiento irregular, pues aunque se detectan tendencias positivas para la lluvia en enero, febrero y abril, los meses de marzo y diciembre arrojaron tendencias negativas, presentando los meses restantes valores de pendiente de cero, todas ellas carentes de significancia estadística (Fig. 3).

El comportamiento de la precipitación en la PSE resulta similar al encontrado en otras zonas de la costa Pacífica Sudamericana, y a pesar de la amplia variabilidad en los resultados de tendencias reportados, con valores de evolución intraanual positivos y negativos [12-14], se detectan tendencias regionales de carácter positivo en zonas más próximas a las regiones tropicales y tendencias de tipo negativo en zonas más alejadas de los trópicos [5,8].

3.2. Modelos climáticos

Los 24 modelos de cambio climático desarrollados en la PSE arrojan un amplio rango de evolución de la temperatura

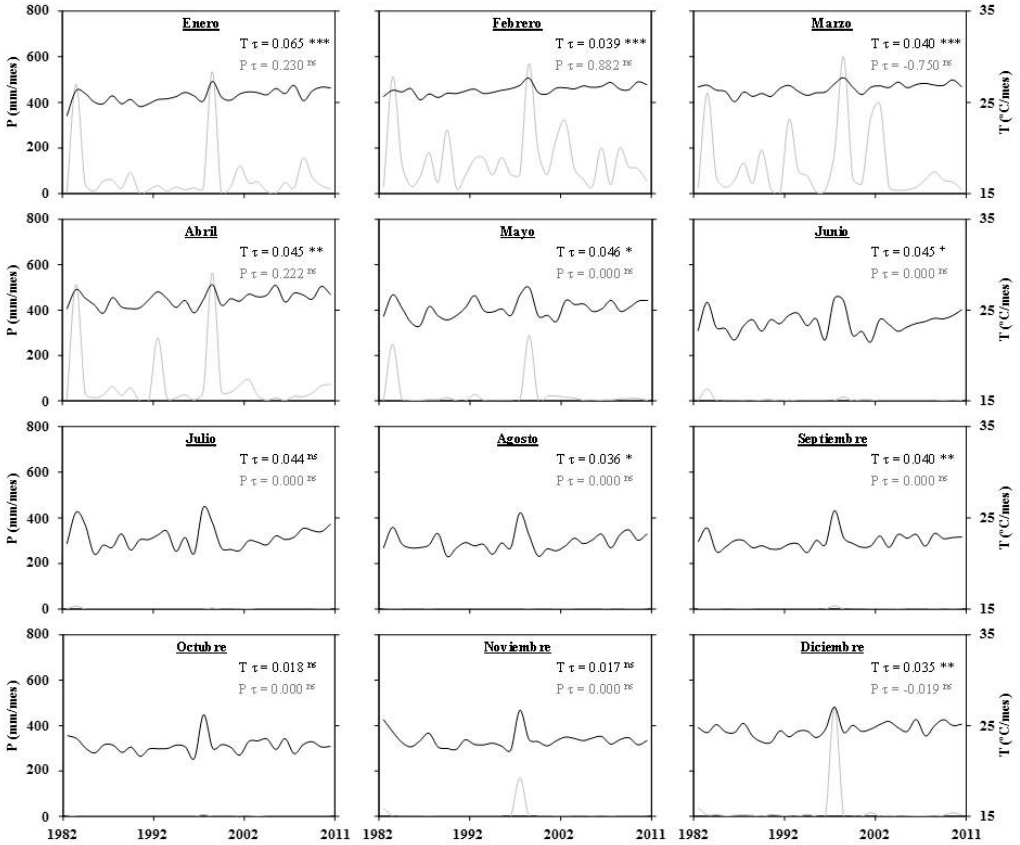


Figura 3. Evolución mensual de la temperatura media (T; negro) de la Precipitación (P; gris) en la zona de estudio para el periodo 1982-2011. Tendencia absoluta (τ; ºC/mes; mm/año). Significancia estadística: ns = No significativo; + = p<0,1; * = p<0,05; ** = p<0,01; *** = p<0,001.
Fuente: Los autores.

Tabla 1.
Valor medio de temperatura media (T) y precipitación (P) anual y tendencia (τ) en la serie histórica (1982-2011) y proyecciones GCM (2012-2099) en la Provincia de Santa Elena. Significancia estadística: ^{ns} = No significativo; $^{+}$ = p<0,1; * = p<0,05; ** = p<0,01; *** = p<0,001.

		T ºC/año	T τ ºC/año	P mm/año	P τ mm/año			T ºC/año	T τ ºC/año	P mm/año	P τ mm/año
Histórico		24,3	0,038***	260,4	0,196 ^{ns}	GISSAOM	A1B	25,3	0,022***	299,7	0,409 ^{ns}
BCM2	A1B	25,4	0,028***	454,3	0,068 ^{ns}	GISSAOM	B1	25,1	0,016***	272,1	0,258 ^{ns}
BCM2	A2	25,4	0,035***	454,6	0,779 ^{ns}	GISSEH	A1B	25,4	0,023***	252,4	0,123 ^{ns}
BCM2	B1	25,0	0,019***	596,7	2,033 ^{ns}	GISSER	A1B	25,6	0,022***	386,7	0,867 ^{ns}
CGCM3P47	A1B	25,9	0,029***	277,7	0,249 ^{ns}	GISSER	A2	25,8	0,027***	402,5	3,151*
CGCM3T47	A2	26,2	0,040***	254,6	0,145 ^{ns}	GISSER	B1	25,3	0,011***	397,5	1,018 ^{ns}
CGCM3T47	B1	25,5	0,018***	270,7	0,156 ^{ns}	HADCM3	A1B	26,4	0,040***	308,6	0,388 ^{ns}
CGCM3T63	A1B	25,8	0,026***	300,8	0,554 ^{ns}	HADCM3	A2	26,5	0,051***	315,8	0,914 ^{ns}
CGCM3T63	A2	26,1	0,036***	282,5	0,419 ^{ns}	HADCM3	B1	25,8	0,025***	279,4	0,052 ^{ns}
CGCM3T63	B1	25,5	0,017***	273,8	0,327 ^{ns}	HADGEM1	A1B	25,9	0,035***	322,4	-0,069 ^{ns}
CNRMCM3	A1B	26,1	0,028**	682,2	0,687 ^{ns}	HADGEM1	A2	25,9	0,043***	310,8	0,343 ^{ns}
CNRMCM3	A2	26,1	0,049***	580,2	3,446 ^{ns}	INGVSXG	A1B	25,9	0,026***	322,1	0,690 ^{ns}
CNRMCM3	B1	25,4	0,017*	679,2	1,331 ^{ns}	INGVSXG	A2	26,1	0,037***	357,5	0,422 ^{ns}
CSIROMK30	A1B	25,4	0,027***	264,3	0,517 ^{ns}	INMCM30	A1B	25,8	0,020***	276,5	0,441 ^{ns}
CSIROMK30	A2	25,7	0,031***	264,8	0,294 ^{ns}	INMCM30	A2	26,0	0,032***	253,7	0,202 ^{ns}
CSIROMK30	B1	25,1	0,019***	259,7	0,365 ^{ns}	INMCM30	B1	25,5	0,018***	262,1	0,348 ^{ns}
CSIROMK35	A1B	26,1	0,034***	297,3	0,723 ^{ns}	IPSLCM4	A1B	26,0	0,036***	282,4	0,835 ^{ns}
CSIROMK35	A2	26,2	0,041***	265,5	0,649 ^{ns}	IPSLCM4	A2	26,1	0,043***	296,4	1,070 ^{ns}
CSIROMK35	B1	25,7	0,022***	269,5	0,045 ^{ns}	IPSLCM4	B1	25,5	0,020***	272,6	0,351 ^{ns}
ECHAM5OM	A1B	26,2	0,042***	298,5	1,860 $^{+}$	MIROC32H	A1B	26,5	0,039***	264,8	0,038 ^{ns}
ECHAM5OM	A2	26,1	0,048***	307,0	1,752 $^{+}$	MIROC32H	B1	26,0	0,026***	281,4	0,476 ^{ns}
ECHAM5O	B1	25,6	0,028***	337,1	0,957 ^{ns}	MIROC32M	A1B	25,9	0,033***	253,8	0,412 ^{ns}
ECHOG	A1B	25,9	0,033***	280,5	0,212 ^{ns}	MIROC32M	A2	26,0	0,040***	239,9	0,139 ^{ns}
ECHOG	A2	25,9	0,039***	276,5	0,199 ^{ns}	MIROC32M	B1	25,4	0,021***	245,9	0,426 ^{ns}
ECHOG	B1	25,4	0,019***	268,9	0,090 ^{ns}	MRICGCM32A	A1B	25,6	0,025***	360,7	1,605 ^{ns}
FGOALS	A1B	25,5	0,027***	328,9	0,942 ^{ns}	MRICGCM32A	A2	25,6	0,031***	350,3	2,077 $^{+}$
FGOALS	B1	25,2	0,017***	309,9	0,665 ^{ns}	MRICGCM32A	B1	25,2	0,019***	357,8	1,454 ^{ns}
GFDLCM20	A1B	25,8	0,028***	264,0	0,243 ^{ns}	NCARCCSM3	A1B	25,7	0,021***	255,1	0,581 ^{ns}
GFDLCM20	A2	25,9	0,032***	255,5	0,429 ^{ns}	NCARCCSM3	A2	25,9	0,035***	242,0	0,750 ^{ns}
GFDLCM20	B1	25,3	0,015***	255,8	0,204 ^{ns}	NCARCCSM3	B1	25,2	0,011***	262,7	0,511 ^{ns}
GFDLCM21	A1B	25,6	0,025***	313,5	0,362 ^{ns}	NCARPCM	A1B	25,2	0,019***	253,7	-0,210 ^{ns}
GFDLCM21	A2	25,8	0,031***	293,0	0,227 ^{ns}	NCARPCM	A2	25,2	0,024***	256,1	-0,134 ^{ns}
GFDLCM21	B1	25,2	0,014***	297,8	0,136 ^{ns}	NCARPCM	B1	24,8	0,008*	267,8	0,222 ^{ns}

Fuente: Los autores.

y precipitación anual, y mientras todas las combinaciones de modelo-escenario predicen para el periodo 2012-2099 aumentos en la temperatura, en el caso de la precipitación un 18% de los escenarios indican descensos en los aportes de las lluvias con respecto al escenario histórico de referencia 1982-2011 (Tabla 1).

Así, las diferentes combinaciones de escenarios predicen para el periodo 2012-2099 tendencias de carácter positivo para la temperatura, de entre 0,008 ºC/año con un aumento medio de +0,44ºC en el escenario NCARPCM B1 y los 0,051 ºC/año e incremento medio de la temperatura de +2,16 ºC en el escenario HADCM3 A2, frente a los más heterogéneos resultados de la precipitación, con tasas que variaron entre los -0,21 mm/año y descenso en la lluvia del -2,6% en el escenario NCARPCM A1B y los +3,45 mm/año con aumento de la lluvia un 122,7% en el escenario CNRMCM3 A2 (Tabla 1).Sólo 12 de los 65 escenarios de temperatura presentaron valores de tendencia positivos del mismo orden o superiores al del escenario histórico, que los califican como candidatos según el criterio de mantenimiento-incremento de tendencias [33]. En el caso de la precipitación, 62 de los escenarios arrojan valores de tendencia positiva, al igual que la serie de referencia 1982-2011.

De los 12 posibles escenarios de temperatura, sólo los correspondientes al modelo ECHOG A2 y MIROC32HIRES A1B con una tendencia de 0,039 ºC/año, presentan la tasa de incremento más similar a la de la serie histórica 1982-2011 de 0,038 ºC/año. En cambio, para la precipitación, sólo el modelo ECHOG en el escenario A2 que presenta una tendencia de 0,199 mm/año, tiene el valor de pendiente más parecido al del escenario de referencia de 0,196 mm/año.

De esta manera, considerando los resultados de tendencia de los 65 escenarios de cambio climático construidos, parece apropiado indicar que el escenarios A2 del modelo ECHOG es el más adecuado para reproducir las características climáticas de la PSE.

3.3. Proyecciones climáticas

Durante el periodo 2012-2099, el escenario de evolución ECHOG A2 arroja un incremento tanto de la temperatura como de la precipitación, y aunque dicho aumento ocurre de manera irregular durante el periodo analizado, si bien para todo el periodo simulado se determina una aumento en la temperatura media de 1,6 ºC y del 6,2% en la precipitación con respecto al escenario de referencia (Fig. 4).

La variabilidad de la temperatura media anual se incrementa gradualmente desde la serie histórica, y aunque durante 2012-2040 hay un aumento en la temperatura de 0,51 ºC, su variabilidad se mantiene en el 2,8%. De igual manera, aunque durante el treintenio 2041-2070 la temperatura pasa a

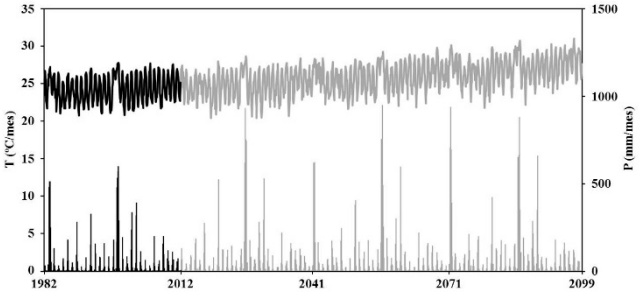


Figura 4. Evolución anual de la temperatura media (T; ºC/año) y precipitación (P; mm/año) para el periodo 1982-2011 (negro) y según los datos de la proyección climática del modelo ECHOG en el escenario A2 para el periodo 2012-2099 (gris) en la Provincia de Santa Elena.
Fuente: Los autores.

incrementarse 1,56 ºC respecto al periodo de referencia, el coeficiente de variación apenas presenta cambios al mantenerse en el 3,2%, variabilidad que se mantiene en el 3,3 % entre 2071-2099 pero con un aumento de temperatura de 2,71 ºC respecto a la serie histórica.

Mensualmente, la evolución de la temperatura en el escenario ECHOG A2 siguen un comportamiento análogo a las de la serie de 1982-2011 tanto en valores de pendiente como en los niveles de significancia estadística, a excepción de los meses históricos de enero, en el que la tasa de aumento resulta muy superior al del resto del año, y octubre-noviembre, en los que las tasas de incremento resultan más bajas a las del conjunto anual (Tabla 2).

La precipitación presenta una irregular evolución durante el siglo XXI, pues aunque para el periodo más inmediato 2012-2040 la mediana de la precipitación (262,2 mm/año) apenas presenta variación con respecto al escenario histórico (260,4 mm/año), sí hay un aumento en los valores de máxima precipitación anual hasta los 3341 mm, aunque manteniendo su variabilidad (CV= 240%).

Este comportamiento se repite durante los siguientes treintenios, donde además de repetirse valores precipitación anual similares a los del periodo histórico, las medianas de la precipitación aumentan ligeramente ($P_{2041-2070}$= 276,1 mm/año; $P_{2071-2099}$= 281,8 mm/año) y los máximos de precipitación anual superan los 3000 mm.

Los escenarios mensuales de precipitación según el modelo ECHOG A2, reflejan en su mayoría unas tendencias de evolución muy similares a las de la serie histórica, especialmente durante el periodo de abril a noviembre, con los menores aportes de lluvia. En cambio, los meses con mayores precipitaciones acumulan valores máximos de pendiente en la serie histórica, si bien para el periodo 2011-2099 las pendientes positivas se reducen a la tercera parte y la mitad en enero y febrero mientras que las negativas de marzo y diciembre pasan a positivas (Tabla 2).

En cuanto al índice de aridez, según la evolución climática del escenario ECHOG A2, durante los tres treintenios del siglo XXI el valor de IA se sitúa entre 7,5-7,6, quedando el clima clasificado como Semidesértico árido, mismas características al establecido en el periodo histórico 1982-2011 (Tabla 3).

Tabla 2.
Tendencias (τ) mensuales y anual para la temperatura media (T; ºC/año) y precipitación (P; mm/año) en la serie histórica (1982-2011) y la proyección del modelo ECHOG A2 (2012-2099) en la Provincia de Santa Elena. Significancia estadística: ^{ns} = No significativo; $^{+}$ = p<0,1; * = p<0,05; ** = p<0,01; *** = p<0,001.

	1982-2011		2012-2099	
	τ T ºC/año	τ P mm/año	τ T ºC/año	τ P mm/año
Enero	0,065***	0,230 ^{ns}	0,034***	0,079 ^{ns}
Febrero	0,039***	0,822 ^{ns}	0,035***	0,420 ^{ns}
Marzo	0,040***	-0,750 ^{ns}	0,036***	0,002 ^{ns}
Abril	0,045**	0,222 ^{ns}	0,040***	0,019 ^{ns}
Mayo	0,046*	0,000 ^{ns}	0,044***	0,009 ^{ns}
Junio	0,045 $^{+}$	0,000 ^{ns}	0,040***	0,000 ^{ns}
Julio	0,044 ^{ns}	0,000 ^{ns}	0,048***	0,000 ^{ns}
Agosto	0,036*	0,000 ^{ns}	0,045***	0,000 ^{ns}
Septiembre	0,040**	0,000 ^{ns}	0,034***	0,000 ^{ns}
Octubre	0,018 ^{ns}	0,000 ^{ns}	0,033***	0,000 ^{ns}
Noviembre	0,017 ^{ns}	0,000 ^{ns}	0,039***	0,000 ^{ns}
Diciembre	0,035**	-0,019 ^{ns}	0,035***	0,000 ^{ns}
Anual	0,038***	0,196 ^{ns}	0,039***	0,199 ^{ns}

Fuente: Los autores.

Tabla 3.
Valores mensuales y anual del Índice de Aridez (IA) en la serie histórica 1982-2011 y para los treintenios 2012-2040, 2041-2070 y 2071-2099 según la proyección del modelo ECHOG A2, y tendencias (τ) para el periodo 2012-2099 en la Provincia de Santa Elena. Significancia estadística: ^{ns} = No significativo; $^{+}$ = p<0,1; * = p<0,05; ** = p<0,01; *** = p<0,001.

	1982-2011		2012-2099		2012-2040	2041-2070	2071-2099
	IA	τ IA	IA	τ IA	IA	IA	IA
Enero	9,3	0,068 ^{ns}	10,2	0,017 ^{ns}	9,4	10,6	10,5
Febrero	36,5	0,192 ^{ns}	35,7	-0,016 ^{ns}	38,8	34,7	35,6
Marzo	19,4	-0,240 ^{ns}	22,1	-0,008 ^{ns}	21,8	22	26,8
Abril	8,6	0,066 ^{ns}	9,9	0 ^{ns}	9,5	10,5	8,8
Mayo	1,3	0 ^{ns}	1,3	0,002 ^{ns}	1,2	1,4	1,9
Junio	0,1	0 ^{ns}	0,1	0 ^{ns}	0	0,1	0,1
Julio	0	0 ^{ns}	0	0 ^{ns}	0	0	0
Agosto	0,1	0 ^{ns}	0,1	0 ^{ns}	0	0,1	0,1
Septiembre	0,1	0 ^{ns}	0,1	0 ^{ns}	0,1	0,1	0,1
Octubre	0	0 ^{ns}	0	0 ^{ns}	0	0	0
Noviembre	0	0 ^{ns}	0	0 ^{ns}	0	0	0
Diciembre	1,2	-0,009 ^{ns}	1	0 ^{ns}	1	1,2	0,9
Anual	7,6	0,008 ^{ns}	7,7	0,000 ^{ns}	7,5	7,7	7,6

Fuente: Los autores.

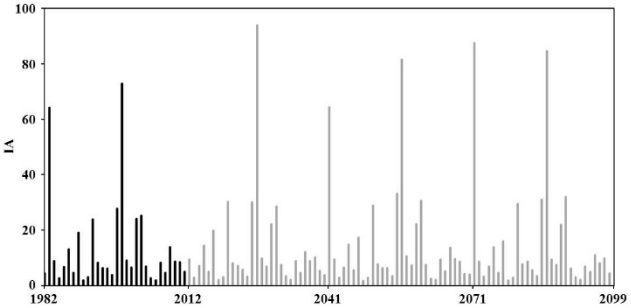


Figura 5. Evolución anual del Índice de Aridez (IA) para el periodo 1982-2011 (negro) y según los datos de la proyección climática del modelo ECHOG en el escenario A2 para el periodo 2012-2099 (gris) en la Povincia de Santa Elena.
Fuente: Los autores.

La evolución anual del IA en 2012-2099 no presenta cambios respecto al periodo histórico 1982-2011, con valores de tendencia próximos a cero para ambos periodos de tiempo (Tabla 3). De esta manera, mientras que en periodos de baja ocurrencia de precipitaciones el clima quedaría clasificado como Desértico hiperárido, en el caso de periodos con eventos de alta precipitación asociados al fenómeno ENOS llega a clasificarse como Perhúmedo (Fig. 5).

A escala mensual, aunque en su mayoría los valores de IA calculados a partir del escenario ECHOG A2 presentan valores similares a los establecidos para el periodo de referencia 1982-2011, durante los meses de la estación de lluvias hay ciertas variaciones en la clasificación climática, a pesar de que los análisis de tendencias no establecen cambios significativos en la evolución de los IA (Tabla 3).

De esta manera, por al aumento que se espera en las precipitaciones para el siglo XXI, entre enero y abril los valores de IA incrementan su valor disminuyendo la aridez de la región, transformándose los valores de enero y abril de Semidesértico árido a Semiárido mediterráneo y de marzo de Semiárido mediterráneo a Subhúmedo, manteniéndose febrero como el mes menos árido con un clima Húmedo.

Por lo tanto, de acuerdo al escenario climático proyectado para la PSE, aunque se espera un mantenimiento de las condiciones climáticas en la región para el siglo XXI con un clima Semidesértico árido, sí se detectan pequeñas variaciones en la dinámica climática intraanual durante el periodo de asociado a la ocurrencia precipitaciones, con un aumento de las lluvias y una disminución de la aridez de la zona entre los meses de enero y abril.

4. Conclusiones

El análisis de la serie climática histórica (1982-2011) de temperatura media y precipitación de la Provincia de Santa Elena permite clasificar a la región según el índice de Aridez de De Martonne como de clima Semidesértico árido, si bien la intensa variabilidad climática intraanual que se da en la zona provoca una variación de climas extremos desde Desierto hiperárido a Húmedo.

La temperatura media y precipitación entre 1982-2011 arrojan tasas de evolución positivas de 0,038 ºC/año y 0,196 mm/año, con una heterogénea dinámica mensual. Mientras la temperatura muestra valores positivos de pendiente de 0,017 ºC/mes a 0,065 ºC/mes, la precipitación presenta tendencias positivas en enero, febrero y abril de 0,22 mm/mes a 0,82 mm/mes, tendencias negativas en diciembre y marzo de -0,02 mm/mes y -0,75 mm/mes y tendencias de cero los meses restantes.

Los modelos y escenarios climáticos muestran una amplia posibilidad de evoluciones climáticas, si bien adaptados a las condiciones locales de los datos históricos de la Provincia de Santa Elena, permite determinar el modelo ECHOG en su escenario A2 como el más adecuado para la ejecución de proyecciones climáticas.

Los resultados de la proyección climática (2011-2099) del escenario ECHOG A2 arroja incrementos anuales en la temperatura media de +2,7 ºC y de la precipitación del +8,2%, y si bien la variabilidad de los valores de temperatura se mantienen durante el siglo XXI, en el caso de la precipitación ocurre un aumento de los valores máximos de precipitación anual.

Los análisis de tendencia arrojan tasas de evolución mensual positivas para la temperatura y la precipitación siguiendo un comportamiento parecido al de la serie histórica de 1982-2011. No obstante los resultados son más acertados para la temperatura, al resultar un parámetro menos complejo de cálculo en las proyecciones climáticas.

A pesar de la evolución climática que está ocurriendo en la Provincia de Santa Elena, el Índice de Aridez de De Martone no manifiesta cambios anuales para los periodos 2012-2040, 2041-2070 y 2071-2099 al mantenerse un clima Semidesértico árido. Sin embargo, a escala mensual, la mayor ocurrencia de precipitaciones durante los meses de la estación lluviosa de enero a abril, motivará la reducción del grado de aridez de la región y el paso de un clima Semidesértico árido a Semiárido mediterráneo y de Semiárido mediterráneo a Subhúmedo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al Proyecto PROMETEO de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación – SENESCYT. Agradecer al Ing. Raúl Mejía del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI y al Suboficial Henry Gálvez del Instituto Oceanográfico de la Armada – INOCAR por la información facilitada para este trabajo.

Bibliografía

[1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC. 2007.

[2] IPCC. Climate change and water. Cambridge University Press, Cambridge, 2008.

[3] Rosenblüth, N., Fuenzalida, H.A. and Aceituno, P., Recent temperature variations in southern South America. International Journal of Climatology, 17, pp. 67–85, 1997.

[4] Mark, B.G. and Seltzer, G.O., Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962–1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. Quaternary Science Reviews, 24, pp. 2265-2280, 2005.

[5] Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B.G. and Bradley, R.S., Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. Earth-Science Reviews, 89, pp. 79-96, 2008.

[6] Falvey, M. and Garreaud, R.D., Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). Journal of Geophysical Research, 114, D04102, 2009. DOI:10.1029/2008JD010519

[7] Seiler, C., Hutjes, R.W.A. and Kabat, P., Climate variability and trends in Bolivia. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52, pp. 130-146, 2013.

[8] Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M. and Keimig, F., 20th Century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. Climatic Change, 59, pp. 75-99, 2013.

[9] Marengo, J.A., Rusticucci, M., Penalba, O. and Renom, M., An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. Climatic Change, 98, pp. 509-529. 2010. DOI: 10.1007/s10584-009-9743-7

[10] Carmona, A.M. and Poveda, G., Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. Climatic Change, 123, pp. 301-313, 2014. DOI:

10.1007/s10584-013-1046-3
[11] Pinilla, M.C. y Pinzón, C., Caracterización de eventos extremos asociados a la precipitación usando RClimdex, en la parte central del departamento de Santander, Colombia. 8 Congreso Internacional Asociación Española de Climatología. Cambio climático. Extremos e impactos. Salamanca, España, 2012.
[12] Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W. and Feyen, J., Space–time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. Hydrological Processes, 21, pp. 3316-3327, 2007.
[13] Lavado-Casimiro, W.S, Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J.C. and Guyot, J.L., Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon–Andes basin over the last 40 years (1965–2007). Hydrological Processes, 27, pp. 2944-2957, 2012.
[14] Pizarro-Tapia, R., Cabrera-Jofre, C., Morales-Calderón, C. and Flores-Villanelo, J.P., Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glaciar en la producción de agua (1963-2006). Tecnología y Ciencias del Agua, 2, pp. 5-19, 2011.
[15] Souvignet, M., Oyarzún, R., Verbist, K.M.J, Gaese, H. and Heinrich, J., Hydro-meteorological trends in semi-arid north-central Chile (29–32°S): Water resources implications for a fragile Andean region, Hydrological Sciences Journal, 57(3), pp. 479-495, 2012. DOI: 10.1080/02626667.2012.665607
[16] Hurtado-Montoya, A.F. and Mesa-Sánchez, O.J., Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory. DYNA, 81(186), pp. 251-258, 2014.
[17] Vicente-Serrano, S.M. and Cuadrat-Prats, J.M., Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro Valley (NE of the Iberian Peninsula) during the second half of the twentieth century. Theoretical and Applied Climatology, 88, pp. 247-258, 2007.
[18] Gonzalez-Hidalgo, J.C., Brunetti, N. and Luis, M., A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-Novembre 2005). International Journal of Climatology, 31, pp. 715-731, 2011.
[19] García-Garizábal, I. Causapé, J., Abrahao, R. and Merchán, D., Impact of climate change on Mediterranean irrigation demand: Historical dynamics of climate and future projections. Water Resource Management, 28, pp. 1449-1462, 2014.
[20] Strub, P.T., Mesías, J.M., Montecino, V., Rutllant, J. and Salinas, S., Coastal ocean circulation off western South America coastal segment. The Sea (Chapter 10). John Wiley & Sons, Inc. 1998.
[21] Thiel, et al., The Humboldt current system of northern and central Chile oceanographic processes, ecological interactions and socioeconomic feedback. Oceanography and Marine Biology: An Annual Review, 45, pp. 195-344, 2007.
[22] Montecino, V. and Lange, C.B., The Humboldt current system: Ecosystem components and processes, fisheries, and sediment studies. Progress in Oceanography, 83, pp. 65-79, 2009.
[23] Cañadas, L., El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. Banco Central del Ecuador, 1983.
[24] Peel, M.C., Finlayson, B.L. and McMahon, T.A., Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences, 11, pp. 1633-1644, 2007. DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007.
[25] Recalde-Coronel, G.C., Barnston, A.G. and Muñoz, A.G., Predictability of December–April rainfall in coastal and Andean Ecuador. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53, pp. 1471-1493, 2014.
[26] García-Garizábal, I. and Romero, P., Homogeneous temperature series for thermal characterization and detection of trends in the Province of Santa Elena, Ecuador. International Journal of Climatology, 36(8), pp. 3129-3138, 2016. DOI: 10.1002/joc.4541
[27] García-Garizábal, I., Rainfall variability and trend detection in coastal arid Ecuador. International Journal of Climatology. 2013. Under review.
[28] De Martonne, E., Aréisme et índice artidite. Compte Rendus de L'Acad., Paris, 182, pp. 1395-1398. 1926.
[29] Mann, H.B., Nonparametric test against trend. Econometrica, 13, pp. 245-259, 1945.
[30] Kendall, M.G., Rank correlation method. Griffin, London, 1975.
[31] Sen, P.K., Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63, pp.1379-1389, 1968.
[32] Moratiel, R., Durán, J.M. and Snyder, R.L., Responses of reference evapotranspiration to changes in atmospheric humidity and air temperature in Spain. Climate Research, 44, pp. 27-40, 2010.
[33] Milly, P.C.D, Dunne, K.A. and Vecchia, A.V., Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. Nature, 438, pp. 347-350, 2005. DOI: 10.1038/nature04312
[34] IPCC-TGICA, General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 2007.
[35] Errasti, I., Ezcurra, A., Sáenz, J. and Ibarra-Berastegi, G., Validation of IPCC AR4 models over the Iberian Peninsula. Theoretical and Applied Climatology, 103, pp. 61-79, 2011.
[36] García-Garizábal, I. and Carrillo-Espinoza, C., Global climate models generator, 2016.
[37] García-Garizábal, I. and Carrillo-Espinoza, C., FuCHSIA: Future climate and hydrological scenarios for environmental management and Assessment, 2016.

I. García-Garizábal, es Lic. en Geología en 2005 y Dr. en Geología en 2010, por la Universidad de Zaragoza, España. Ha trabajado en la evaluación de estudios hidrológicos, gestión de recursos hídricos y cambio climático prestando sus servicios en el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (España), Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador) y como profesional libre.
ORCID: 0000-0001-9341-0911

P. Romero, es Ing. de Minas en 2002, por la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador y Dra. en Ingeniería de los Recursos Minerales, Materiales, Energía y Medio Ambiente en 2010 por la Universidad Politécnica de Madrid – UPM, España. Ha trabajado desarrollando estudios hidrogelógicos aplicados a la gestión de recursos hídricos y del medio ambiente, prestando sus servicios en el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador) y como profesional libre.
ORCID: 0000-0002-3751-2662

S. Jiménez, es Ing. de Minas en 2008 por la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador y MSc en Investigación, Modelización y Análisis de Riesgo en Medio Ambiente en 2010, por la Universidad Politécnica de Madrid – UPM, España. Ha trabajado desarrollando estudios hidrogelógicos aplicados a la gestión de recursos hídricos, medio ambiente y gestión minera. Su actividad profesional se ha llevado a cabo en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador), Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM, Ecuador) y como profesional libre.
ORCID: 0000-0002-3538-6754

L. Jordá, es Ing. de Minas en 1998 y Dr. en 2009 por la por la Universidad Politécnica de Madrid – UPM, España. Su labor profesional se ha dedicado al desarrollo de estudios geotécnicos y de afección hidrogeológica, prestando sus servicios en empresas como Geoconsult (España), Incosa (Perú), Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador), Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y como profesional libre.
ORCID: 0000-0002-2332-5647

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Dam failure Vega de Tera, hydraulic simulation of the flood propagation (Zamora, Spain)

José Luis Prieto Calderón[a], Roberto Martínez-Alegría López[b], Javier Taboada Castro[a], Isabel Montequi Martín[b] & Germán Sanz Lobón[c]

[a] *Escola de Enxeñaría de Minas e Enerxía, Universidad e Vigo, Campus Lagoas-Marcosende, Pontevedra, Spain. joseluisprieto@usal.es, jtaboada@uvigo.es*
[b] *Universidad Europea Miguel de Cervantes, Valladolid, Spain. rmartinez@uemc.es, imontequi@uemc.es*
[c] *Instituto de Química. Universidade Federal de Goiás – UFG, Campus Samambaia, Goiânia – GO, Brazil. gsl9384@yahoo.com*

Received: October 13th, de 2016. Received in revised form: July 5th, 2017. Accepted: September 25th, 2017

Abstract
The dam failure of Vega de Tera in 1959 was a milestone on the engineering and risk perception of dam in Spain. The back analysis of dam failure and hydraulic model let us improve the spatial planning and the risk assessment. So the main core of this paper is to reconstruct the dam break and compute the spread flow generated, for this task we have been simulated the hydrograph and the peak flow. In this way, has been developed a HEC-RAS hydraulic model. The model shows that the dam failure was an almost instant (26 min), with a maximum flow of 13000 m3 / s (maximum speed 30 m/s, and maximum draft 24 m). Finally, all the hydraulic results corroborate the great destruction generated and the catastrophic scenario observed in the historical images.

Keywords: risk: hydraulic model; flood: Vega de Tera dam; spatial planning.

Rotura de la presa de Vega de Tera, simulación hidráulica de la propagación de la avenida (Zamora, España)

Resumen
La rotura de la presa de Vega de Tera en 1959 supuso un hito en la ingeniería y en la percepción del riesgo de las presas a nivel nacional. Los estudios y modelos retrospectivos de la rotura son herramientas que permite mejorar la planificación territorial y la evaluación de los riesgos de este tipo de infraestructuras. El objetivo de este trabajo es reconstruir la rotura de la presa y simular la avenida generada. Para ello se ha reproducido el hidrograma, estimado el caudal punta y se ha construido un modelo hidráulico en HEC-RAS. El modelo permite afirmar que se trató de una rotura prácticamente instantánea (26 min), con un caudal punta de 13000 m3/s (velocidad y calado máximos de 30 m/s, y de 24 m). Finalmente todos los resultados hidráulicos corroboran la gran destrucción generada y el escenario catastrófico observado en las imágenes históricas.

Palabras clave: riesgo; modelo hidráulico; inundación; presa de Vega de Tera; planificación territorial.

1. Introducción

Las catástrofes, ya sean de origen natural o no, son objeto de interés social y económico debido a los grandes impactos que llevan asociados [1]. En este sentido la rotura de la presa de Vega de Tera en 1959 supuso un hito en la ingeniería y la vigilancia de las obras hidráulicas y en la percepción del riesgo de las presas a nivel nacional [2].

Dado el tiempo trascurrido desde la rotura de la presa, no se dispone de una cartografía precisa de la onda de avenida, ni consecuentemente de sus características hidráulicas. La falta de datos en el estudio de fenómenos pretéritos es una pauta recurrente, pero el uso de las fuentes documentales gráficas y el análisis pormenorizado del proyecto de la presa permiten la reconstrucción del paisaje y contexto geográfico urbano de la zona. El examen de los mapas, planos, climo-

How to cite: Prieto, J.L., Marínez-Alegría-López, R., Taboa J., Montequi, I. and Sanz, G., Rotura de la presa de Vega de Tera, simulación hidráulica de la propagación de la avenida (Zamora, España) DYNA, 84(203), pp. 45-54, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

diagramas, hidrogramas, fotografías, etc. que acompañaban a los informes técnicos, constituyen una fuente objetiva de datos [3].

Los estudios retrospectivos de rotura contribuyen en la mejora de la evaluación de los riesgos de este tipo de infraestructuras. Aunque este tipo de trabajos no son muy frecuentes, debido a la complejidad en la obtención de datos fiables, se ha puesto de manifiesto su interés después de desastres como el de la mina de "La Luciana" en 1960 (Cantabria, España) [4], la mina de Aznalcóllar (Sevilla, España) en 1998 [5] o más recientemente la rotura de la presa de Fundão (Mariana, Minas Gerais, Brasil) en 2015 con más de 18 fallecidos [6].

Por tanto, y usando como punto de partida el proyecto constructivo de la presa de Vega de Tera, se ha efectuado una simulación hidráulica de la rotura y de la propagación de la avenida generada.

2. Antecedentes

2.1. Evolución histórica de los modelos hidráulicos

El análisis de las consecuencias de la rotura de una presa tiene como objetivos: la predicción del hidrograma de salida de la presa, la determinación de las propiedades hidráulicas y la propagación espacial de la avenida generada.

Existen diversos métodos para el estudio de la formación y propagación de las ondas de rotura de presas. Pero debido a las condicionantes orográficas y fisiográficas (altas pendientes, rugosidades y velocidades de propagación) se ha optado por utilizar el método Mixto Hidrológico-Hidráulicos en régimen permanente.

Respecto a los modelos de rotura, la referencia básica es el modelo numérico DAMBRK (*Dam-Break Flood Forecasting Model*) desarrollado por el US National Weather Service [7,8]. Proporciona directamente resultados en términos de cota máxima de lámina alcanzada y velocidad del agua, por lo que la determinación del área inundada y de las características de la inundación también es directa. A partir de él, el *"United States Army Corps of Engineers (USACE)"* y el *"Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC)"*, del ejército de los EE.UU. desarrolló los bien conocidos paquetes de software HEC. Los desarrollos realizados en programación de simulación de avenidas disponibles en el mercado, fueron analizados por la Comisión Internacional de Grandes Presas "*International Commission On Large Dams*" (ICOLD). La comisión analizó 27 modelos disponibles hasta esa fecha, y cómo se adecua cada uno de ellos a las características de la onda de inundación [9].

En los últimos 15 años algunos de estos modelos han ido evolucionando, sobre todo en aspectos relacionados con la ergonomía y facilidad de uso en entornos más amigables, así como en aspectos relativos a su conectividad con los sistemas de información geográfica (SIG), facilitando enormemente la gestión de la información espacial. En la actualidad, la calidad y fiabilidad de los paquetes HEC, ya avalada por el ICOLD en 1998, continua su adaptación tecnológica con los avances en *software* y *hardware*, y amplía su conectividad con herramientas SIG, mediante las extensiones HEC-GeoRAS o HEC-GeoHMS, así como la política de distribución como herramientas gratuitas, aunque sujetas a unas condiciones de uso explicitadas en los *"Terms and Conditions of Use for HEC Software"*, han dado lugar a que estos paquetes sean en este momento de los que tienen una mayor aceptación en el mundo de la hidráulica de avenidas.

En España en los últimos años y desde ámbitos universitarios de investigación se han desarrollado algunos modelos hidráulicos interesantes como el IBER, que simula el flujo en lámina libre, y es el resultado de la integración de los modelos CARPA (de la Universidad Politécnica de Catalunya) y TURBILLON (de la Universidad de Coruña). Dicho modelo en dos dimensiones incluye dentro sus múltiples aplicaciones la simulación de roturas de presas [10].

2.2. Evaluación de daños, calado y velocidad

El USACE, ya en 1996, resaltó la importancia de factores como la velocidad y el calado, junto con la duración, la carga de sedimentos, la frecuencia, la alerta temprana o las características de las edificaciones, como variables prioritarias en la evaluación de daños [11]. Dado que el caso estudiado supone la reconstrucción de las variables de una avenida instantánea y de corta duración generada por la rotura de una presa en el tramo alto de un río, y a finales de la década de los 50 del siglo XX; las variables de frecuencia, duración, alerta temprana o carga de sedimentos se pueden obviar, centrándose la evaluación de daños en las variables de calado y velocidad de la corriente.

El calado es la altura alcanzada por el agua con respecto a la localización de cada elemento en riesgo. Se trata del parámetro clave para caracterizar una inundación. Suele ser tomado como referencia esencial para medir el alcance del evento a la hora de construir curvas o funciones de daños.

La velocidad del agua es el otro de los parámetros analizados. A una baja velocidad (menos de 1 m/s), las inundaciones son relativamente poco peligrosas. En cambio, si la inundación se mueve a gran velocidad, además de incrementarse la peligrosidad, aumentan de forma significativa los daños directos por arrastres.

Sin embargo, son las relaciones calado-velocidad las que permiten precisar la capacidad destructiva de una avenida. Así las principales magnitudes de daño de las relaciones calado-velocidad se pueden resumir en:

a) Las que parten del análisis de daños producidos por la rotura de una presa. Establecen 3 umbrales (bajo, significativo y alto) en función de la magnitud de los daños causados [12].
b) Las que parten de las curvas velocidad-calado y determinan la capacidad de daño y el riesgo en cuatro categorías (Nulo, daños a propiedades, daños a personas, daños severos) [13].
c) Las que diseñan curvas de daños a partir de las relaciones de calado y velocidad diferenciando áreas urbanizadas de no urbanizadas [14].

Las metodologías basadas en curvas diferencian afecciones graves y leves, entendiendo como afecciones graves a aquellas en las que es previsible la destrucción de un número representativo de edificaciones con riesgo de pérdida de vidas de sus moradores. Se considera riesgo para la

integridad de las personas aquellas áreas sometidas a profundidades superiores a un metro combinadas con velocidades mayores a 0,7 m/s, ya que en estas condiciones resulta muy difícil mantener el equilibrio [1].

La legislación española, incorpora criterios similares de calado velocidad, para determinar las de Zona de Flujo Preferente (ZFP) [15]. Por lo que se considera que se pueden producir graves daños cuando las condiciones hidráulicas durante la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios:

- Que el calado sea superior a 1 m.
- Que la velocidad sea superior a 1 m/s.
- Que el producto de ambas sea superior a 0,5 m^2/s.

3. Metodología

Para la simulación hidráulica de la rotura es necesaria la caracterización geográfica, climática y geológica de la zona; la descripción de los elementos constructivos que conforman la presa; y las condiciones de contorno del modelo.

3.1. Localización

La zona de estudio se ubica en el noroeste de la provincia de Zamora, dentro de la comarca de Sanabria, muy próxima al límite con la provincia de León por el norte y Orense por el oeste, tal y como se observa en la Fig.1.

Fisiográficamente, Sanabria se conforma en un conjunto montañoso derivado de la cordillera Cantábrica, cuya principal formación es la sierra Segundera, donde nace el río Tera, una cota de 1.800 m. A unos 8 km aguas abajo se encuentra la presa de Vega de Tera (1.500 m s.n.m), y continuando el cauce del río, por el cañón del Tera, se llega hasta la orilla occidental del Lago de Sanabria situado a 1.000 m s.n.m. Morfológicamente el cañón desciende rápidamente por un valle angosto que se ensancha en la llanura aluvial a su paso por la población de Ribadelago.

La geomorfología del entorno es el resultado de la acción de modelado de un glaciar del último periodo del Würn (cuaternario). Este glaciar de casquete alimentaba desde las altiplanicies de la Sierra Segundera lenguas glaciares en los actuales valles fluviales. Desde el punto de vista geológico,



Figura 1. localización de Ribadelago (Galende, Zamora, España).
Fuente: los autores.

los materiales presentes en el sustrato de la región de Sanabria son rocas plutónicas y metamórficas paleozoicas, pertenecientes al macizo hercínico del noroeste de la península Ibérica. En el entorno del lago de Sanabria y recubriendo parcialmente estos materiales paleozoicos se disponen materiales sedimentarios cuaternarios, como morrenas residuales del modelado glaciar en la parte este del lago, o acumulaciones de sedimentos gruesos en la llanura de que se abre entre Ribadelago y el cañón del Tera. En el sector donde se ubica la presa y el cañón del Tera, afloran materiales genísicos precámbricos de la serie del antiformal del Ollo de Sapo [16].

La roca que constituye la cerrada de la presa de Vega de Tera es un gneis de buena calidad, profundamente trabajado por la erosión glaciar, presentando el típico aborregamiento. En algunas superficies de fracturación y diaclasado se observan fenómenos de gelifracción que dan lugar a una profundización en los niveles de alteración superficial. En la cerrada se distinguen dos calidades geomecánicas de rocas diferentes que se alternan a lo largo del eje de la presa: por un lado, un gneises esquistoso de grano fino, menos resistente; y otro, un gneis glandular, muy silíceos y con gran cantidad de microcristales de cuarzo, que le confieren una mayor resistencia.

La orientación de los planos de esquistosidad dominante en la zona de la cerrada es de dirección aproximada 130º NE, sensiblemente paralelos al eje del río y ortogonales a la planta horizontal de la presa, con buzamientos de unos 70º hacia el SO. El diaclasado abierto general de la roca es de poca profundidad y las orientaciones de sus planos son, en casi todos los ejes, favorables para la estabilidad de la roca, aunque en algunas zonas y por efecto de la gelifracción puede progresar la alteración interna de algunas diaclasas. A pesar de ello, la roca de cimentación para una presa de la altura de Vega de Tera es de excelente calidad y solamente con un saneado superficial pudo encontrarse un asiento adecuado para ella, salvo en uno o dos contrafuertes próximos al estribo izquierdo en donde los niveles de alteración del gneis progresaron en profundidad, por lo que el saneamiento fue bastante mayor hasta alcanzar la roca sana [17].

3.2. La presa

En el proyecto constructivo, la presa de Vega de Tera, hidrológicamente contaba con una cuenca de captación de 41,12 km^2, con una precipitación media anual de 1.740 mm al año, por lo que recibiría unas aportaciones medias de 56 hm^3/año.

Los caudales instantáneos máximos (Qmáx) y tiempos de concentración (Tc) estimados para una precipitación diaria (P) correspondiente a un periodo de retorno de 500 años en la zona de la presa son [18]:

- P500 185 mm/d
- Qmáx 198 m^3/s
- Tc 4,05 h

Estos caudales instantáneos confirman el correcto dimensionamiento de los elementos de alivio de la presa, con una capacidad de vertido por coronación de 247 m^3/s.

Desde una óptica de las aguas subterraneas, el substrato rocoso se puede considerar impermeable, y únicamente en los

niveles más superficiales y alterados del diaclasado puede existir una cierta circulación de agua. Esta permeabilidad puede profundizar más en aquellas discontinuidades con mayor afección de los procesos de gelifracción.

Las características geomecánicas de los materiales del cierre fueron estimadas por comparación entre los valores recogidos en el proyecto de la presa y los valores recogidos en la bibliografía para este tipo de rocas de acuerdo con los índices de calidad de los macizos rocosos)

El rango de las características geomecánicas de los gneises en rama se sitúa entre los siguientes valores [19]:

- Densidad (γ): 2,6 a 2,78 t/m^3
- Módulo de Elasticidad ($E_{t\,e}$): 2,5.10^7 a 6.10^7 kN/m^2
- Coeficiente de Poisson (υ_t): 0,09 a 0,2
- Resistencia a la compresión ($f_{t,c}$): 8.10^4 a 2,5.10^5 KN/m^2
- Resistencia a tracción: 4.10^3 a 7.10^3 KN/m^2
- Ángulo de rozamiento interno (ϕ): 23 º a 33º

Los parámetros resistentes y deformacionales de los macizos rocosos gneísicos que componen el cimiento, considerando las anisotropías propias de estos materiales, y obtenidos de los ensayos realizados en el terreno donde se cimentó la presa se obtuvieron los resultados que se resumen en la Tabla 1.

La red de diaclasado y las anisotropías propias de la pizarrosidad de los gneis, tampoco supone un problema de filtración en niveles profundos. Por otra parte, los niveles más superficiales se encontraban sellados por la pantalla de inyecciones de hormigón.

Se ha clasificado la calidad del macizo rocoso del cimiento mediante una aproximación al índice geomecánico de calidad (*Rock Mass Rating* - RMR). Adoptando los siguientes valores conservadores [20]:

- Resistencia a com simple (ft,c) 15
- RQD 13
- Espaciado de discontinuidades 10
- Estado de las discontinuidades 20
- Flujo de agua 10

En estas condiciones, que corresponderían a la envolvente de peor calidad del macizo rocoso de cimentación, el índice de calidad RMR, alcanza un valor de 68, lo que permitiría clasificarle al macizo como una roca de buena calidad. Los parámetros que determinan la resistencia al esfuerzo cortante asimilables a esta calidad del macizo rocoso de cohesión de 300 a 400 KN/m^2 y un ángulo de rozamiento de entre 35 a 45º.

Tabla 1.
Caracterización material del terreno de cimentación.

Terreno		Valor KN/m^2
Resistencia media a compresión (dirección de alineación mineral)	ft,c,0	7,83•10^4
Resistencia media a compresión (dirección normal a la alineación mineral)	ft,c,90	4,98•10^4
Módulo dinámico de elasticidad máximo (zona más alta de la cerrada)	Et,d,max	5,68•10^7
Módulo dinámico de elasticidad mínimo (zona más baja de la cerrada)	Et,d,min	2,06•10^7
Módulo estático de elasticidad medio	Et,e,m	3,92•10^7
Coeficiente de Poisson	υt	0,25

Fuente: adaptado de [19].

Por otro lado la deformabilidad del macizo rocoso se puede estimar a partir de la correlación entre el índice de calidad RMR y el módulo de elasticidad estático del macizo rocoso [21]. En estas condiciones el módulo de elasticidad mínimo, esperado para el macizo rocos de cimentación estaría en valores orientativos de 3,6. 107 kN/m2. La gran coincidencia de estos valores con los estimados a partir de los ensayos realizados antaño, corroboran su validez.

Estos parámetros permiten caracterizar este cimiento como de muy alta calidad geomecánica, alta resistencia a la rotura y muy baja deformabilidad, no representando la capacidad portante, en ningún momento, un problema para el emplazamiento de la presa.

En relación a las potenciales filtraciones que se pudieran producir a través de la red de fracturación, tendrían carácter local, estarían limitadas a los niveles superiores y serían fácilmente controlables con las inyecciones realizadas.

3.3. Construcción del modelo

Se ha construido un modelo combinado, hidrológico-hidráulico. Para ello se ha estimado el caudal por métodos empíricos contrastados y se ha incorporado los resultados obtenidos a un modelo hidráulico que recree gráficamente la propagación de la lámina de agua y evalúe sus parámetros hidráulicos.

Se ha partido de la información cartográfica digital de la Junta de Castilla y León (JCyL), el Instituto Geográfico Nacional (IGN), y la Agencia Europea de Medio Ambiente (European Environment Agency-EEA). De estos organismos se han obtenido las siguientes imágenes georeferenciadas y bases de datos geográficas:

- Mapa topográfico escala 1:10.000
- Fotografías aéreas del Vuelo Americano (1959)
- Mapa de elevaciones de 5m
- Usos del suelo el CORINE (2006)
- Ortofotografías PNOA 2009

Respecto del modelo, se ha optado por el modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS) en su versión 4.1.0. Con él se pretende: determinar el caudal punta e hidrograma de la avenida generada; delimitar cartográficamente la superficie inundada; y evaluar los parámetros hidráulicos de calado y velocidad de la corriente.

El modelo unidimensional opera en régimen constante y discontinuo, y permite la determinación de la superficie del agua en los perfiles de cálculo previamente definidos. El procedimiento de cálculo se fundamenta en la solución unidimensional de la ecuación de la energía (Eq.1), iterándose los cálculos entre los perfiles adyacentes

$$Y_2 + Z_2 + ((\alpha_2 (V_2)2/2g) = Y_1 + Z_1 + ((\alpha_1 (V_1)2/2g) + he \qquad (1)$$

Siendo:

Y₁, Y₂; profundidad de la lámina de agua en los perfiles 1 y 2
Z₁, Z₂; profundidad del canal en los perfiles 1 y 2
V₁, V₂; velocidades medias (caudal/superficie) en los perfiles
α₁, α₂; coeficientes de ponderación de las velocidades en 1 y 2
g ; aceleración de la gravedad
he ; perdida de energía potencial



Figura 2. Imagen de la presa rota (1959).
Fuente Archivo Histórico Provincial de Zamora

Para la estimación del caudal punta generado por la avenida, es necesario conocer los aspectos morfológicos de la rotura, así como la temporalidad de la misma.

La rotura de la presa de Vega de Tera (Fig. 2) generó una brecha de forma de trapecio rectángulo invertido, con el lado vertical en el contacto del cuerpo de presa con el aliviadero. Con unas dimensiones estimadas sobre foto de, B 169 m, b 97 m y h 33m. El tiempo de generación de la rotura se puede considerar instantáneo, cuasi explosivo. A efectos de cálculo para la estimación de caudales, este intervalo instantáneo se consideraría entre 1 y 5 minutos para el desencadenamiento del proceso de rotura completa.

Tanto la forma de rotura como el tiempo de generación de la misma son coherentes con los planteamientos morfológicos y evolución de la brecha expuestos por la Guía Técnica del Ministerio de Medio Ambiente [14]. En cuanto a las formas de rotura son esperables formas trapezoidales o rectangulares para presas de hormigón (gravedad, contrafuertes, bóvedas). La misma guía considera probable que la altura de las brechas en las presas de gravedad y contrafuertes corresponda a la altura máxima desde el cimiento hasta la coronación.

Para la estimación de los caudales punta generados en la brecha de Vega de Tera se han analizado comparativamente las ecuaciones de Hagen (Eq.2), en las versiones de Pierce M.W. y del Ministerio de Medio Ambiente, la de Costa (Eq.3,4) y la del U.S. Boureau of Land Reclamation (Eq.5).

- ***Hagen:*** $Q_p = K(V.H)^{0,5}$ (2)

donde:
K = 780 en presas bóveda.
K = 550 en presas de gravedad y materiales sueltos.

- Costa
Envolvente superior $Q_p = 1150.(V.H)^{0,44}$ (3)

Ajuste por regresión $Q_P = 325(V.H)^{0,42}$ (4)

- U.S. Bureau of Reclamation: proporciona una relación Q - H obtenida por ajuste por regresión de los casos analizados.

$$Q_p = 1{,}26.(H + 0{,}3)^{2,5} \quad (5)$$

Siendo:
H = altura de presa sobre cauce (m).
V = volumen de embalse (Hm^3).
Q_p = caudal punta de la onda de rotura (m^3/s).

4. Resultados

4.1. Cálculo de Caudales e Hidrograma de la Avenida

Los resultados obtenidos para el cálculo de los caudales han sido los reflejados en la Tabla 2.

La evolución de caudales considerando una altura de presa de 33m, desde cimiento, se exponen en el gráfico adjunto (Fig.3). Donde se aprecia una muy buena correlación entre los resultados de Costa y la expresión de Hagen en la versión de Pierce M.W.

Dada la bondad del ajuste entre las curvas de Hagen y Costa para los valores máximos, se ha elegido como caudal inicial de cálculo en el modelo un valor de 13109 m^3/s con la presa llena, aplicando la formulación de tendencia de la curva de Costa (Eq.6).

$$y = 7{,}364x^2 + 151{,}5x + 22{,}15 \quad (6)$$
$$R^2 = 0.999$$

El cálculo del hidrograma de avenida tiene como condición de partida la consideración de una rotura instantánea prácticamente explosiva, estimada en un intervalo de tiempo de 1 minuto desde el inicio. Para la determinación del hidrograma de la avenida se ha ajustado la curva de gasto del embalse expuesta en la Fig.4 y definida por la ecuación 7:

Tabla 2
Caudales pico estimados.

Autor	Caudal Pico (Qp) [m^3/s]
Hagen(MMA)	8789
Hagen (Pierce M.W)	13075
Costa (MMA)	13109
U.S. Boureau of Land Reclamation	8062

Fuente: los autores.

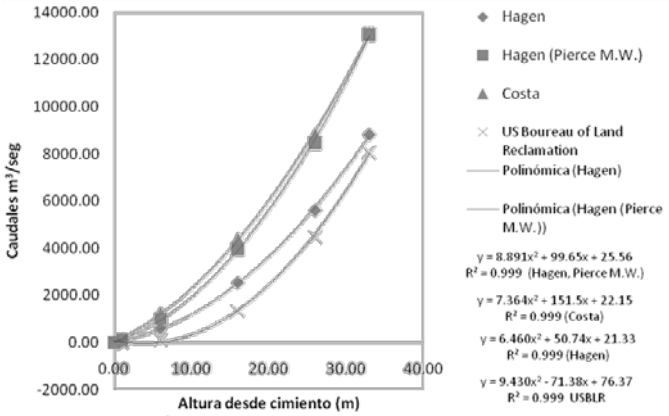


Figura 3. Estimación de caudales en la brecha.
Fuente: los autores.

$$H = -0{,}6709V^2 + 9{,}1241V + 2{,}1689 \quad (7)$$

Siendo:

H- la altura de la lámina de agua

V- el volumen de embalse.

El coeficiente de correlación (R^2) obtenido, superior a 0,97, valida el ajuste.

Aplicando la expresión de Costa de caudal instantáneo y secuenciando cada minuto se extraen las aportaciones para ese intervalo. Extrayendo dichas aportaciones de la curva de gasto se obtienen valores secuenciados de H y V y consecuentemente de caudal instantáneo cada minuto; el resultado es el hidrograma expuesto en la Fig.5.

De acuerdo a este hidrograma la punta se origina en el primer minuto, coherente con la hipótesis de rotura instantánea y el agotamiento del embalse se produjo en 26 minutos desde el inicio. Analizando la forma del hidrograma de avenida generada, corresponde al esperable en la rotura de una presa de hormigón (similar a los existentes en la literatura), y supondría la generación de una onda de choque inicial de gran magnitud (13109 m^3/s) y poder de arrastre con un rápido descenso hasta su agotamiento en 25 minutos [22].

4.2. Propagación de la avenida

Con el hidrograma generado por la rotura como dato de entrada en el modelo, la simulación de la propagación de la avenida se ha calculado con HEC-RAS (4.1.0) sobre un modelo territorial que intentaba reproducir las condiciones

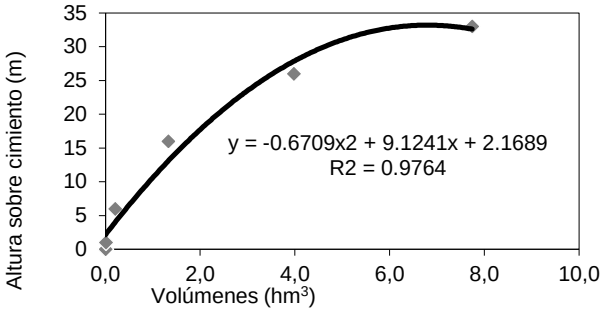


Figura 4. Curva de gasto del embalse de Vega de Tera.
Fuente: los autores.

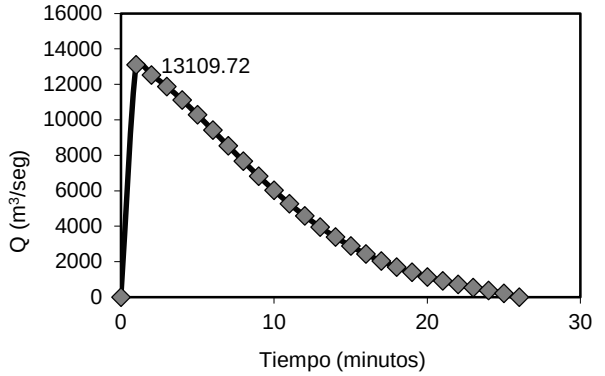


Figura 5. hidrograma estimado de la avenida generada por la rotura.
Fuente: los autores.

espaciales y geoambientales. Se parte de la ventaja que supone la prácticamente nula intervención que ha tenido este espacio natural a lo largo de los últimos 55 años. El resultado esperable será la cronología de la onda de choque inicial hasta alcanzar la población de Ribadelago. La onda estará determinada a partir de: la media de las velocidades de paso por cada uno de los perfiles, la distribución espacial de la zona inundada y el poder destructivo estimado en función de la relación velocidad calado.

a) Condiciones de contorno y Parámetros hidráulicos

El modelo será dinámico y completo, es decir, teniendo en cuenta como variable el tiempo, y dado que por restricciones de estabilidad de la simulación, el análisis se hace en régimen permanente. Además la variable tiempo será incorporada en iteraciones del modelo para diferentes intervalos, de acuerdo con los datos de caudales del hidrograma (Fig.5).

Para la delimitación de las zonas inundables se ha elaborado un modelo hidráulico unidimensional partiendo de la base topográfica compuesta a partir de los mapas de la serie 1:10000 de la junta de Castilla y León, comprendiendo desde el cuerpo de la presa hasta el entorno del casco urbano de Ribadelago.

En el tramo estudiado del río Tera se atraviesa una obra de fábrica que comunicaba los dos barrios del casco urbano, pero que se ha excluido de la modelización al haber sido destruida por la avenida.

Las condiciones de contorno específicas aplicadas al modelo han sido las siguientes:

- Se ha modelizado una longitud de cauce de 9741 m, con una diferencia de cotas en canal de 497 m, medida sobre el modelo de elevaciones lo que supone una pendiente media del 5%, si bien en los 7200 primeros m el descenso es de 489 m lo que supone una pendiente en el cañón del Tera del 7%
- Geometría del cauce y zonas anexas: El Tera se ha considerado como un único tramo, en el que se han definido 81 perfiles de cálculo. La topografía del cauce y zonas anexas, está definida en el Modelo Digital de Elevaciones del Terreno y elaborado a partir del mapa taquimétrico
- Régimen de flujo, se ha considerado permanente, unidimensional y en régimen mixto entre supercrítico y subcrítico. En estas condiciones de régimen mixto, el modelo define en algunos perfiles el régimen hidráulico concreto de funcionamiento.
- Caudales de cálculo, son los obtenidos de la recreación de cuatro puntos del hidrograma de caudales obtenido en el estudio hidrológico y que corresponderían a los expuestos en la Tabla 3.

Tabla 3.
Caudales estimados en cuatro puntos del hidrograma.

Minuto	Caudal m^3/s
1	13109
9	6823
17	2044
25	223

Fuente: los autores.

- Rugosidad, estimada a partir de los valores del número de Manning "n" que se extraen de las tablas al uso, y que valoran en función de las características morfológicas y de uso del suelo y del tipo de fondo en las obras de drenaje. Los valores empleados se ven en la Tabla 4:
- La cota de rotura en la presa es la 1526 y la altura de agua máxima se ha estimado en la iglesia (Fig.6), a 3 m sobre la cota.
- *Modelo hidráulico*

Para la delimitación de la zona inundable se ha compuesto, en primer lugar el escenario espacial a partir del Modelo Digital de Elevaciones del Terreno (MDTE) tridimensional de tipo TIN (*Triangulated Irregular Network*). Construido por interpolación de los puntos de cota de la base cartográfica 1:10000 de la Junta de Castilla y León (Fig. 7).

Tabla 4.
Valores asignados del nº de Manning

Tipo de Usos	"n" Manning
Pastos y roquedos	0,04
Masas de agua	0,01
Casco urbano	0,04
Roquedo	0,06
Agrícola minifundio	0,03
Pasto y matorral	0,03

Fuente: adaptado de [23]

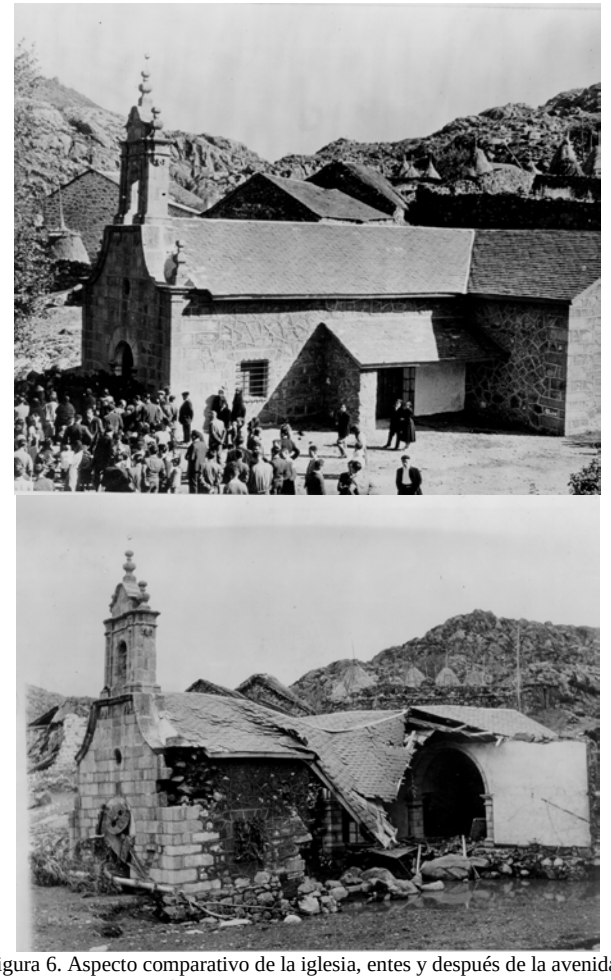


Figura 6. Aspecto comparativo de la iglesia, entes y después de la avenida. Fuente: Archivo Histórico Provincial de Zamora

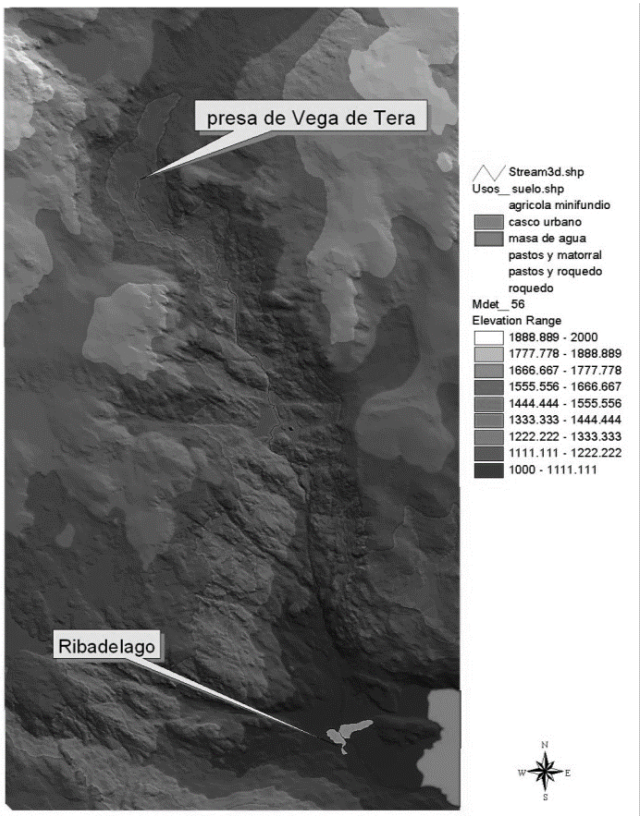


Figura 7. Modelo Digital de Elevaciones del Terreno en el Cañón del Tera, con la ubicación relativa de la presa de Vega de Tera y el casco urbano de Ribadelado. Fuente: los autores.

Sobre este MDTE y empleando la extensión del SIG ARC-View HEC Geo RAS que permite crear los ficheros espaciales del modelo, se han definido los perfiles de cálculo, la corriente principal, los límites geomorfológicos del cauce y se han incorporado los valores del rozamiento, en forma de nº de Manning, de acuerdo a los usos del suelo de cada perfil.

Posteriormente se le han incorporado los aspectos relativos a las condiciones del flujo, caudales y tipo de régimen. Una vez depurado el análisis en todos aquellos aspectos que no coincidían con la realidad observada, o donde se superaban las condiciones de contorno espaciales y/o de régimen de flujo, el resultado final proporcionado por el modelo de cálculo ha permitido caracterizar la inundación, numérica y cartográficamente.

b) Zonas inundables

En general, para un determinado tramo del arroyo en el que no se produzcan variaciones geométricas del cauce (ausencia significativa de erosión y sedimentación), la altura que alcanza la lámina de agua dependerá fundamentalmente del caudal de avenida, siendo tanto mayor cuanto más elevado sea éste. En la zona de estudio el fondo del valle se encuentra encañonado y sobre un fondo rocoso, hasta alcanzar la llanura de Ribadelago, donde el cauce reduce drásticamente su pendiente.

Consecuentemente en la zona encañonadas y de mayor pendiente las velocidades y los calados serán más altos, pero con menor superficie inundada. A partir de la entrada en la llanura, y por efecto del cambio de pendiente se produce una

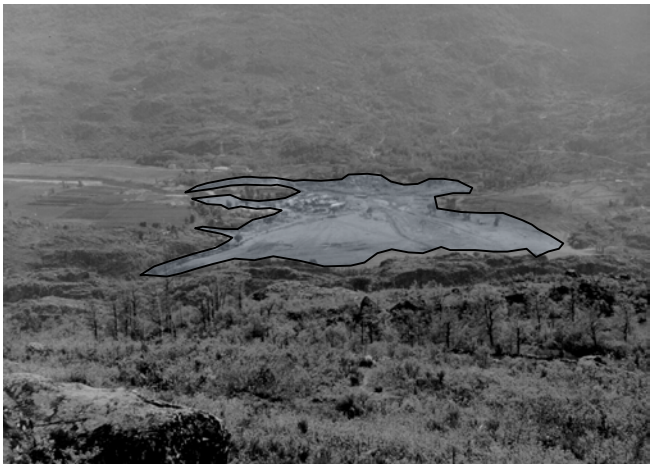


Figura 8. Vista general de la zona afectada por la avenida en la llanura de Ribadelago. Fuente Archivo Histórico Provincial de Zamora

importante reducción de la velocidad, y del calado así como de la capacidad de arrastre, extendiéndose la inundación a lo ancho de la llanura. Se ha reconstruido la línea de la zona inundada en la llanura de Ribadelago, a partir de tonalidades más claras y la ausencia (por arrasamiento) de texturas características de zonas agrícolas de minifundio (Fig. 8), se observa el ensanchamiento de la avenida a lo largo de la llanura, con afecciones más fuertes en la parte del pueblo situada en la margen derecha, y en la que se atisba la posibilidad de que una parte de la avenida drenase en parte por el pequeño cañón situado en la margen izquierda del río e inmediatamente aguas arriba de Ribadelago, comunicando directamente por el lago.

4.3. Distribución de velocidades

En el gráfico adjunto (Fig. 9) se puede observar la distribución de las velocidades totales a lo largo del cauce para los tres escenarios considerados.

4.4. Distribución de calados

En las Figs. 10 y 11 se exponen un perfil de los calados a lo largo de todo el recorrido.

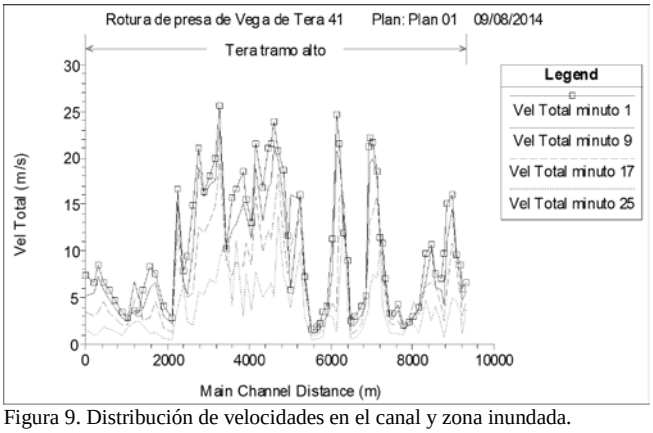


Figura 9. Distribución de velocidades en el canal y zona inundada.
Fuente: los autores

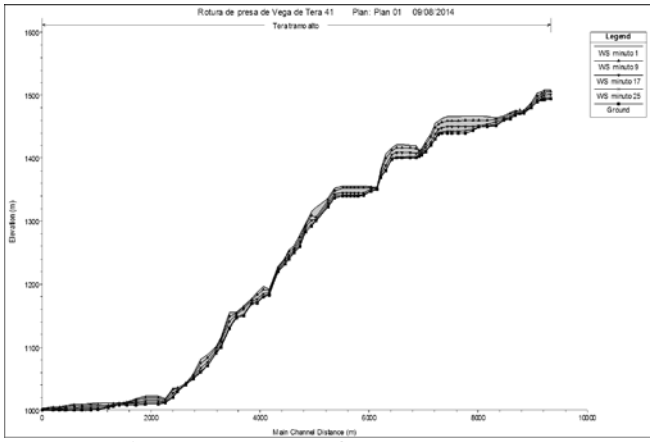


Figura 10. Perfil de calados Distribución de velocidades en el canal y zona inundada. Fuente: los autores

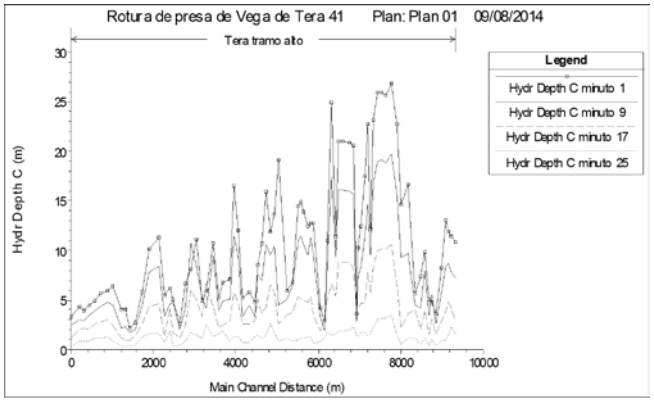


Figura 11. Distribución de calados
Fuente: los autores

Tabla 5:
Valores de calados velocidades y tiempos de llegada estimados.

	Velocidad media[m/s]	Tiempo de llegada[min]	Calado P1626,32[m]
M1 (13109 m^3/s)	10,5	25	6,3
M9 (6823 m^3/s)	9,2	31	3
M17 (2044 m^3/s)	6,8	42	1,3
M25 (<223 m^3/s)	3,8	87t	0,6

Fuente: los autores

En la Tabla 5 se exponen los resultados de velocidad media y tiempos de llegada a Ribadelago desde el inicio de la rotura en los cuatro escenarios de caudales del hidrograma contemplados, así como de los calados estimados el perfil de entrada a Ribadelago.

Considerando los calados y velocidades, estos se encuentran fuera de rango de las estimaciones encontradas en la literatura [13-15,24], por lo que son esperables graves daños estructurales incluso en el escenario de agotamiento del hidrograma (M25). Lo cual ha sido corroborado por la realidad.

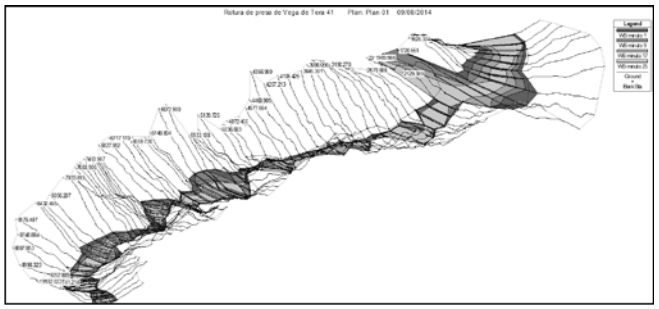


Figura 12. Distribución espacial de la avenida, vista desde la presa.
Fuente: los autores

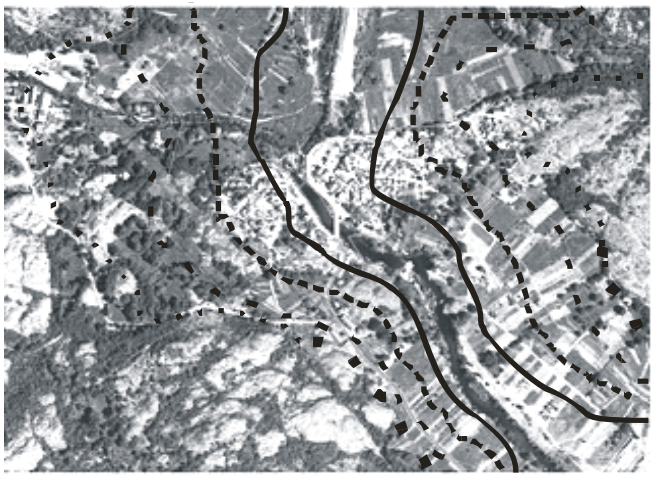


Figura 13. Escenarios de avenida. Escenario M1 (- - -) Q=13109m^3/seg; Escenario M9 (- - -) Q=6823m^3/seg; Escenario M17 (- - -) Q=2044m^3/seg; Escenario M1 (—) Q=223m^3/seg;
Fuente: los autores

Así mismo una duración de prácticamente una hora en estas condiciones de avenida, hacen entendible el escenario dantesco de destrucción generada.

La distribución de la avenida expuesta en las Figs. 12 y 13 permite corroborar la hipótesis de expansión de la avenida en la llanura de Ribadelago, así como el drenaje parcial de la misma hacia el lago, por la margen izquierda aguas arriba del casco urbano.

En los mapas adjuntos de las Figs. 12 y 13 se representan sobre una ortofotografía de la zona la extensión, el calado y la velocidad para los cuatro escenarios de caudales considerados.

Por último en la Fig.13 se exponen los detalles de los escenarios de cálculo en el entorno del casco urbano de Ribadelago.

5. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes que se pueden obtener de la reconstrucción hidráulica de la avenida generada por la rotura de la presa de Vega de Tera, son:

1. La rotura prácticamente instantánea de la presa ha generado una avenida con un caudal punta de más de 13000 m^3/s, con un hidrograma de descarga asimétrico según el cual el desagüe de la presa se produjo en unos 26 minutos.
2. La onda de avenida presentó velocidades punta de 30 m/s, y calados de 24 m en el cañón del Tera, por lo tenía un gran poder de arrastre capaz de afectar al modelado de este tramo.
3. El desagüe de la avenida se produjo en la llanura de Ribadelago. La reducción de la pendiente supuso una considerable pérdida de energía y de poder de arrastre, generándose una acumulación importante de sedimentos en esta zona.
4. Inmediatamente aguas arriba de Ribadelago, la avenida tuvo un drenaje parcial en la margen izquierda y hacia el lago, aprovechando un pequeño cañón.
5. El tiempo estimado de llegada a Ribadelago de la onda de crecida máxima fue de unos 25 minutos desde el inicio de la misma. En estas condiciones cualquier sistema de alerta temprana, como los existentes hoy en día, tampoco hubiese sido eficaz.
6. La duración de la descarga completa en el casco urbano de Ribadelago fue de algo más de una hora.
7. La relación de calados y velocidades durante la hora de descarga eran suficientes para generar una gran destrucción estructural de todas las edificaciones e infraestructuras.
8. Todos los resultados hidráulicos corroboran la gran destrucción generada y el escenario catastrófico observado en las imágenes históricas.

Bibliografía

[1] Ayala-Carcedo, F.J., Olcina-Cantos, J., Laín-Huerta, L. y González-Jiménez, A., Riesgos naturales y desarrollo sostenible: Impacto, predicción y mitigación. Edit. Instituto Geológico y Minero de España, 2007.

[2] Rubín de Célix-Caballero, M., Seguridad de presas: Pasado, presente y futuro. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. [en línea]. 62, pp. 12-21, 2003. Disponile en: http://maxconn.seprem.es/st_ns_f/SEGURIDAD_DE_PRESAS.pdf

[3] González-Martín, J.A., Pintado-Céspedes, C. y Fidalgo-Hijano, C. Fuentes documentales gráficas para el estudio de los pretéritos paisajes fluviales: Los proyectos españoles de presas y embalses. Agua y Territorio, 5, pp. 68-84, 2015. DOI: 10.17561/at.v0i5.2535

[4] Davies, M.P., McRoberts, E. and Martin, T., Static liquefaction of tailings: Fundamentals and case histories. Proceedings Tailings Dams ASDSO/USCOLD, [online]. pp. 233-255, 2002. Available at: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.561.3723

[5] Ayala-Carcedo, F.J., La rotura de la balsa de residuos mineros de Aznalcóllar (España) de 1998 y el desastre ecológico consecuente del río Guadiamar: Causas, efectos y lecciones. Boletín Geológico y Minero, [en línea].115 (4), pp. 711-738, 2004. Disponible en: http://aiplanetatierra.igme.es/Boletin/2004/115_4_2004/ART%208.pdf

[6] PoEMAS., Antes fosse mais leve a carga: Avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG). Mimeo. 2015.

[7] Fread, D.L., The development and testing of a dam-break flood forecasting model. Proc. of Dam-Break Flood Modeling Workshop, U.S. Water Resources Council, Washington, D.C., [online]. pp. 164-197, 1977. Available at: http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/hsmb/docs/hydraulics/papers_before_2009/hl_108.pdf

[8] Fread, D.L., DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model. Vol. 4. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, [online]. 1984. Available at:

http://origin.www.nws.noaa.gov/oh/hrl/hsmb/docs/hydraulics/papers_before_2009/hl_149.pdf
[9] International Commission of Large Dams: Dam-break flood analysis, volume Bulletin 111. 1998.
[10] Cuervo, A.E., Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos. Tésis de Maestría. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, Barcelona, España. 2012.
[11] National Research Council. Risk analysis and uncertainty in flood damage reduction studies. National Academies Press, 2000.
[12] Clausen, L.K., Potential dam failure: estimation of consequences, and implications for planning. Thesis PhD at the School of Geography and Planning at Middlesex Polytechnic collaborating with Binnie and Partners, Redhill. 1989.
[13] Stephenson, D., Integrated flood plain management strategy for the Vaal. Urban Water. 4, pp. 425-430, 2002. DOI: 10.1016/S1462-0758(02)00032-8
[14] MMA - Ministerio de Medio Ambiente. Guía técnica clasificación de presas en función del riesgo potencial. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. 1996.
[15] BOE. REAL DECRETO 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.
[16] Martín-García, E. y Plogmann, H., Puebla de Sanabria (mapa geológico). Madrid: IGME. Instituto Geologico y Minero. (Mapa Geológico de España, MAGNA, hoja 267). Escala 1:50.000. Proyección y Cuadrícula UTM. Elipsoide InEscala 1:50.000ternacional. Huso 29. 1979.
[17] Rodríguez-Fernández, L.R., Encinedo (mapa geológico). Madrid: IGME. Instituto Geologico y Minero. (Mapa Geológico de España, MAGNA, hoja 229). Escala 1:50.000. Proyección y Cuadrícula UTM. Elipsoide Escala 1:50.000 Internacional. Huso 29. 1972.
[18] MARM - Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011). CAUMAX. Mapa de caudales máximos: Versión 2.0 Junio. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Dirección General del Agua. NIPO 770112737. [en línea]. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/memoria_tecnica_v2_junio2011_tcm7-162773.pdf
[19] Ramírez-Oyanguren, P. and Leandro, R., Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes. No. 727. Red DESIR, 2004.
[20] Bieniawski, Z.T., Engineering rock mass classifications. New York: Wiley. 1989.
[21] Bieniawski, Z.T., Determining rock mass deformability–experiences from case histories. Int. J. R. Mech. Min. Sci. and Geom. Abstr., 15, pp. 237-247, 1978.
[22] Nemmert, J., Fritsch, E. and Ploner, S., Dam break flood analysis for small dams, example of use – problems and approaches. 8th ICOLD European Club Symposium; dam safety: Sustainability in a changing environment; by ATCOLD; pp 595-598, 2010.
[23] Chow, V.T., Open-channel hydraulics. New York, McGraw- Hill Book Co. 1959
[24] Ayala-Carcedo, F.J., Estrategias y medidas de mitigación del riesgo de inundaciones. Gestión de zonas inundables. En: Riesgos naturales (Olcina Cantos, J y F.J. Ayala-Carcedo, eds.), Ariel, Barcelona pp. 977-995, 2002b.

J.L. Prieto Calderón, PhD en Ingeniería de Minas por la Universidad de Vigo, España en 2014. Es profesor asociado en el Área de Física Aplicada de la Escuela Politécnica Superior de Zamora (España) y Empleado de la Subdelegación del Gobierno en Zamora.
ORCID: 0000-0002-3969-2468.

R. Marínez-Alegría López, PhD en Ingeniería de Minas por la Universidad de Vigo, España en 2005. Es profesor Adjunto en la Universidad Europea Miguel de Cervantes, Valladolid (España) y Técnico Superior en riesgos naturales y antrópicos de Protección Civil de la Delegación del Gobierno en Castilla y León (España), donde desarrolla trabajos de investigación asociado con la gestión y prevención de riesgos.
ORCID: 0000-0002-0530-1174.

J. Taboada Castro, PhD en Ingeniería de Minas en 1993 por la Universidad de Oviedo, España y catedrático de la Universidad de Vigo, España. Su trayectoria profesional se ha centrado en la investigación sobre la explotación minera y las tecnologías respetables con el medio ambiente y especializado en la evaluación y modelación de riesgos e impactos ambientales. El Dr. Taboada es coordinador de del programa de doctorado de la Ingeniería de Minas de la Universidad de Vigo, España. Uno de sus proyectos más recientes es el software SISMIGAL, cuyo objetivo era desarrollar una herramienta para la gestión del riesgo sísmico en Galicia.
ORCID: 0000-0002-9181-766X.

I. Montequi Martín, Dra. en Ciencias, sección de Químicas, por la Universidad de Valladolid, España en 1986. Profesora en la Universidad Europea Miguel de Cervantes, España, con la categoría de profesor director, directora de la Escuela Politécnica Superior del 2002 al 2004 y defensor de la Comunidad Universitaria desde mayo del 2007. La Dra. Montequi fue investigadora principal del proyecto AGUEDA, y cuenta con una amplia experiencia en la gestión de proyectos científicos y de investigación sobre química analítica y cinética de las reacciones.
ORCID: 0000-0002-2878-4180.

G. Sanz Lobón, PhD en Tecnología Ambiental por la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad de Vigo (España) en 2014. Es investigador de la Universidad Federal de Goiás (Brasil). Vinculado al Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Ciências Forenses, analizando los riesgos e impactos el impacto de las drogas de abuso sobre los recursos hídricos usando herramientas SIG y de simulación numérica.
ORCID: 0000-0002-2600-470X.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Development of the magnesium alloy industry in Colombia - An opportunity

Luisa Fernanda Berrio-Betancur [a], Mónica Echeverry-Rendón [a], Esteban Correa-Bedoya [b], Alejandro Alberto Zuleta-Gil [c], Sara María Robledo-Restrepo [d], Juan Guillermo Castaño-Gonzalez [a] & Félix Echeverría-Echeverría[a]

[a] *Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. luisa.berrio@udea.edu.co, monica.echeverry@udea.edu.co, juan.castano@udea.edu.co, felix.echeverria@udea.edu.co*
[b] *Grupo de Investigación Materiales con Impacto – MAT&MPAC, Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. escorrea@udem.edu.co*
[c] *Grupo de Investigación de Estudios en Diseño - GED, Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Sede Medellín, Medellín, Colombia. alejandro.zuleta@upb.edu.co*
[d] *Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales PECET, Instituto de Investigaciones Médicas, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. sara.robledo@udea.edu.co*

Received: July 18th, 2017. Received in revised form: September 4th, 2017. Accepted: September 21th, 2017.

Abstract
Magnesium and its alloys are some of the materials that have had notable growing progress in recent years. This interest in magnesium base alloys is due to both, its physical and mechanical properties, as well as the search for alternatives to less polluting materials. In order to provide an overview of the possibilities that the use of this material has in the domestic industry, this work gives a look at the basic aspects of the material and the processes of obtaining; its most promising applications and with potential to be developed in Colombia. Finally, the authors discuss their research and results on this material, seeking to be employed as inputs for the implementation of processes and products at the commercial level.

Keyword: Magnesium; magnesium synthesis; magnesium applications; magnesium sustainability.

Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - Una oportunidad

Resumen
Dentro de los materiales que más avance han tenido en las últimas décadas, se encuentran el magnesio y sus aleaciones, cuyo volumen de producción mundial se ha incrementado notoriamente en los últimos años. El creciente interés en el magnesio se debe tanto a sus propiedades físicas y mecánicas como a la búsqueda de alternativas de materiales menos contaminantes. Con el objeto de proporcionar una visión general de las posibilidades que el uso de este material tiene en la industria nacional, en este trabajo se da una mirada a los aspectos básicos del material y de los procesos de obtención del mismo, así como a sus aplicaciones más promisorias y con potencial de ser desarrolladas en Colombia. Para finalizar, los autores discuten sus investigaciones y resultados acerca de este material, buscando su aprovechamiento como insumo para la implementación de procesos y productos a nivel comercial.

Palabras clave: magnesio; síntesis de magnesio; aplicaciones del magnesio; sostenibilidad del magnesio.

1. Introducción

El magnesio fue descubierto como elemento en 1808 por Sir Humphrey Davy. En 1831, Atoine Bussy lo produjo en su forma metálica, a partir de cloruro de magnesio. Posteriormente, se inició su producción comercial por un proceso electrolítico en Alemania en 1886. La producción se extendió a otros países impulsada por las dos guerras mundiales; sin embargo, el desarrollo del mercado

How to cite: Berrio-Betancur, L.F., Echeverry-Rendón, M., Correa-Bedoya, E., Zuleta-Gil, A., Robledo-Restrepo, S.M., Castaño-Gonzalez, J.G. and Echeverría-Echeverría, F., Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - Una oportunidad DYNA, 84(203), pp. 55-64, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

se ha visto limitado por el bajo costo del aluminio [1]. El magnesio es el metal estructural más liviano y contando todas las fuentes de las cuales se puede extraer, podría considerarse como el más abundante en la tierra. Sin embargo, la producción mundial de magnesio es de solo algo más de 1 millón de toneladas por año, comparada con la de aluminio que es aproximadamente 58 millones de toneladas por año (cifras de 2015) [2]. El magnesio es un metal alcalino de bajo número atómico (12), con densidad de 1.738 g/cm3 (20 °C) y punto de fusión de 650 °C. Adicionalmente, se puede resaltar su comportamiento mecánico y su facilidad de conformación. La gran abundancia de este metal hace posible su producción en muchos lugares, siendo extraído tradicionalmente de minerales (dolomita y magnesita) y de cloruros de magnesio disueltos en lagos salados o en el mar. A pesar de esta enorme disponibilidad, los costos de extracción son mayores que los del aluminio, haciéndolo un 20% más costoso y limitando sus aplicaciones, en las que puede reemplazar al aluminio en la mayoría de los casos. Lo anterior es indicativo de la enorme potencialidad de este material [3].

Con este artículo se quiere discutir diferentes aspectos relacionados con el desarrollo de la industria del magnesio, así como algunos aspectos básicos de sus propiedades, fuentes naturales para su extracción, áreas principales de aplicación y sostenibilidad de este material. Y finalmente, se desea muestran brevemente algunos desarrollos científicos con este metal, realizados en el Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales de la Universidad de Antioquia, con el fin de proporcionar información básica para el desarrollo de este material estratégico en el país donde aún falta innovar más en este tema.

2. Aspectos básicos en la metalurgia de las aleaciones de Mg

El magnesio tiene una estructura atómica hexagonal compacta y un diámetro atómico de 0.320 nm, lo cual permite usar un amplio rango de elementos como aleantes, entre los que se encuentra aluminio, cinc, cerio, plata, torio y circonio, entre otros [4]. En este contexto es también posible obtener una gran variedad de compuestos intermetálicos, los cuales pueden adoptar otras estructuras cristalinas, tales como cúbica u ortorrombica [5]. Entre las aleaciones de magnesio más comerciales están aquellas que contienen aluminio, cinc y manganeso. La presencia de impurezas de hierro, níquel y cobre, induce un incremento en la velocidad de corrosión del magnesio y sus aleaciones [6], lo cual se puede reducir por efecto de cinc y manganeso. Otro problema de metales base magnesio es que el tamaño de grano tiende a ser grande y variado, lo cual resulta en pobres propiedades mecánicas.

Esta circunstancia se puede controlar por medio de la adición de circonio, el cual tiene un particularmente fuerte efecto refinador de grano en las aleaciones de magnesio. Sin embargo, el circonio forma compuestos estables con aluminio y manganeso y por tanto se limita su uso en estas aleaciones, pero en aquellas donde se puede emplear genera elevadas propiedades mecánicas, incluso a alta temperatura. Como ilustración, en la Tabla 1 se han incluido algunas de las familias más populares de aleaciones de magnesio junto con sus características generales**.**

La fundición de magnesio requiere tomar exhaustivas precauciones para proveer una atmosfera inerte dada la alta reactividad del magnesio fundido. Por lo tanto, se usan diferentes compuestos para formar una capa de escoria que aísle el metal líquido del aire. Las aleaciones de magnesio son apropiadas para fundición a presión, dada principalmente su alta fluidez, bajo calor específico y baja tendencia a adherirse a las paredes del molde de acero. La fundición en molde de arena también es posible, pero se deben tomar precauciones para controlar la oxidación y además considerar, para el diseño del molde, la baja densidad y el bajo calor específico del material, de manera que se logre el llenado del molde. El maquinado de aleaciones de magnesio es posiblemente el más ventajoso entre los materiales estructurales; por ejemplo, debido a su bajo peso y maleabilidad ayuda a que el proceso de mecanizado sea rápido y además permite un excelente acabado superficial [7]. De igual manera, los procesos de soldadura son efectivos, ya sea por sistemas TIG (Tugnsten Inert Gas) o MIG (Metal Inert Gas), usando en general, material de aporte con la misma composición.

3. Obtención de magnesio metálico

Los minerales considerados como fuentes de magnesio explotables a nivel comercial son la dolomita, magnesita, brucita, carnalita y olivino, aun cuando este metal hace parte de más de 60 minerales diferentes [3]. De esta manera, el magnesio es el octavo elemento más abundante en la corteza terrestre, con alrededor de un 2%. Además, como fuentes de magnesio se tienen los cuerpos de agua salada, siendo el tercer elemento con mayor presencia en el océano, con un porcentaje de 0.13%.

Tabla 1.
Características generales de algunas aleaciones de magnesio.

Designación ASTM	Composición Química Nominal	Propiedades de la aleación
AZ91	Al: 9.5, Zn: 0.5, Mn:0.3	Aleación de propósito general
AM50	Al: 5, Mn: 0.3	Apropiada para colado a alta presión
AS41	Al: 4, Zn: 0.3, Si: 1	Buenas propiedades de termofluencia a 150 °C
EZ33	Zn: 2.7, Zr: 0.7, RE: 3.2	Buena colabilidad, soldable, resistente a termofluencia a 250 °C
HK31	Zr: 0.7, Th: 3.2	Buena colabilidad, soldable, resistente a termofluencia a 350 °C
HZ32	Zn: 2.2, Zr: 0.7, Th: 3.2	Similar a HK31
QE22	Zr: 0.7, RE: 2.5, Ag: 2.5	Soldable, alta resistencia a la tensión a 250 °C
QH21	Zr: 0.7, RE: 1, Ag: 2.5, Th: 1	Soldable, alta resistencia a la tensión a 300 °C
WE54	Zr: 0.5, RE: 3.25, Y: 5.1	Alta resistencia mecánica a alta temperatura, buena resistencia a la corrosión, soldable
ZK51	Zn: 4.5, Zr: 0.7	Buena resistencia mecánica a temperatura ambiente y ductilidad.
ZE41	Zn: 4.2, Zr: 0.7, RE: 1.3	Buena resistencia mecánica a temperatura ambiente y colabilidad mejorada.
ZC63	Zn: 6, Mn: 0.5, Cu: 3	Buena resistencia mecánica a alta temperatura y soldable.

Fuente: Adaptado de [4].

Entre los procesos de extracción de magnesio más utilizados se encuentran el proceso Pidgeon y los procesos electrolíticos. En el primero, se parte de dolomita, la cual luego de calcinarse, se somete a un proceso de desoxidación por medio de ferrosilicio. Este método es empleado por el mayor productor mundial de magnesio, China [8]. Entre las desventajas de este proceso se tiene que durante la calcinación se genera dióxido de carbono; además, se requiere el uso de gran cantidad de energía, principalmente de origen fósil [9]. Por otra parte, los procesos electrolíticos son aplicados tanto para obtener magnesio a partir de minerales, como para extraer el magnesio disuelto en el agua de mar y otros cuerpos de agua salada. En ambos casos, por medio de procesos de disolución en ácido clorhídrico en el caso de la fuente mineral (Australia) o por evaporación en el caso del agua salada (Estados Unidos), se obtiene cloruro de magnesio sólido, el cual es procesado en una celda electrolítica para obtener el magnesio metálico con aproximadamente un 99.8% de pureza [10]. Este último proceso es mucho más amigable con el medio ambiente, en contraste con el proceso Pidgeon, dado que los subproductos generados pueden ser recolectados y reutilizados en el proceso, e incluso el sistema es diseñado para el uso y generación de energía renovable [11].

En Colombia, las fuentes encontradas son las siguientes: (1) Marítimas, pues el país tiene cerca de dos millones de kilómetros cuadrados de área marítima, lo cual junto con la extensa longitud de sus costas, proporciona no solamente una fuente casi inagotable de magnesio, sino una gran disponibilidad de sitios para el montaje de una planta; (2) Hidrotermales, ya que Colombia cuenta con cerca de 300 fuentes hidrotermales, las cuales tienen un alto contenido de magnesio; (3) Minerales de magnesio, que en la actualidad son utilizados únicamente como materia prima para la fabricación de fertilizantes y en la industria cerámica [12].

De esta manera se tiene que, a pesar de que el Gobierno Nacional expidió la Resolución 180102 del 30 de enero de 2012, "Por la cual se determinan unos minerales estratégicos para el país", entre los cuales se consideran estratégicos los minerales de magnesio, el aprovechamiento de los mismos está dirigido principalmente a productos de bajo valor agregado. A pesar de que la producción mundial de magnesio está cumpliendo actualmente con la demanda del mercado, también se debe recalcar que en los últimos 15 años esta producción ha aumentado no menos de 4 veces, lo cual indica la gran expansión del mercado y el incremento continuo de nuevas aplicaciones del magnesio [2]. Además, se revela una enorme potencialidad de este metal y sus aleaciones, si se considera el tamaño del mercado de los materiales con los cuales compite el magnesio, como el aluminio (cerca de 58 millones de toneladas) y los plásticos (más de 300 millones de toneladas); estos últimos con aportes negativos respecto a la contaminación ambiental [13].

4. Aplicaciones de las aleaciones de magnesio

Las aplicaciones del magnesio han sido principalmente impulsadas por su baja densidad, lo cual permite la fabricación de productos entre un 36 y 77% más livianos que aquellos producidos en aluminio o acero, respectivamente. Además, asociado al menor peso hay una reducción en el consumo de energía en productos móviles y en transporte, lo cual a su vez impacta la reducción en generación de gases contaminantes. Además de esto, este material ofrece otras ventajas con respecto a materiales de baja densidad, como una excelente relación resistencia/peso, alta conductividad eléctrica, buen apantallamiento electromagnético, alta capacidad de absorción de vibraciones y muy atractivas propiedades de procesamiento. Todo lo anterior permite que las aleaciones de magnesio estén encontrando un amplio campo de aplicación como se verá a continuación.

4.1. Transporte

Es uno de los campos con mayor potencialidad de aplicación, que se estima en cerca del 70% de las aplicaciones actuales, dadas las ventajas implícitas en sistemas móviles con la reducción de peso [14]. Dicha reducción no solamente se refleja en el desempeño del vehículo respecto a la cantidad de energía necesaria, sino en la posibilidad de uso de otras fuentes de energía más sostenibles. Entre las propiedades mecánicas que hacen del magnesio un material estructural que mejora la seguridad en vehículos, se tiene su alta resistencia específica (relación entre su resistencia mecánica y densidad), buena ductilidad y absorción de energía.

Entre las aleaciones más empleadas en movilidad están las Mg-Al-Zn, las cuales contienen entre 0.1 y 9% en peso de Al y 0.1 y 1.5% en peso de Zn. El aluminio genera mejor resistencia a la tracción y mayor dureza, gracias a la presencia de intermetálicos tales como Mg17Al12. A su vez, el cinc mejora la resistencia a la tracción al disminuir la solubilidad del aluminio, y por tanto incrementar la formación de fases durante el tratamiento térmico [4].

A pesar de lo anterior, como limitantes a una mayor aplicación de aleaciones de magnesio en transporte se tiene su pobre resistencia a la corrosión y al desgaste. Las aleaciones Mg-Al-Zn tienen una particular baja resistencia a la corrosión bajo tensión, lo cual es generado por efectos galvánicos con segundas fases o impurezas (Fe, Cu y Ni). A diferencia del aluminio, el magnesio no genera una capa pasiva estable en su superficie, lo cual permite el ataque de agentes agresivos presentes en el medio que rodea el material. Varias estrategias para enfrentar este problema se han venido desarrollando, entre las que se encuentra la modificación superficial con diferentes tipos de películas protectoras. Sin embargo, se requiere mayor desarrollo en este campo, debido a que, en general, los procesos industriales existentes no son ambientalmente sostenibles y encarecen el precio de la pieza terminada.

Entre las piezas de magnesio fabricadas para la industria automotriz se encuentran volantes de conducción, columnas de dirección, elementos de sujeción, páneles de instrumentos, pedales, carcasas en el motor, sistema de transmisión, contenedores para bolsas de aire y embrague. Así mismo, algunas aleaciones especiales son empleadas en la industria aérea, aeroespacial y en automóviles deportivos, particularmente en componentes de cajas de cambios. Por otro lado, las aleaciones de magnesio han encontrado uso en marcos de silletería para autos y aviones. Son varias los fabricantes de automóviles que utilizan magnesio en

diferentes partes del vehículo, buscando no solamente menor uso de combustible sino mayor desempeño y disminución de costos de procesamiento, gracias a la mayor facilidad para conformar piezas de geometrías complejas de las aleaciones de magnesio. En aplicaciones aeronáuticas, las aleaciones de magnesio ganan terreno, dado que siendo un material ligero tiene capacidad de resistir altas temperaturas, la exposición al ozono y el impacto de partículas a alta velocidad.

4.2. Salud

El uso del magnesio en aplicaciones médicas fue visionado desde mediados del siglo pasado. Sin embargo, su aplicación ha sufrido recientemente un enorme aumento, debido principalmente a sus propiedades únicas, que junto a su bajo peso, lo hacen un material adecuado para su uso en el campo de implantes óseos. Una de las características de este material es que sus propiedades mecánicas se asemejan a las del hueso, lo cual no sucede con otros materiales empleados en aplicaciones ortopédicas, como el titanio y el acero inoxidable. Esta ventaja permite mejores procesos de recuperación natural del hueso.

Por otro lado, el magnesio es un elemento encontrado naturalmente en el cuerpo humano, teniendo participación en diferentes reacciones metabólicas y funciones biológicas [15–17]. Se almacena en los huesos y su exceso se puede excretar de manera natural por vía urinaria. Así, el magnesio es un material biocompatible y no tóxico, permitiendo el desarrollo de implantes bioabsorbibles, a los cuales se les puede regular su tiempo de permanencia en el cuerpo para cumplir una función determinada de recuperación de un tejido y posteriormente degradarse de manera natural [18].

Lo anterior ofrece grandes potencialidades, dado que no solamente se evita la necesidad de una segunda cirugía para retirar el implante, sino que en casos donde esta opción no es viable se evitan los efectos secundarios que la permanencia del implante origina en el cuerpo del paciente. Para la regulación de la duración del implante de magnesio se pueden emplear, ya sea recubrimientos, o trabajar sobre la composición de la aleación. En este último aspecto se debe considerar con extremo cuidado la inclusión de elementos que puedan llegar a generar algún efecto secundario por acumulación en el cuerpo, una vez se inicia el proceso de degradación del implante de magnesio.

Así mismo, en el área de la salud las aleaciones de magnesio han encontrado gran posibilidad de uso reemplazando otros materiales en la fabricación de estructuras de soporte en elementos ortopédicos externos como los estabilizadores de todo tipo de articulaciones, y las ayudas técnicas como los bastones, caminadores, y sillas de ruedas, tanto para aplicaciones terapéuticas como postoperatorias [19–21], las cuales se encuentran actualmente en estudio.

4.3. Electrónica

Con el advenimiento del boom de los equipos móviles, igualmente se ha visto un incremento en la búsqueda de materiales que cumplan con las propiedades requeridas por dichas aplicaciones. En especial, bajo peso, fácil conformación de piezas complejas, resistencia mecánica, transferencia de calor apropiada y propiedades electromagnéticas son las características buscadas, y éstas se cumplen eficientemente por las aleaciones de magnesio, superando ampliamente a otros materiales como los plásticos. En su mayoría las aplicaciones están en carcasas de cámaras, teléfonos celulares, computadores portátiles, así como en otros componentes electrónicos y de instrumentación, que aprovechan la propiedad del magnesio de apantallar instrumentación electrónica de interferencias electromagnéticas y de radio frecuencia [22].

En relación con estos elementos electrónicos, otros utensilios y herramientas para el hogar pueden encontrar beneficio en el uso de aleaciones de magnesio, no solamente por tener mejores propiedades y durabilidad que los plásticos, sino porque en elementos de alto consumo, el magnesio es un material ambientalmente sostenible en contraposición a los materiales poliméricos.

4.4. Elementos deportivos

En el campo de la fabricación de algunos elementos para la práctica de deportes, las propiedades del magnesio han encontrado una muy atractiva posibilidad de desarrollo. Dentro de estas propiedades se destaca su bajo peso, alta resistencia al impacto y la habilidad de producir piezas de formas complejas. Son innumerables las aplicaciones actuales de aleaciones de magnesio en deportes, incluyendo: Palos de golf, raquetas, bates de béisbol, arcos, bicicletas, patines, garrochas, sillas de ruedas de competencia, motociclismo y elementos de protección para deportistas [23]. En todos los casos las aleaciones de magnesio presentan importantes beneficios para los deportistas dada su habilidad de absorber vibraciones, lo cual no solamente puede influir en el desempeño mismo del usuario, sino también en reducir riesgos de lesiones.

4.5. Otras aplicaciones

Otros campos de aplicación se relacionan con el uso de magnesio, no como material estructural sino como reactivo o materia prima en procesos productivos. Es el caso de la industria del acero, donde el magnesio se utiliza para remoción de azufre, lo cual también aplica en la producción de hierro fundido, titanio, circonio, hafnio y uranio. Por otro lado, está su uso como aleante en la producción de latas para bebidas, que en la actualidad es el más importante consumidor de magnesio. Así mismo, se emplea como ánodo en sistemas de protección catódica en tanques de sustancias químicas, tuberías y barcos. Finalmente, dada su reactividad cuando se encuentra como polvo fino, se usa en la producción de juegos pirotécnicos.

5. Sostenibilidad del magnesio

Como se ha mencionado anteriormente, es posible producir el magnesio mediante métodos ambientalmente limpios, ya que en otros casos se generan sustancias que causan enfermedades en los seres humanos [24], incluso cuando se parte de fuentes sólidas como son los minerales de

dolomita y magnesita. En este grupo de métodos de producción de magnesio, se tiene como factores comunes el uso de la electroquímica y la obtención inicial de hidróxido de magnesio seco. Los subproductos de estos procesos, se pueden disponer directamente al ambiente sin ningún tratamiento, dada la ausencia de otros reactivos contaminantes.

Ahora bien, en lo que tiene que ver con el procesamiento y conformación de aleaciones de magnesio, son varios los procesos que han logrado altos niveles de eficiencia y bajo impacto ambiental. Uno es el método de Rauch Fertigungstechnik GmbH (Gmunden, Austria,) el cual es un método denominado de colado a baja presión (LVC por sus siglas en inglés). Este proceso trae ventajas operacionales en el procesamiento de aleaciones de magnesio, así como mejores propiedades del producto terminado. Además, conlleva beneficios ambientales, dado que se emplea menor cantidad de gas de protección del magnesio fundido, lo cual adicionalmente disminuye los costos de producción y de emisiones y mejora las condiciones ambientales de los operarios [25]. De manera similar Oskar Frech GmbH + Co., KG (Schorndorf, Germany), desarrolló maquinaría capaz de disminuir hasta un 70 % el consumo de energía en el proceso de fundición de magnesio. Lo anterior, además de los importantes ahorros en costos de producción, genera un beneficio ambiental por menor uso de energía. El método de colado a alta presión, desarrollado por la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) y denominado ATM (Advanced Thixotropic Metallurgy), usa un sistema de alimentación revolucionario que reduce las emisiones contaminantes y al tiempo que disminuye los costos, mejora la calidad de las piezas obtenidas [26]. Por otra parte, Magnesium Elektron (Manchester, UK), ha desarrollado nuevos procesos de fundición y colado, incluyendo gases de protección del metal fundido con bajo impacto ambiental. De esta manera, han logrado reducir el uso de SF6 como gas de protección, generando menores costos y disminuyendo el impacto al medio ambiente en un 90%. Logros similares son reportados por la empresa LG Electronics (Seoul, South Korea) y Meridian Magnesium Products of America (MAP), Eaton Rapids (Michigan, USA) [27].

Como se puede ver, los métodos de fundición y colado de aleaciones de magnesio, han tenido en los últimos años importantes avances para reducir los efectos ambientales de esta industria, los cuales son bajos comparados con la mayoría de metales y materiales. Así mismo, los métodos de conformación empleados pueden ser ambientalmente amigables, siendo la extrusión uno de los más populares. Por ejemplo, Morgo Magnesium Ltd., The Netherlands, produce partes en diferentes aleaciones de magnesio por el método de extrusión en caliente, sin uso de lubricantes, a temperaturas entre 300 y 400 °C.

El proceso de reciclado de aleaciones de magnesio, en general emplea métodos similares a aquellos desarrollados para la producción del metal primario, las cuales se han descrito anteriormente en el texto. Sin embargo, el magnesio tiene varias opciones de reciclaje: La primera, cuando la chatarra es de suficiente calidad, se puede reprocesar para obtener de nuevo piezas con buenas especificaciones; como segunda opción está el usar la chatarra de magnesio para la producción de otros materiales metálicos y, finalmente, otra posible opción de reciclaje de magnesio es su utilización como materia prima en la producción de fertilizantes.

6. Desarrollos y estudios sobre el uso del magnesio en aplicaciones comerciales

En este apartado se reportan los avances que hasta el momento se han logrado en el Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales – CIDEMAT de la Universidad de Antioquia, resultado de varios años de trabajo con aleaciones y compuestos de magnesio, en busca de brindar oportunidades para el desarrollo del uso de este material en la industria nacional, generando productos de alto valor agregado y que tengan potencial de exportación.

6.1. Aplicación de magnesio en salud

6.1.1. Problemas cardiovasculares

A nivel de salud, debido al aumento en la expectativa de vida y a cambios asociados a la forma de vida, donde la población mundial se ve expuesta a situaciones de estrés, sedentarismo, obesidad entre otras, la probabilidad de padecer una enfermedad cardiovascular se está incrementado considerablemente. Es por esta razón que se requiere disponer en el mercado de alternativas terapéuticas basadas en el uso de implantes, los cuales deben ser versátiles, biocompatibles y económicos.

Actualmente, el uso de implantes permanentes para el tratamiento de estenosis o aneurismas requiere el uso de stents, los cuales son unos dispositivos médicos con memoria de forma y apariencia de muelle o resorte que permiten la canalización y apertura de los vasos sanguíneos para permitir la correcta irrigación de sangre en el cuerpo. Actualmente, los materiales para este tipo de aplicaciones son metales permanentes tales como el cromo-cobalto, níquel, titanio y aceros inoxidables. Estos materiales son efectivos en las primeras etapas del tratamiento, pero con el tiempo pueden causar problemas secundarios como la re-oclusión del lumen del vaso sanguíneo, problema conocido como reestenosis [28,29]

Adicionalmente, algunos problemas asociados a la interacción sangre-material, pueden concluir en la formación de coágulos, lo cual puede ser altamente peligroso para el paciente. Por esta razón, han emergido las formulaciones donde medicamentos anticoagulantes son inmovilizados en la superficie del implante como una solución a este problema, que termina siendo paliativa hasta que el medicamento finalmente se consuma.

En la actualidad, los implantes bioabsorbibles han emergido como una solución definitiva a los problemas antes descritos. Para esta condición, diversos materiales poliméricos y metálicos, están siendo objetivo de estudio, por nombrar algunos se encuentran los polisacáridos, las proteínas, por el lado de polímeros naturales y por el otro, los sintéticos están el PLA, PGA y PHB entre otros. Para los metales se tiene al Mg y sus aleaciones [30], siendo estos últimos un excelente candidato debido a que es un material

biocompatible, dúctil y liviano. Sin embargo, a pesar de estas características, el magnesio presenta como principal problema su alta reactividad, que puede ser crítica en un ambiente biológico. Algunos estudios como el realizado por Liu et sobre la degradación in-vitro de la aleación Mg-Ca, como también Witte et el cual realizaron ensayos in vivo a un conejillo de indias, reportaron que después de la implantación subcutánea de magnesio se forman cavidades de gas debido a la reacción de degradación del material, causando necrosis (muerte de tejido) alrededor del implante [31][32]. La velocidad de degradación del material puede ser controlada de dos formas: mediante el uso de aleaciones de magnesio o mediante recubrimientos protectores. En el caso del uso de aleaciones, es importante considerar que los elementos adicionados a la matriz de magnesio deben ser biocompatibles y estar en el rango de concentraciones admisibles por el cuerpo para no generar problemas posteriores asociados con toxicidad.

Adicionalmente, las aleaciones no solo mejoran las propiedades de corrosión del material, sino que también tienen un fuerte impacto en las propiedades mecánicas, sobre todo en el caso del diseño de un stent cardiovascular, donde el dispositivo es insertado a través de un catéter, requiere ser enrollado y luego expandido en la zona afectada. Por otro lado, el recubrimiento del material no solo disminuye las velocidades de degradación del magnesio, sino que al mismo tiempo mejora las propiedades biológicas debido a que se pueden controlar parámetros como composición, topografía y propiedades físico-quimas del recubrimiento [17][33].

Una excelente opción para el manejo del magnesio en esta aplicación, podría ser la combinación de estas dos opciones - aleación y su posterior tratamiento superficial- para así obtener una mejor opción de implante. En la Fig. 1 se muestran dos imágenes de microscopia electrónica de barrido (SEM) de sustratos de magnesio modificados por la técnica oxidación electrolítica por plasma PEO antes y después de ser expuesto a un ensayo bilógico para evaluación de la superficie.

6.1.2. Problemas ortopédicos

En cualquier aplicación, sea industrial o médica, es importante que el magnesio sea tratado para mejorar sus propiedades físicas y/o químicas y por ende el comportamiento del material en el medio donde vaya a ser usado. En la actualidad, algunos estudios buscan optimizar los métodos y procesos de modificación para que preste un alto desempeño en las áreas requeridas. Por ejemplo, se están implementando técnicas de conversión sobre la superficie del Mg a través de anodizados que tienen como objetivo generar capas protectoras de óxidos y otros compuestos a partir del sustrato, de electrolitos y parámetros eléctricos pre-seleccionados. La técnica mencionada anteriormente es conocida como oxidación electrolítica por plasma (PEO por sus iniciales en inglés), la cual hace del Mg un mejor material de ingeniería debido al incremento de su resistencia a la corrosión y desgaste, además de hacerlo más biocompatible [34–43].

Una de las variables más importantes a tener en cuenta en el proceso PEO es la composición de los electrolitos, los cuales deben ser alcalinos, ya que son los responsables en gran medida de la morfología obtenida e influyen en que se produzca un adecuado contacto con las células vivas. Tal vez los menos estudiados y de mayor interés en este trabajo son los que contienen iones de fosfato, debido a que en combinación con fluidos corporales precipitan en el compuesto apatita, que es muy compatible con el ambiente en cuestión.

En la Fig. 2 se muestra una micrografía SEM, correspondiente a una investigación sobre recubrimientos obtenidos por el proceso PEO con dicho electrolito, en la que se observa una alta porosidad de la película anódica. En ella se puede notar que los poros formados en general son circulares y de diferentes tamaños, además de obtenerse una capa anódica homogénea. El espesor de la película es aproximadamente 3 μm.

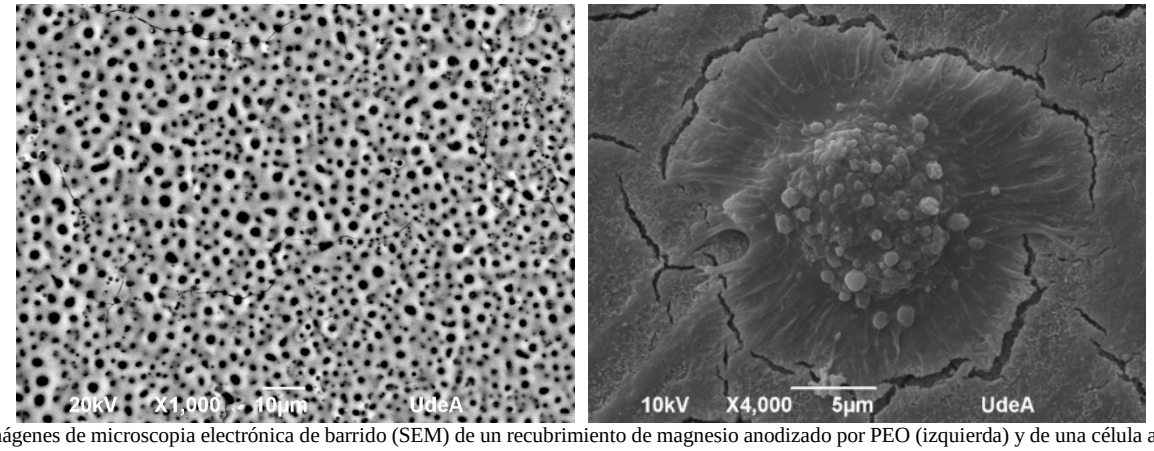


Figura 1. Imágenes de microscopia electrónica de barrido (SEM) de un recubrimiento de magnesio anodizado por PEO (izquierda) y de una célula adherida a la superficie del recubrimiento (derecha) realizados para el estudio de este.
Fuente: Los autores

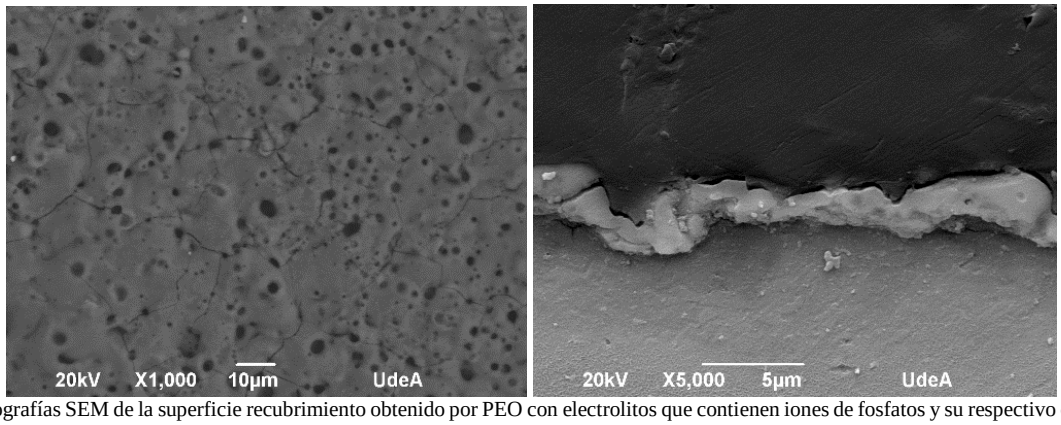


Figura 2. Micrografías SEM de la superficie recubrimiento obtenido por PEO con electrolitos que contienen iones de fosfatos y su respectivo corte trasversal.
Fuente: Los autores

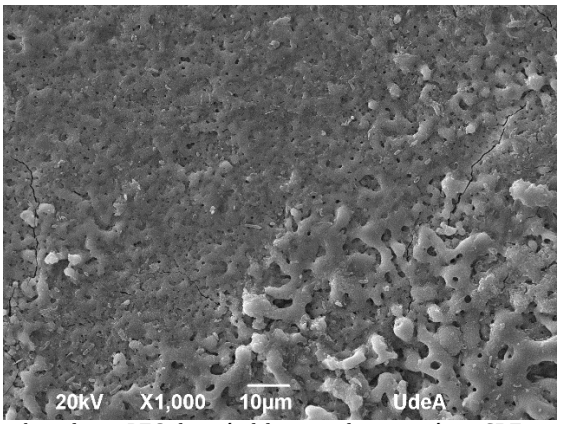


Figura 3. Micrografía SEM del recubrimiento obtenido por PEO después del ensayo de inmersión en SBF.
En conclusión, las capas anódicas formadas por la técnica PEO, protegen el sustrato de una forma controlada como se mostró en la evolución de hidrógeno y adicionalmente tienen la cualidad que en combinación con fluidos corporales forman apatita en la superficie, mejorando su bioactividad en aplicaciones ortopédicas.
Fuente: Los autores

El efecto protector del recubrimiento se comprobó por una prueba de evolución de hidrógeno en 0.9 %w NaCl, encontrando que hay una disminución de aproximadamente 50% en la reducción de la velocidad de corrosión de la muestra anodizada, comparada con el sustrato de Mg comercialmente puro sin recubrimiento. Dado la aplicación final, las muestras recubiertas se ensayaron por inmersión en SBF durante 5 días, encontrado que además del recubrimiento se tienen precipitaciones de apatita, lo cual indica que además de proteger el sustrato el recubrimiento induce la formación de este compuesto, muy importante para el desarrollo de hueso (Fig. 3).

6.2. Aplicaciones industriales

6.2.1 Recubrimientos electroless

Existen múltiples razones para aplicar o formar recubrimientos metálicos sobre sustratos de diferente naturaleza (metales, polímeros, etc.). Entre las razones más importantes que pueden ser mencionadas, están el aumento a la resistencia a la corrosión y al desgaste mecánico, es decir, aumentar la vida útil del sustrato y poder utilizarlo en diversas aplicaciones. Este tipo de soluciones son, probablemente, las más atractivas desde la óptica del costo-beneficio, toda vez que el producto final es un tipo de "material compuesto" que aprovecha las ventajas del sustrato y del recubrimiento, eliminando las desventajas del sustrato [44]. En este caso, el producto final es un elemento de magnesio supremamente liviano, con adecuada resistencia mecánica y con propiedades mejoradas en cuanto a resistencia a la corrosión y al desgaste mecánico.

La industria cuenta con numerosos procesos tecnológicos que permiten formar recubrimientos metálicos sobre sustratos metálicos. Dentro de esos procesos está el conocido como deposición electroless. Este proceso, que es diferente a la electrodeposición, es bastante versátil ya que copia de forma precisa la geometría de la pieza que está siendo recubierta, provee superficies homogéneas, espesores uniformes, recubrimientos adherentes y libres de poros. Sin embargo, la cualidad quizás más importante es que el procedimiento no emplea grandes cantidades de energía eléctrica para formar el recubrimiento, ya que, como su nombre lo indica, el proceso se caracteriza por ser autocatalítico, requiriendo solamente energía eléctrica para calentar la solución química donde es llevado el proceso de deposición.

Los recubrimientos metálicos base níquel son altamente empleados en ingeniería como recubrimientos funcionales, ya que estos poseen una adecuada combinación entre

resistencia a la corrosión y al desgaste mecánico [45]. Mediante el proceso electroless es posible formar recubrimientos base níquel tanto sobre materiales metálicos como poliméricos. Los recubrimientos electroless base níquel tiene una apariencia superficial similar a la de una coliflor, de ahí que, en parte, se pueda explicar su excelente comportamiento frente al desgaste mecánico. Además, los recubrimientos son de estructura amorfa, aunque realizando un tratamiento térmico adecuado se pueden obtener estructuras cristalinas. Las durezas de los recubrimientos se encuentran entre 500 y 700 kg⁄〖mm〗^2 , los módulos de elasticidad reportados varían entre 50 y 70 GPa y la densidad varía entre 7.8 y 8.6 g⁄〖cm〗^3 [45]. Estás propiedades dependen de los elementos químicos que hacen parte del recubrimiento junto al níquel, ya que es posible formar recubrimientos de níquel aleados con fósforo o boro mediante el proceso electroless. En términos generales, los recubrimientos electroless níquel – fósforo (Ni-P) son más resistentes a la corrosión que los recubrimientos níquel – boro (Ni-B); sin embargo, estos últimos son más resistentes al desgaste que los primeros. Además, el procedimiento para depositar uno u otro es bastante similar.

Es importante resaltar que la naturaleza química del magnesio hace que sea considerado un metal muy activo. De hecho, el magnesio es utilizado como ánodo de sacrifico en diversas aplicaciones industriales, lo que significa que tiene una tendencia natural a corroerse. Por el contrario, el níquel es químicamente más estable que el magnesio en cuanto a corrosión se refiere. Por lo anterior, se podría pensar que formar un recubrimiento de níquel sobre una superficie de magnesio es una idea bastante arriesgada ya que, el par galvánico generado por los dos materiales es considerable, lo que causaría, ante un eventual fallo del recubrimiento, la corrosión a gran velocidad del sustrato del magnesio. Sin embargo, industrial y académicamente la formación de recubrimientos electroless níquel es llevada a cabo sin mayores contratiempos, pero con el empleo de sustancias altamente contaminantes y nocivas para la salud humana como por ejemplo ácido fluorhídrico o compuestos con cromo hexavalente.

En trabajos realizados por algunos de los presentes autores [46–49], se ha reportado la formación exitosa de recubrimientos electroless base níquel con fósforo o boro. El desarrollo logrado cuenta con una preparación superficial de los sustratos de magnesio que garantiza la adherencia de los recubrimientos, pero no emplea sustancias con flúor o cromo. Además, el procedimiento sirve tanto para recubrir sustratos de magnesio puro como varias de sus aleaciones (AZ91D, AZ31, etc.). Los resultados son bastante alentadores, puesto que, luego de aplicar los recubrimientos a las aleaciones de magnesio, se encontró que dichos materiales mejoraron en un 92 % su resistencia a la corrosión y en un 36 % su resistencia al desgaste. Se espera entonces que con la implementación de este nuevo procedimiento para obtener recubrimientos metálicos de manera directa sobre la superficie de un material tan reactivo como lo es el magnesio, aumente cada vez más su utilización en la manufactura de nuevos productos y podamos así disponer de dispositivos tales como computadores, carcasas de teléfonos, herramientas portables y tabletas, cada vez más livianos y duraderos.

6.2.2. Otros estudios en procesamiento de aleaciones de magnesio

Entre otros procesos que se están desarrollando se tiene el desarrollo de procesos de modificación superficial, ya sea por formación de compuestos inter-metálicos en su superficie, o por aplicación de procesos de manufactura avanzada, que permitan ampliar las aplicaciones de estas aleaciones en la industria automotriz y aeroespacial del país.

De igual forma, en el campo de la nanotecnología, la síntesis y funcionalización de nanopartículas de compuestos de magnesio, se está estudiando con miras a su aplicación en tratamientos clínicos, que empleando compuestos bioabsorbibles e inocuos para el organismo, puedan cumplir una función en el tratamiento de diferentes afecciones tanto cutáneas como internas del ser humano [50].

Estos últimos estudios se encuentran es etapas preliminares pero los resultados obtenidos hasta el momento son bastante alentadores y se trabaja conjuntamente con investigadores de otros países en la comprobación de la potencialidad de este tipo de materiales en procesos y productos comerciales.

Conclusiones

- El magnesio y sus aleaciones ofrecen una gran variedad de propiedades que potencializan su uso para diferente tipo de aplicaciones, pudiendo ser útiles para reemplazar materiales cuando se requiere baja densidad o altas propiedades mecánicas, entre otras características.
- La modificación superficial del magnesio y sus aleaciones permite aumentar su durabilidad y su resistencia a la corrosión sin detrimento de las interesantes propiedades del material, extendiendo el abanico de aplicaciones potenciales del mismo.
- La industria del magnesio tiene gran factibilidad de ser sostenible, dado que, tanto en su extracción como en su procesamiento, se cuenta con procesos limpios y con bajo impacto ambiental.
- El uso de aleaciones de magnesio, ha venido en continuo aumento en particular desde principio de este siglo, encontrándose en una gran variedad de implementos de uso diario de alto valor agregado, lo cual se puede considerar como una oportunidad para el desarrollo de la industria nacional alrededor de este metal con un atractivo potencial exportador.
- El país cuenta con investigadores trabajando en el estudio y desarrollo de procesos con aleaciones de magnesio, lo cual puede servir de apoyo al desarrollo de esta industria gracias a la disponibilidad de recurso humano formado en el tema y a acceso a conocimiento localmente.

Bibliografía

[1] Bell, T., Learn about magnesium, 2017. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: https://www.thebalance.com/metal-profile-magnesium-2340142.
[2] USGS Mineral Resources Program. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available: https://minerals.usgs.gov/.
[3] International Magnesium Association. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available: http://www.intlmag.org/.

[4] Polmear, I.J., Light alloys: Metallurgy of the light metals, Third. Londres: J. Wiley & Sons, 1995.
[5] Kainer, K.U. Ed., Magnesium alloys and technology. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000.
[6] Shaw, B.A., Corrosion resistance of magnesium alloys, ASM Handb., vol. 13, pp. 692-696, 2003.
[7] Peloubet, J.A., Machining magnesium, Magnesium Technology Centre, Swinton, Manchester, 2012.
[8] China Magnesium Corporation, The Pidgeon Process, 2011. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available: http://www.chinamagnesiumcorporation.com/our-business/the-pidgeon-process.
[9] Mihriban, M.O., Pekgüleryüz, O., Kainer, K.U. and Kaya, A.A., Fundamentals of magnesium alloy metallurgy. 2013.
[10] Abdel-Aal, H.K., Prospects for the role of magnesium in solar-hydrogen energy-system, Science Direct, 40(3), pp. 1408-1413, 2014.
[11] Wilkomirsky, I., Metalurgia extractiva de metales no ferrosos, 2009.
[12] Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. Subdirección de Planeación Minera. Mercado de los insumos minerales para la producción de fertilizantes, 2003. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: www.upme.gov.co/mineria/EstudiosYAnalisis Sectoriales/Minerales Fertilizantes Colombia.pdf.
[13] Vital Signs Online. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: http://vitalsigns.worldwatch.org/.
[14] Monteiro, W.A., Buso, S.J. and Da L.V., Application of magnesium alloys in transport, in New Features on Magnesium Alloys, InTech, 2012.
[15] Vormann J., Magnesium: Nutrition and metabolism, Mol. Aspects Med., 24(1–3), pp. 27-37, 2003.
[16] Homayun, B. and Afshar, A., Microstructure, mechanical properties, corrosion behavior and cytotoxicity of Mg–Zn–Al–Ca alloys as biodegradable materials, J. Alloys Compd., 607, pp. 1-10, 2014.
[17] Jang, Y., Tan, Z., Jurey, C., Collins, B., Badve, A., Dong, Z., Park, C., Kim, C.S., Sankar, J. and Yun, Y., Systematic understanding of corrosion behavior of plasma electrolytic oxidation treated AZ31 magnesium alloy using a mouse model of subcutaneous implant, Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl., 45, pp. 45-55, 2014.
[18] Song, G., Control of biodegradation of biocompatable magnesium alloys, Corros. Sci., 49(4), pp. 1696-1701, 2007.
[19] Luthringer, B.J.C., Feyerabend, F. and Willumeit-Römer, R., Magnesium-based implants: A mini-review, Magnesium Research, 27(4), pp. 142-154, 2014. DOI: 10.1684/mrh.2015.0375
[20] Shimizu, Y., Yamamoto, A., Mukai, T., Shirai, Y., Kano, M., Kudo, T., Kanetaka, H. and Kikuchi, M., Medical application of magnesium and its alloys as degradable biomaterials, Interface Oral Heal. Sci., pp. 318-320, 2009.
[21] Brown, B.K., Wheelchairs & Assistive Devices | CURRENT Diagnosis & Treatment: Physical Medicine & Rehabilitation | AccessMedicine | McGraw-Hill Medical, 2014. [Online]. [Accessed: 15-Sep-2017]. Available at: https://accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1180&sectionid=70383529.
[22] Electronic Applications - International Magnesium Association. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: http://intlmag.site-ym.com/?page=app_electronic_ima.
[23] Magnesium applications - International Magnesium Association. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: http://www.intlmag.org/page/mg_applications_ima.
[24] CNR COP, Producción de magnesio. [en línea]. [consultado en: 11-Sep-2017]. Disponible en: http://www.cnrcop.es/gc/iniciativas-no-gubernamentales/mejores-tecnicas-disponibles-mtd-y-mejores-practicas-ambientales-mpa/mejores-tecnicas-disponibles-mtd-y-mejores-practicas-ambientales-mpa/procesos-termicos-de-la-industria-metalurgica-no-mencionados-e.
[25] Rauch S., Rauch fertigungstechnik: Low-pressure casting Al | Mg. [Online]. [Accessed: 11-Sep-2017]. Available at: http://www.rauch-ft.com/en/non-ferrous-metals/low-pressure-casting-al-mg/.
[26] O'Donnel, R.L, Advanced thixotropic metallurgy, a revolution in casting technology, Die Cast. Eng., 49(1), pp. 50-54, 2005.
[27] Meridian Lightweight Technologies: Magnesium automotive solutions. [Online]. [Accessed: 20-Jan-2017]. Available at: http://www.meridian-mag.com/.
[28] Talha, M., Behera, C.K. and Sinha, O.P., A review on nickel-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications, Mater. Sci. Eng. C, 33(7), pp. 3563-3575, 2013.
[29] Zhu, Y., Yang, K., Cheng, R., Xiang, Y., Yuan, T., Cheng, Y., Sarmento, B. and Cui, W., The current status of biodegradable stent to treat benign luminal disease, Mater. Today, May 2017.
[30] Tan, L., Yu, X., Wan, P. and Yang, K., Biodegradable materials for bone repairs: A review, J. Mater. Sci. Technol., 29(6), pp. 503-513, 2013.
[31] Liu, C.L., Wang, Y.J., Zeng, R.C., Zhang, X.M., Huang, W.J. and Chu, P.K., In vitro corrosion degradation behaviour of Mg–Ca alloy in the presence of albumin, Corros. Sci., 52(10), pp. 3341-3347, 2010.
[32] Witte, F., Fischer, J., Nellesen, J., Crostack, H.-A., Kaese, V ., Pisch, A., Beckmann, F. and Windhagen, H., In vitro and in vivo corrosion measurements of magnesium alloys., Biomaterials, 27(7), pp. 1013-1018, 2006.
[33] Abidin, N.I.Z., Da Forno, A., Bestetti, M., Martin, D., Beer, A. and Atrens, A., Evaluation of coatings for Mg alloys for biomedical applications. Advanced Engineering Materials, 17(1). pp. 58-67, 2014. DOI: 10.1002/adem.201300516
[34] Hussein, R.O., Nie X. and Northwood, D.O., An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing. Electrochim. Acta, 112, pp. 111-119, 2013.
[35] Ghasemi, A., Raja, V.S., Blawert, C., Dietzel, W. and Kainer, K.U., The role of anions in the formation and corrosion resistance of the plasma electrolytic oxidation coatings, Surf. Coatings Technol., 204(9–10), pp. 1469-1478, 2010.
[36] Peibo, S., Xiaohong, W. and Zhaohua, J., Plasma electrolytic oxidation of a low friction casting on ZK60 magnesium alloy, Mater. Lett., 62(17-18), pp. 3124-3126, 2008.
[37] Pezzato, L., Brunelli, K., Gross, S., Magrini, M. and Dabalà, M., Effect of process parameters of plasma electrolytic oxidation on microstructure and corrosion properties of magnesium alloys, J. Appl. Electrochem., 44(7), pp. 867-879, 2014.
[38] Stojadinović, S., Vasilić, R., Petković, M., Kasalica, B., Belča, I., Žekić, A. and Zeković, L., Characterization of the plasma electrolytic oxidation of titanium in sodium metasilicate, Appl. Surf. Sci., 265, pp. 226-233, 2013.
[39] Mori, Y., Koshi, A, Liao, J., Asoh, H. and Ono, S., Characteristics and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on AZ31B Mg alloy formed in phosphate – Silicate mixture electrolytes, Corros. Sci., 88, pp. 254-262, 2014.
[40] Liu, Y., Yang, F., Zhang, Z. and Zuo, G., Plasma electrolytic oxidation of AZ91D magnesium alloy in biosafety electrolyte for the surgical implant purpose, Russ. J. Electrochem., 49(10), pp. 987-993, 2013.
[41] Aliasghari, S., Skeldon, P. and Thompson, G.E., Plasma electrolytic oxidation of titanium in a phosphate/silicate electrolyte and tribological performance of the coatings, Appl. Surf. Sci., 316, pp. 463-476, 2014.
[42] Hornberger, H., Virtanen, S. and Boccaccini, A.R., Biomedical coatings on magnesium alloys - a review. Acta Biomater., 8(7), pp. 2442-2455, 2012.
[43] Dong, H., Surface engineering of light alloys ight alloys. CRC Press, 2010.
[44] Carter, V. E., Metallic coatings for corrosion control, First. London , Butterworth & Co, 1977.
[45] Mallory, G.O. and Hajdu, J.B., Electroless plating -fundamentals and applications. William Andrew Publishing/Noyes, 1990.
[46] Correa, E., Zuleta, A.A., Guerra, L., Gómez, M.A., Castaño, J.G., Echeverría, F., Liu, H., Baron-Wiecheć, A., Hashimoto-Skeldon, T.P., and Thompson, G.E., Coating development during electroless Ni-B plating on magnesium and AZ91D alloy, Surf. Coatings Technol., 232, pp. 784-794, 2013.
[47] Zuleta, A.A., Correa, E., Sepúlveda, M., Guerra, L., Castaño, J.G., Echeverría, F., Skeldon, P. and Thompson, G.E., Effect of NH4HF2 on deposition of alkaline electroless Ni–P coatings as a chromium-free pre-treatment for magnesium, Corros. Sci., 55, pp. 194-200, 2012.
[48] Calderón, J.A., Jiménez, P.J. and Zuleta, A.A., Improvement of the erosion-corrosion resistance of magnesium by electroless Ni-

P/Ni(OH)2-ceramic nanoparticle composite coatings, Surf. Coatings Technol., vol. In Press, 2016.
[49] Correa, E., Zuleta, A.A., Guerra, L., Gómez, M.A., Castaño, J.G., Echeverría, F., Liu, H., Skeldon, P. and Thompson, G.E., Tribological behavior of electroless Ni-B coatings on magnesium and AZ91D alloy, Wear, 305(1–2), pp. 115-123, 2013.
[50] Udhayakumar, G., Muthukumarasamy, N., Velauthapillai, D., Santhosh, S.B. and Asokan, V., Magnesium incorporated hydroxyapatite nanoparticles: Preparation, characterization, antibacterial and larvicidal activity, Arab. J. Chem., Jun. 2016. DOI: 10.1016/j.arabjc.2016.05.010

L. Berrio, es MSc. en Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquia – UdeA. Actualmente pertenece al Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA
ORCID: 0000-0001-5104-3084.

M. Echeverry-Rendon, Dr. Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia. MSc. en Biología, 2012, Universidad de Antioquia. Pregrado en Bioingeniería, 2007 de la Universidad de Antioquia. En la actualidad pertenece al Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
ORCID: 0000-0002-7452-0987

E. Correa, es Dr. en Ingeniería en 2013, Universidad de Antioquia. Con pregrado en Ingenieria de Materiales 2008 de la Universidad de Antioquia. Actualmente del Grupo de Investigación Materiales con Impacto – MAT&MPAC, Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín.
ORCID: 0000-0003-3837-8992

A.A Zuleta, Dr. en Ingeniería 2013, Universidad de Antioquia. MSc. en Ingeniería 2009, Universidad de Antioquia, pregrado en Ingeniería de Materiales 2005, Universidad de Antioquia. Actualmente Grupo de Investigación de Estudios en Diseño - GED, Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana.
ORCID: 0000-0002-5431-2603

S. Robledo, es PhD en Biologia Celular y Molecular 2008, Washington University in Saint Louis, USA. Dr. en Ciencias: Inmunología en 1998 Universidad de Antioquia, MSc. en Microbiología 1996 de la Universidad del Valle. Pregrado en Bacteriología y Laboratorio Clínico 1987, Universidad de Antioquia. Actualmente pertenece al Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales PECET, Instituto de Investigaciones Médicas, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia UdeA.
ORCID: 0000-0003-2752-4931.

J.G. Castaño, Dr. en Ciencias Químicas, 2002, de la Universidad Complutense de Madrid, España.
Pregrado en Ingeniería de Materiales 1995, de la Universidad de Antioquia. Actualmente Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
ORCID: 0000-0002-7972-8293

F. Echeverria, Dr. en Corrosión 1995, de University of Manchester Institute of Science and Technology. MSc. en Metalurgia 1995, de la Universidad Industrial de Santander. Pregrado en Ingeniería Metalúrgica 1992, de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Actualmente pertenece al Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
ORCID: 0000-0002-3767-5170

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Requirements for hybrid laboratories in Manufacturing Engineering

José Divitt Velosa-García [a], Fernando José Castillo-García [b], Eva Espíldora[b] & Luis Cobo [a]

[a] *Facultad de Ingeniería, Universidad EAN, Bogotá, Colombia. jvelosa@universidadean.edu.co, lacobo@universidadean.edu.co, lacobo@universidadean.edu.co*
[b] *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha, España, fernando.castillo@uclm.es, Eva.Espildora@uclm.es*

Received: December 10th, 2016. Received in revised form: August 23th, 2017. Accepted: September 19th, 2017

Abstract
The article presents a proposal for a combination of laboratories in engineering, called hybrid laboratories (LH, for its acronym in Spanish), that is, a mixture of face-to-face (HO), virtual local (LV) and remote (LR) laboratories. To exemplify this proposal was developed a module for teaching processes in manufacturing (CNC machining). From this study we propose the generic characteristics of design, structure and the way of incorporation in a general system. The laboratory experiences are developed through a methodology supported by the tool 'Deployment of the Quality Function (QFD). The characteristics found in these LH laboratories are the basis for a possible general, replicable and scalable modular structure in a flexible laboratory practice development system.

Keywords: On-line laboratory characteristics; Hybrid laboratories; Education for manufacturing.

Requerimientos para laboratorios híbridos en Ingeniería de Manufactura

Resumen
El artículo presenta una propuesta de combinación de laboratorios en ingeniería, denominada laboratorios híbridos (LH), esto es, una mezcla de laboratorios presenciales (HO), virtuales local (LV) y remotos (LR). Para ejemplificarlos esta propuesta se desarrolló un módulo para la enseñanza de procesos en manufactura (mecanizado CNC). A partir de este estudio se proponen las características genéricas de diseño, estructura y la forma de incorporación en un sistema general. Las experiencias de laboratorio se desarrollan por medio de una metodología apoyada en la herramienta 'Despliegue de la Función Calidad (QFD en inglés). Las características encontradas de estos laboratorios LH, son la base para una posible estructura modular general, replicable y escalable, en un sistema flexible de desarrollo de prácticas de laboratorio.

Palabras clave: características de laboratorios On-line; Laboratorios híbridos; Educación para manufactura.

1. Introducción

La tecnología incorporada en la maquinaria industrial ha venido avanzando rápidamente y necesita de profesionales con habilidades y conocimientos especializados que puedan sacar los mejoras beneficios de su implementación [1]. Particularmente en ingeniería los procesos de enseñanza deben ir acompañados de prácticas de laboratorio pertinente a esas habilidades [2].

El avance tecnológico de los últimos años hace posible pensar que nuevas metodologías de formación pueden aprovechar el uso de los diferentes tipos de laboratorios para realizar prácticas de manufactura. Sin embargo la selección de un tipo de laboratorio estará determinada por las características y las posibilidades que brinda a los actores involucrados en su uso.

El objetivo del artículo es enseñar una metodología flexible para el desarrollo de laboratorios LH, conforme a las necesidades de los actores involucrados y potencializar su uso. Las carencias de la literatura tanto en este tipo de experiencias como en el área propuesta, hace que la investigación, sea un punto de partida para otros estudios. Para ello, se presenta el resultado de un prototipo de laboratorio modular CNC. Inicialmente se hace una breve síntesis de los tipos de laboratorio basado en el lugar donde se hace la experimentación. Luego para convertir los requerimientos de los actores en especificaciones se hace uso de

How to cite: Velosa-García, J.D., Castillo-García, F.J., Espíldora, E. and Cob, L., Requerimientos para laboratorios híbridos en Ingeniería de Manufactura DYNA, 84(203), pp. 65-74, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.
Revista DYNA, 84(203), pp. 65-74, December, 2017, ISSN 0012-7353
DOI: http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n203.61495

QFD de forma sistemática. Para finalmente, describir las consideraciones en diferentes aspectos de un sistema modular LH.

2. Tipos de laboratorios en ingeniería

Existen diferentes formas de clasificar los laboratorios para ingeniería, ya sea desde su área de formación [3], tecnologías involucradas; convencionales, asistidas por computador [4], y objetivo educacional [5,6].

Sin embargo la clasificación más adoptada por diferentes autores, [7] es la que relaciona los lugares donde se realiza la experimentación y el lugar donde se encuentra el experimentador.

Para evidenciar la caracterización de los diferentes tipos de laboratorios, se ha tomado el trabajo desarrollado en la Universidad Castilla LaMancha (UCLM) de España y La Universidad EAN en Colombia. El ejercicio se concentró en el proceso de mecanizado CNC, ya que por las características puede ser abordado desde diferentes niveles de desarrollo. Además los procesos han sido acompañados con la experimentación de estudiantes de ambas instituciones; para la UCLM ingenieros Industriales y la EAN con ingenieros de Producción.

El tema central es el diseño y ejecución de programas de mecanizado CNC g-code, utilizando estrategias de diseño de procesos CAD/CAM. Las experiencias se desarrollaron simultáneamente en un periodo académico con los dos grupos ubicados en localizaciones geográficas diferentes, horarios diferentes y docentes diferentes.

Según el profesor Dormido [8] podemos clasificar en cuatro entornos diferentes los laboratorios básicos: **Acceso local-recurso real:** en este caso tanto el equipo como el usuario se encuentran en el mismo espacio físico de trabajo. También es conocido como *Hands-On, Fase-to- Fase*, convencional o simplemente presencial.

En la Fig. 1, se muestra una estación típica de enseñanza CNC. Los usuarios tienen todo el control directamente desde el PC, y su intención es principalmente la formación en el proceso de mecanizado.

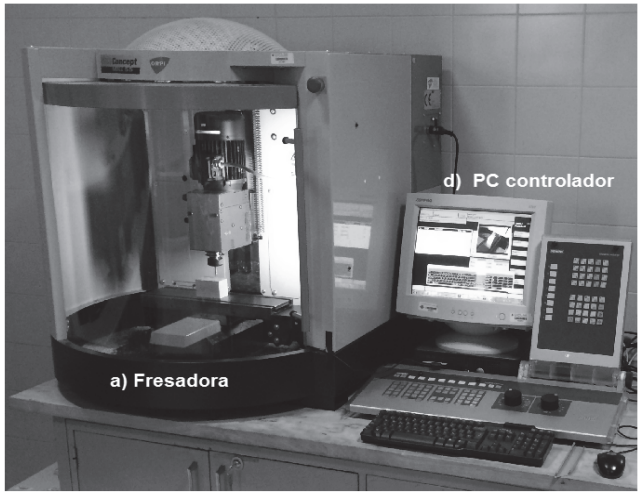


Figura 1. Máquina Fresadora en la estación Hans-On a. Máquina Fresadora b. PC. Controlador conectado a la fresa por RJ45
Fuente: Los autores

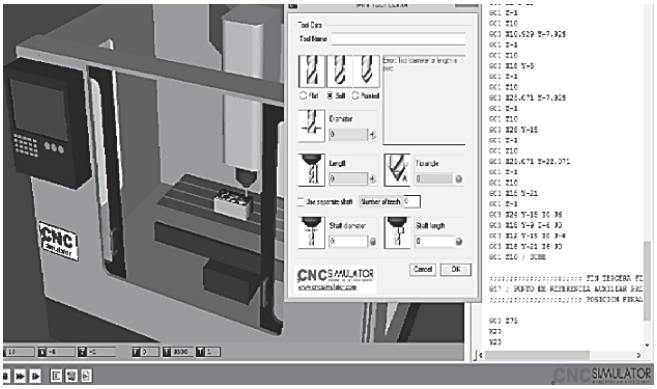


Figura 2. Software de simulación CNCSimulator ®. En este tipo de programa se puede reproducir tanto el código utilizado, la parametrización de piezas y parte.
Fuente: Los autores

Acceso local - recurso simulado: este tipo de arreglo del proceso de mecanizado lo simula un software que se instala en el computador del usuario. Esto facilita la verificación de características y acelera los tiempos de instrucción.

En la Fig. 2, se observa el panel principal del software y la parametrización con los datos reales de máquina. Una de las ventajas de este método es que el código es análogo al utilizado en a máquina real evitando reconfiguraciones.

Acceso remoto - recurso simulado: con el avance de las Tecnologías de Información y Comunicación TIC´s es posible realizar simulaciones en servidores ubicados en la Internet. La Fig. 3, muestra el ambiente de trabajo para la generación del código g-code y la simulación de su recorrido, en un aplicativo online, http://www.microtechstelladata.com/OnlineTools.aspx

El usuario puede acceder al programa independiente del lugar donde se encuentre, solo requiere una conexión a internet y un navegador estándar. No requiere descargar aplicativos ni software especializado.

Acceso remoto - recurso real: este tipo de laboratorio combina el uso de interfaz del computador con el uso real de un equipo. El usuario debe tener un medio de conexión remota al equipo, siendo lo más común la Internet, luego de constatar el nivel de seguridad y facilitar las instrucciones el equipo puede ser operado. La Fig. 4, muestra la disposición de la pantalla del lado del usuario al tele-operar.

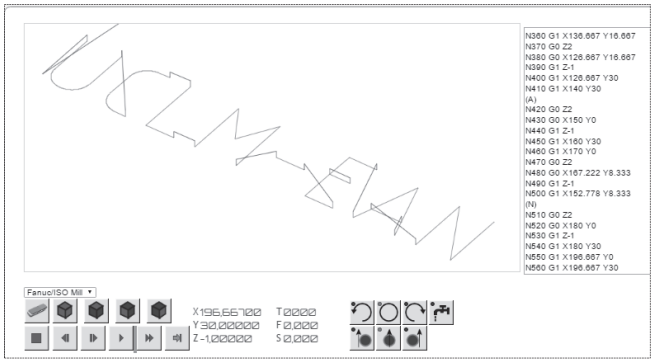


Figura 3. Software de simulación On-line MicroTech StellaData ®. Se muestra tanto el código anteriormente generado como los movimientos e instrucciones misceláneas importantes.
Fuente: Los autores



Figura 4. Acceso remoto al software de la máquina utilizando un software VNC libre.
Fuente: Los autores

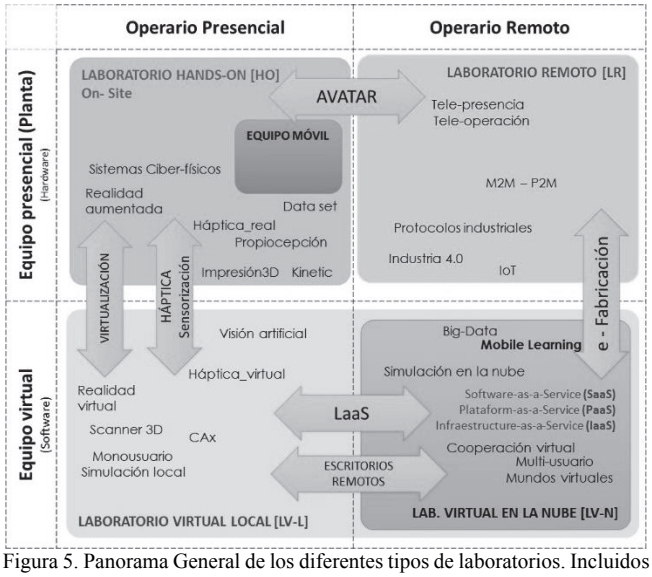


Figura 5. Panorama General de los diferentes tipos de laboratorios. Incluidos las tipologías hibridas.
Fuente: Los autores

Para facilitar el uso del equipo CNC, es necesario realizar varias operaciones de autenticación, verificación de recorridos y acceso. Se utilizan dos cámaras; una WEB y una IP de respaldo, para mejorar la percepción y seguridad.

Cada uno de los cuatro tipos de laboratorios básicos tiene ventajas particulares. Sin embargo la combinación de estrategias, recursos, equipos y recursos potencializa los procesos de formación, para ello es necesario realizar una unión o mezcla de forma coherente.

2.1. Definición de laboratorio hibrido

Los laboratorios híbridos pueden tener varias motivaciones para su conformación. Primero: con el fin de ayudar al proceso de aprendizaje en el diseño, esto es ir desde la teoría hasta la experimentación real. Segundo: la necesidad de apoyar las modalidades de formación presencial y virtual frente a las competencias que requiere cada profesión sin necesidad de tener que adquirir más equipos. Tercero: brindar servicios a otras instituciones o actores facilitando equipos de alto costo para que fueran alquilados por un periodo de tiempo y finalmente con el desarrollo de las TIC´s aumentar la inmersión y las experiencias para los procesos de formación a los diferentes modos de aprendizaje

Existen diferentes definiciones de laboratorios híbridos. Algunas de ellas buscan con la implementación de los laboratorios híbridos brindar a los estudiantes un ambiente muy cercano o el mismo con los equipos y sistemas que se trabaja industrialmente, con el fin que las competencias sean acordes con el contexto tecnológico existente [3].

Un laboratorio híbrido es un laboratorio que combina laboratorio virtual y tecnologías de laboratorio remoto [9]. Los laboratorios de tipo mixto engloban una combinación de los laboratorios para experimentación física presencial y de los laboratorios de tipo virtual [10]. Laboratorios On-line híbridos proporcionan ambos experimentos remotos en modelos reales electromecánicas (sistemas físicos) en el laboratorio remoto, así como los modelos de simulación de estos sistemas físicos en los laboratorios virtuales [3].

Basado en ello se puede decir que existen dos tipos de concepción de un laboratorio hibrido; la primera es la posibilidad que el usuario o el gestor del laboratorio pueda hacer la elección del tipo de experiencia que quiere hacer bajo ciertas características y el segundo define al laboratorio híbrido como la combinación de recursos, estrategias y sistemas buscando sinergias y eficiencia de los recursos. La Fig. 5 muestra un la clasificación y elementos que pueden ser combinados para desarrollar LH.

3. Configuración de algunos tipos laboratorios híbridos

La mezcla de componentes en un laboratorio hibrido es una estrategia ideal para potencializar lo mejor de cada uno, adaptarse a los diferentes usos y necesidades, y en especial, canalizar las diferentes experiencias que se han realizado previamente para dar continuidad al proceso de buenas prácticas. Sin embargo esto implica un reto ya que no todas las tecnologías son compatibles o se pueden llevar a este tipo de ambientes. Se espera que con los desarrollos derivados de la mejora de las redes de comunicación, los dispositivos móviles y el desarrollo de *Cloud Computing* estas dificultades sean más fáciles de sortear.

Del trabajo realizado por Zutin [9], se menciona dos tipologías básicas de laboratorios híbridos; las locales y los Online, Zapata [11] complementa este trabajo involucrando el componente móvil y caracteriza ocho diferentes tipos de combinaciones. La propuesta es la combinación directa entre laboratorios de los cuatro tipos básicos y así generar seis tipologías estándar.

H1: laboratorio HO con recursos remotos: este tipo de laboratorio es conceptualmente un laboratorio remoto pero utiliza recursos físicos para complementar acciones que no facilita directamente la estación Hands-On

La estructura AVATAR_a brinda los recursos que no siempre tiene la estación que se está controlando directamente, por ejemplo; visión ampliada, sensores periféricos o iluminación. La Fig. 6, presenta la localización del Avatar_a y la estación CNC.



Figura 6: Laboratorio H1. Contiene adicional al remoto la estructura a) AVATAR_a que brinda servicios adicionales a la estación de Laboratorio remoto. b). La máquina tele-operada y c) El equipo de control.
Fuente: Los autores

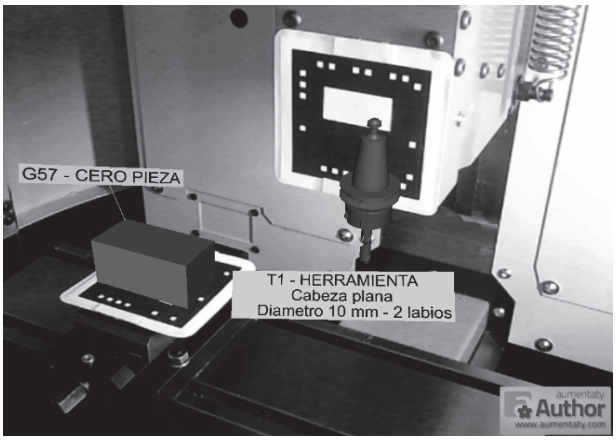


Figura 7. Vista principal del software de Realidad Aumentada en un proceso de simulación utilizando marcas sobre elementos de movimiento sobre la maquina real.
Fuente: Los autores

H2: Laboratorio HO con recursos virtuales Locales. Este tipo de laboratorio utiliza recursos físicos Hands-On pero se apoya en servicios de simulación local. La Universidad Nacional de Singapur ha desarrollado varias prácticas con apoyo de la Realidad Aumentada RA en un sistema modular CAD/CAM [12]. Adicionalmente existen otras aplicaciones en procesos de entrenamiento en manufactura [13], que utilizan avatares físicos y/o virtuales.

Para el caso práctico en la UCLM se utilizó un software comercial para la realidad aumentada, la representación geométrica del husillo porta pinzas y el bloque de material a trabajar en CAD. Se desarrolló de la escena RA desde el módulo AVATAR_a pro medio de la cámara WEB. La Fig.7, muestra la información básica para la verificación de la programación del recorrido de la herramienta.

La ventaja de esta simulación es que se puede visualizar por medio del AVATAR_a la experiencia sin necesidad de afectar la integridad del equipo que controla la máquina CNC.

Otras posibilidades de este tipo de laboratorio híbrido es incorporar dispositivos hápticos, para validar procesos de recorridos CNC desde el CAD o desde del CAM.[14,15].

H3: Laboratorio virtual simulado ubicado en una máquina virtual en un servidor en la nube. Es también conocido como escritorio remoto, en donde el software se instala virtualmente. Este tipo de aplicación es derivada del concepto Saas Software como un Servicio (del inglés: Software as a Service, SaaS) es un modelo de acceso al software donde los datos, el soporte y el ejecutor se almacenan en servidores en la nube.

H4: Experiencia remota con servicios en la nube; actividades de trabajo colaborativo que derivan en actividades individuales y viceversa. Un ejemplo es mostrado por [16] en el cual en un solo bus de intercomunicaciones conecta una sola plataforma de manufactura con acceso desde la estación remota de clientes en diferentes etapas del proceso. Otro caso exitoso de diseño, análisis de ingeniería y manufactura es desarrollado con una perspectiva de escalabilidad y reducción de costos [17].

Otros ejemplos comerciales de servicios en la nube son: Autodesk®, Solidworks®, ANSYS®, Simens SolidEDGE® que van desde la edición, virtualización, renderización optimización y almacenamiento desde cualquier lugar (incluidos los Smartphone) y en cualquier momento.

H5: Actividad de acceso remoto, que puede solicitar recursos virtuales locales como un instrumento virtual o una simulación en el equipo de soporte presencial. La Fig. 8, muestra el ambiente de simulación del lado del equipo real CNC antes de hacer la operación.

Debido a características no previstas en las simulación local, la simulación remota con el control de la máquina utilizando parámetros propios de maquina es más confiable.

H6: Actividad presencial Hands-On, derivada de actividad en la nube que solicita recursos o información para la manufactura fruto de un trabajo colaborativo. Plataformas CNC online propias como WebTurning [18], STEP-XML [19,20] son ejemplo de este tipo de estrategia de manufactura en mecanizado CNC donde la integración de operaciones se ejecuta en la nube pero se lleva a la realidad con ayuda de un operario.

En la literatura se encuentran referentes el uso de combinación de laboratorios y recursos en una sola estrategia de aprendizaje. Además se estudia el impacto de los diferentes

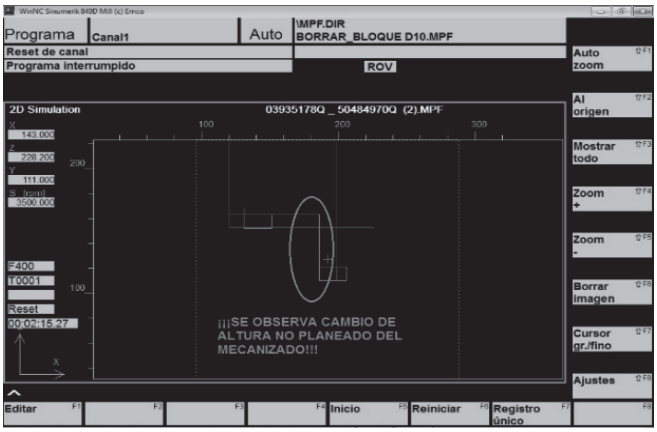


Figura 8. Simulación de recorridos en el software WinNC® Sinumerik® para la detección de errores antes de hacer un recorrido en vacío en la máquina CNC
Fuente: Los autores

laboratorios y su grado de efectividad por diferentes métodos; la encuesta, la calificación de curso y herramientas combinadas. Sin embargo son pocos los autores que aportan procedimentalmente al desarrollar laboratorios híbridos como un proceso integral desde la misma concepción del laboratorio hasta su evaluación y disposición final. Algunos trabajos parten de requerimientos y su diseño técnico [21]. Maite desarrolla su propuesta desde un laboratorio existente, en una propuesta detallada de un laboratorio *Hands-On* a un laboratorio remoto, para prácticas en dispositivos en estado sólido [22] y otras experiencias trabajan los objetivos educacionales en el campo de las ciencias básicas [23].

4. Características generales para el diseño de LH

El proceso de diseño y desarrollo tiene diversos aspectos a tener en cuenta, pero esta debe hacerse de forma ordenada y sistemática desde la concepción misma de la experiencia de laboratorio hasta su posible evaluación. En cada momento se generan requerimientos que se han de convertir en especificaciones de los componentes y características generales de las estructuras. Para la integración de los requerimientos, se optó como herramienta en ingeniería, por la cascada de matrices de Despliegue de la Función de Calidad (o QFD). La Fig. 9, se muestra los principales campos de trabajo de la QFD. La primera matriz, la casa de calidad (HOQ por sus siglas inglesas) describe las especificaciones de diseño, la segunda el diseño del producto (laboratorio) en sí, la tercera la incorporación de los sistemas (diseño del proceso) y la cuarta la propuesta de implementación y calidad. Las ventajas de esta metodología en etapas tempranas, está en dar mayor calidad en el diseño, incorporación de muchos requerimientos, menor costo, disminución en el tiempo de implementación, y utilizar el benchmarking como medio de comparación con otras propuestas [24]. Cada salida de especificaciones de una matriz es la entrada de requerimientos de la próxima como se observa en la Fig.10.

La parte fundamental de la cascada de matrices está en el desarrollo de ponderaciones de especificaciones y relacionamientos entre variables. Para ello se utiliza una matriz con seis campos.

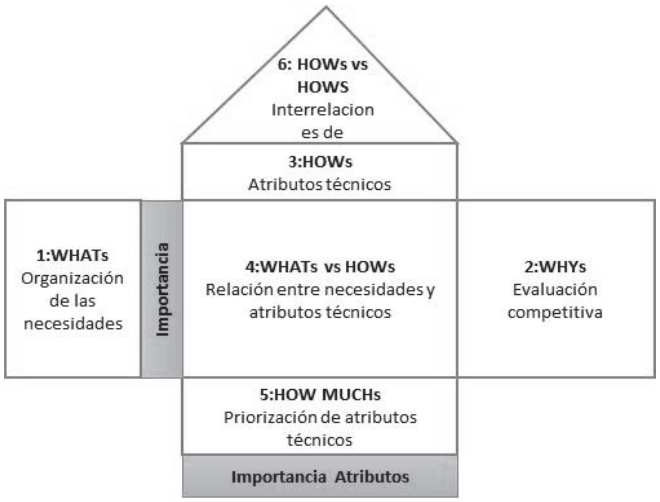


Figura 9. La matriz QFD, agrupo en un mismo grafo; áreas, matrices y vectores que facilitan la integración de principios de diseño conceptual.
Fuente: Los autores

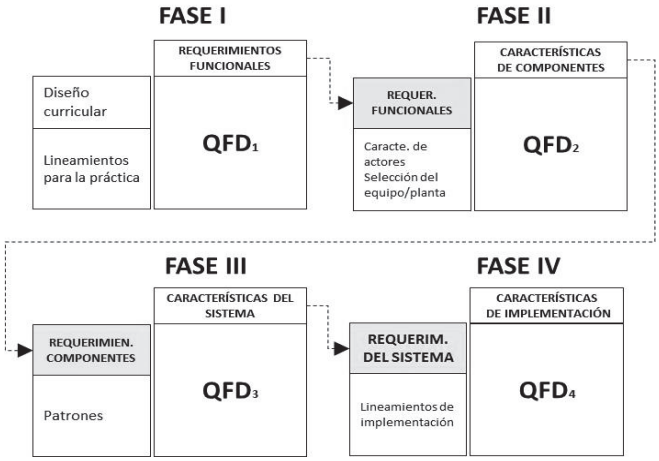


Figura 10. Conexión entre Matrices QFD
Fuente: Los autores

Tabla 1.
Elementos QFD1

Fuente de requerimientos		Producto
Diseño curricular	Referentes de formación en el área [SME]	• Objetivos el laboratorio • Actividades esperados • Perfil de usuarios
	Acreditación de programas [ABET]	
	Estrategias pedagógicas	
Lineamientos para la práctica	Uso	
	Acreditadores	

Fuente: Los autores

Cada una de las cuatro fases incorpora requerimientos que va consolidando una propuesta robusta e integrada para la concepción del laboratorio y tres estructuras básicas; lógicas, físicas y administrativas.

Las salidas de una QFD se convierten en parte de insumo de la siguiente y al integrar todas las salidas se caracteriza la tipología de laboratorio que se necesita, teniendo en cuenta los actores, y los recursos disponibles.

4.1. QFD1: Diseño de especificaciones

La primera matriz corresponde a la consolidación del modelo, objetivo del laboratorio y sus usos. Las fuentes de los requerimientos se concentran en las necesidades curriculares y los lineamientos de la práctica.

Las características de diseño curricular deben ser coherentes con las temáticas que debería conoce un ingeniero de manufactura y que se quieren trabajar puntualmente; para manufactura la *Society of Manufacturing Engineers* (SME); ha acotado los temas a: Matemáticas, Ciencias Aplicadas y de Ingeniería y materiales, Diseño Producto/ Proceso y su desarrollo, Aplicación de procesos de fabricación y operación, Sistema de producción y Diseño de equipo y Desarrollo, Sistemas automatizados y de control, Calidad y Mejora Continua, Administración de manufactura y Efectividad personal. También se contempla en esta etapa; las competencias y habilidades profesionales, del saber hacer. Como referente en ingeniería están las declaradas por *Accreditation Board for Engineering and Technology* (ABET) en sus competencias

Tabla 2.
Elementos QFD_2.

Fuente de Requerimientos		Producto
Requerimientos Funcionales		
Características de actores	Requerimientos de los actores	• Estructura Lógica • Estructura Física
	Requerimientos del grupo de usuarios	
Selección del equipo o planta	Requerimientos de los componentes	
	Requerimientos del conjunto	

Fuente: Los autores

genéricas a-k. Para hacer un vínculo entre estos dos primeros componentes es útil la especificación de las estrategias de aprendizaje. Y por último; la definición del uso (monitoreo, investigación, fabricación y formación) y las disposiciones que deben tener los recursos educacionales frente a las instituciones certificadoras.

4.2. QFD2: Diseño de producto - Laboratorio

La segunda matriz toma los requerimientos funcionales de la primera matriz y ahora son incorporados como fuente de requerimientos conjuntamente con las características de actores y elección del equipo o planta. Lo que se obtiene de esta matriz es la estructura lógica y física de los módulos de laboratorios LH.

Para la especificación del diseño de componentes es importante tener en cuenta los requerimientos de los actores, especialmente de los estudiantes. Se debe especificar: la modalidad de formación (presencial, virtual, *b-learning*) y los estilos de aprendizaje pertinentes. Como característica global de grupo se involucra; los conocimientos previos y el nivel de formación requerido.

Los requerimientos particulares de los componentes son muy variados, pero se pueden agrupar en dos; Los requerimientos de los componentes desde el punto de vista tecnológico (económico y fácil de adquirir, control del tiempo de reacción, seguro no generar error, multiplataforma, plug-and-play, autónomo, interconectable - estandarizado, confiable, multitarea y programable). Y los requerimientos del laboratorio hibrido desde el punto de vista de la estrategia del proceso del diseño (confortable, seguro, modular y ajustable, reutilizable, datos confiables, versátil y bajo consumo de recursos, cumplir con normativas de seguridad, fácil de usar, reconfigurable y estable, no intrusivo, multiusuario, fácil de hacer mantenimiento).

Como un conjunto de componentes también deberá: brindar respuesta rápida, mantener una buena resolución, contar con una alta fiabilidad y fácilmente de configurar.

4.3. QFD_3: Diseño de sistema - Calidad (proceso)

La tercera matriz toma las características de los componentes como requerimientos del sistema y se le adicionan los Patrones de referencia; normativas, Ambiente de Aprendizaje, nivel de desarrollo tecnológico y tecnología disponible y del sistema. Esta matriz se obtiene las características del sistema que soporta los módulos de laboratorio LH.

Tabla 3.
Elementos QFD_3.

Fuente de Requerimientos		Producto
Requerimientos De Componentes		
Patrones	Normativas y Referentes	• Estructura Administrativa
	Ambiente de Aprendizaje	
	Requerimiento del Sistema	

Fuente: Los autores

Tabla 4.
Elementos QFD_4.

Fuente de Requerimientos		Producto
Requerimientos Del sistema		• Parametrización sistema de acceso y reservas. • Valoración de recursos • Programación de sistemas de apoyo
Lineamientos de implementación	Recursos	
	Adaptación	
	Planes	

Fuente: Los autores

El objetivo de esta matriz es generar una estructura administrativa para los laboratorios LH y que pueda incorporarse el módulo LH u otro tipo de laboratorio sin inconvenientes. Si la elección de un laboratorio es de tipo *Hands-On* los subsistemas de esta estructura deben permitir desarrollarse sin inconvenientes con otros tipos de laboratorios que trabajen de forma simultánea con el mismo equipo.

4.4. QFD_4: Diseño de implementación

La cuarta y última matriz tiene como objetivo prepar la incorporación de un nuevo módulo desarrollado al sistema existente. Para ello se maneja como un proyecto de implementación. Particularmente el manejo de recursos (tiempo y costo) y personas es fundamental en la etapa de implementación ya que la incorporación tardía de un módulo de LH, o la falta de capacitación de los laboratoristas puede generar ineficiencias en el uso de los laboratorios. Los requerimientos de esta etapa se enfocan en la gestión de recursos, actividades de adaptación y los planes de apoyo a la implementación.

Al igual que la puesta en funcionamiento de un producto es ideal hacer ejercicios previos de operación, verificar errores e incorporación de ayudas adicionales.

5. Estructura de los laboratorios LH en ingeniería de manufactura

El uso en laboratorios para la manufactura, tienen algunas características que se ven reflejadas tanto en la concepción como en las estructuras que lo componen. Entre las más importantes se puede señalar:

- Involucra muchas variables inciertas o desconocidas.
- El uso de los equipo es costo al igual que sus insumos.
- Los riesgos de accidente son altos
- La experimentación hace parte de un proceso integral
- Requiere de conocimientos técnicos para el uso de equipos especializados.
- Los equipos requieren de un tiempo de alistamiento y un

tiempo después de la actividad.
- Muchas de las magnitudes a controlar no son parte integral del equipo.
- Su uso está fuertemente ligado al proceso de diseño del producto.
- Cada práctica puede tener un número grande de variables.
- No todos los procesos son factibles de acceder de forma remota (tiempo, precisión, seguridad).
- La simulación puede perder un poco de realismo.
- La adquisición del conocimiento de una práctica requiere de un proceso estructurado de experimentación.

Derivado del proceso de las matrices QFD y para poder sortear algunas de estas dificultades se incorporan adicional a la concepción del laboratorio, tres estructuras integradas (lógica, física y administrativa) en un módulo funcional para ser anexado en el sistema universal de laboratorios internos o externos federados. La Fig. 11, muestra las etapas de desarrollo de estas tres estructuras. A este módulo se ha denominado SMAT (Sistema Modular de Acceso Rápido Temporal).

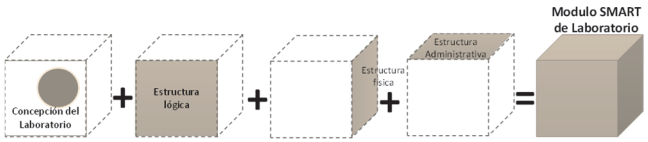


Figura 11: Conexión entre Matrices QFD.
Fuente: Los autores

Antes de iniciar una propuesta de LH, se analizan tres elementos claves de diseño: relación de formación y recursos disponibles, la relación costo - beneficio y la efectividad en el cumplimiento de los objetivos [25]. Este último debe ser integrado a la creación de comunidad interna y externa a la institución. Además, se pueden considerar otros aspectos al momento de definir las especificaciones para diseñar, implementar y gestionar laboratorios híbridos, sin embargo es recomendable seguir una estructura estandarizada, por diferentes razones:
- Operar equipos con las características de propias automatización
- Desarrollo de sistemas de Integración entre equipos
- Posibilidad de hacer un trabajo cooperativo interno o externo
- Compartir recursos entre laboratorios

5.1. Consideraciones de la concepción del laboratorio

El uso de un laboratorio independiente del tipo debe cumplir eficazmente para lo que ha sido diseñado. Para ello desde la concepción debe someterse a procesos de evaluación y pertinencia. El laboratorio pedagógicamente puede tener tres enfoques:

Conceptual: comprender cuál puede ser su uso, hechos, datos y conceptos (leyes o teoremas), en el caso de mecanizado; fuerzas de corte, desgaste de herramientas, acabado superficial, etc.

Procedimental: determinación de acciones ordenadas, orientadas a la consecución de una meta. Un ejemplo es la correcta determinación del proceso de ejecución de un mecanizado CNC partiendo desde el CAD

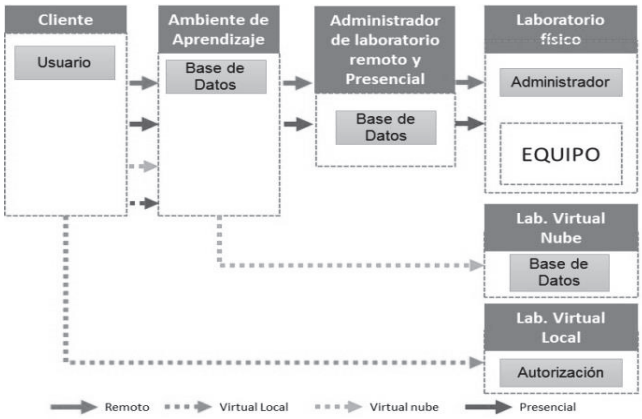


Figura 12: Modelo de la estructura lógica.
Fuente: Los autores

Actitudinal: Son actividades que determinan tendencias, o disposiciones adquiridas y duraderas, La actitud pude involucrar componentes: Cognitivos, afectivos y conductuales. Un caso de ello es mejorar el grado positivo de percepción de programación para la programación CNC.

5.2. Consideraciones de la estructura lógica

El objetivo de tener una estructura lógica estandarizada es la de facilitar el diseño; de protocolos, identificación de roles, asignación de actividades y responsabilidades, facilitar la elaboración de objetos y organizar los componentes del laboratorio.

Zapata y Larrondo [11] proponen una estructura para laboratorios remotos basada en la arquitectura de Laboratorio como un servicio (en inglés LaaS), la propuesta está elaborada en cuatro capas; cliente, ambiente de aprendizaje, administrador de laboratorio y laboratorio físico.

La Fig. 12, muestra una propuesta para los laboratorios LH basada en el trabajo de Zapata pero para todas las posibles modalidades de laboratorios. Algunos elementos comunes de la estructura lógica son: I/O Sensores y actuadores (Del equipo o externos), Visión estática o de cambio de posición a disposición del usuario, Sistema bi-direccional de comunicación en tiempo real; chat, micrófono y parlante, Acceso a la red Internet - Intranet, Sistema de cooperación entre usuarios (chat- video-audio).

5.3. Consideraciones de la estructura física

El objetivo de la estructura física es poder dar el acceso a la experiencia en el laboratorio de una forma fácil y accesible. La estructura física de un laboratorio puede tener diferentes elementos: Equipo (Máquina, Planta, Instalación), Visualización de resultados (comportamiento de la prueba), Un servidor de laboratorio -Controlador (Software del equipo, controladores programables, IV, panel, etc.), Almacenamiento y transmisión de datos, Sistema de seguridad tacita y/o activa y acceso a una fuente de energía.

5.4. Consideraciones de la estructura administrativa

La estructura administrativa cumple una función de cooperación, autenticación, seguridad y seguimiento. Los sistemas que se reconocen en esta estructura están: Sistema de control de acceso a la plataforma y al equipo (plataforma y comunicaciones), Sistema de reservas o colas y comunicación de su administración *(Scheduling*), Sistema de Gestión de Contenidos (Repositorio y divulgación), Sistemas de evaluación y eficacia del laboratorio.

6. Operación y evaluación de LH

La operación de un laboratorio debe seguir el ciclo de vida de un producto, se mejora su rendimiento en la medida de lo posible por medio de la evaluación permanente y cuando entre en desuso es necesario sacarlo del sistema. Por ello el uso del laboratorio y su sistema se deben mantener indicadores y métodos constantemente operando con el fin de mejorar y sortear falencias y riesgos. Se reconocen cuatro dimensiones a evaluar:

Usabilidad-Idoneidad-Pertenecía: algunas herramientas que se utilizan para evaluar este aspecto son; el Modelo de Aceptación Tecnológica (MAT) [26], y el CDIO Conceive, Design, Implement and Operate (concebir o crear, diseñar, implementar y operar).

Evaluación estudiante - desarrollo cognitivo: algunos modelos como el aprendizaje experiencial de Kolb[27] y 4MAT de Bernice McCarthy[28] tienen sus propias pautas de evaluación en el trabajo de laboratorio, sin embargo modelos más sencillos como los de mejoramiento de competencias de ABET [29] y [5] han evidenciado resultados eficaces de evaluación.

Eficacia - ***Learning Analitics*** Una de las grandes propuestas para los próximos años está en el uso de grandes cantidades de información (Big Data) con el fin de brindar un apoyo más personalizado al usuario y adaptarse a las necesidades del contexto de forma rápida [30].

6.1. Requerimientos en una aplicación experimental

Ya que en manufactura se deben desarrollar competencias que evidencien el uso del proceso de diseño en ingeniería y en especial en manufactura se trabajó con las temáticas pertinentes del diseño de procesos. Para ello se seleccionó dos muestras de estudiantes de las universidades; Castilla de la Mancha de España y la Universidad EAN de Colombia. Las características se muestran en la Tabla 5

Los requerimientos de cada fase de la aplicación de la QFD se convierten a especificaciones por la aplicación de la metodología de ponderación de componentes de los requerimientos por parte de los expertos y decisores de las experiencias de laboratorio. Para cada fase se presenta su procedimiento:

Fase I:

- Defina y priorice las necesidades de los interesados en los laboratorios (estudiante, docente, auxiliar, administrador)
- Analizar oportunidades competitivas, frente a otros tipos de laboratorios.

Tabla 5.
Característica de las poblaciones experimentales.

	Universidad UCLM	**Universidad EAN**
País	España	Colombia
Modalidades	Presencial	Virtual
Titulación	Ingeniería Electrónica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Industrial	Ingeniería de Producción
Unidad de estudio	a)Sistemas de Fabricación y Organización Industrial	a)Gestión de Materiales b)Análisis de Procesos Físicos
Número de estudiantes	99	22
Laboratorios realizados	CNC	CNC,
Tipos de laboratorio Básicos	HO: *Hands-On* LVL: Virtual Local	LR: Laboratorio remoto LVL: Laboratorio Virtual Local HO: *Hands-On*

Fuente: Los autores

- Planear un módulo para responder a las necesidades y oportunidades
- Establecer valores críticos y criterios objetivos.

Fase II:

- Identifique los componentes críticos (sensores y actuadores) y su ensamble (coherencia y adaptación)
- Descienda de las características críticas del módulo LH
- Traducir las características y los valores objetivos de los componentes críticos.

Fase III

- Determine procesos críticos y flujo de proceso del laboratorio
- Desarrolle los requisitos del equipo que va hacer el LH
- Establezca parámetros críticos del proceso de formación y los elementos de seguridad (OH)

Fase IV

- Determine la lógica de los componentes clave y las características del proceso formativo
- Establecer métodos y parámetros de control de proceso formativo
- Establecer métodos y parámetros de inspección y prueba del proceso formativo.

Una primera aplicación del módulo LH en las Universidades UCLM y EAN dio como resultado requerimientos especificase contenidos en la Tabla 6.

Tabla 6.
Requerimientos básicos utilizados en la generación de los LH

Fase	**UCLM**	**EAN**
I	- Tema- Mecanizado CNC - Laboratorio H0 y LR - Objetivo: Diseño de procesos	- Tema- Mecanizado CNC - Laboratorio LR y LV - Objetivo: Diseño de procesos
II	- Profundizar en caracterización del mecanizado. - Indicadores: tiempo de mecanizado, minimizar fallas de código	- Profundizar en caracterización del mecanizado. - Indicadores: tiempo de mecanizado, minimizar fallas de código
III	- Compilación del código del simulador a la máquina. - Equipo con simulador incorporado	- Compilación del código del simulador a la máquina. - Equipo asistido por computador
IV	- Inspección visual de recorridos - Alarma de maquina	- Inspección visual de recorridos - Alarma de máquina

Fuente: Los autores

Tabla 7.
Variables descriptoras dela encuesta MAT.

Variable descriptora	Valor - Media
Laboratorio	7,82
Comprensión teórica	8,15
La práctica teórica es más fácil	8,50
Facilidad de la interfaz	8,11
Realismo	8,03
Autosuficiencia	5,86
Tiempo suficiente	8,37
Instrucciones	8,32
Facilidad de acceso	8,11

Fuente: Los autores

Algunas variables de evaluación relevantes del uso del LH en proceso de formación, fueron obtenidas del módulo propuesto por medio de la aplicación de un cuestionario basado en el Modelo de Aceptación Tecnológica (MAT), para ambas poblaciones. La Tabla 7 muestra el resultado de variables descriptoras con $p<0.05$. Donde se resalta que la variable descriptora que obtuvo el más alto valor es 'La práctica teórica es más fácil` y la más baja Autosuficiencia.

7. Conclusión

La creación de laboratorios híbridos, más que brindar la posibilidad de elegir en cual tipo se quiere desarrollar una práctica, brinda la posibilidad de integrar; buenas prácticas de otros laboratorios, incorporar estrategias de aprendizaje, uso eficiente de los recursos, facilidad en su uso y gestión de su ciclo de vida.

Ya que un laboratorio LH combina un gran número de características de cada tipo de laboratorio: presenciales (HO), virtuales (LV) y remotos (LR) es recomendable que se aborde por fases que van sumando características y facilitan su incorporación en sistemas modulares y estrategias de servicios (LaaS)

Sin embargo existen algunos retos que se espera que los laboratorios LH puedan ayudar a sortear; Uno de ellos es la posibilidad de compartir laboratorios ya que su estructura modular facilita la interoperabilidad de todo el sistema en cualquier tipología.

Como sistema, es altamente escalable ya que su estructura modular permite organizar los recursos en diferentes formas sin necesidad de tener un recurso para cada tipo. Además las tipologías de LH son factibles de federar para poderlos compartir.

La experiencia obtenida en el uso de LH en la Universidad Castilla LaMancha y EAN, han generado nuevos interrogantes para que sean investigados con mayor detalle, por ejemplo en la efectividad formativa, la usabilidad y su costo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de la Universidad Castilla LaMancha y la Universidad EAN y a los estudiantes de Ingeniería Industrial y Producción de ambas instituciones.

Referencias

[1] Popović, B., Popović, N., Mijić, D., Stankovski, S. and Ostojić, G., Remote control of laboratory equipment for basic electronics courses: A LabVIEW-based implementation, Comput. Appl. Eng. Educ., pp. 110-120, 2011. DOI: 10.1002/cae.20531

[2] Ashby, J.E., The effectiveness of collaborative technologies in remote lab delivery systems, Proc. - Front. Educ. Conf. FIE, pp. 7-12, 2008. DOI: 10.1109/FIE.2008.4720394

[3] Henke, K., Ostendorff, S., Wuttke, H.D., Vietzke, T. and Lutze, C., Fields of applications for hybrid online labs, Int. J. Online Eng., 9(SPL3), pp. 20-30, 2013. DOI: 10.3991/ijoe.v9iS3.2542

[4] Muriel, J. and Giraldo, E., Adecuación tecnológica de un torno Compact 5 CNC a través de un PC, Inf. Técnico, 74, pp. 7-13, 2010.

[5] Elawady, Y.H. and Tolba, A.S., Educational objectives of different laboratory types: A -, Int. J. Comput. Sci. Inf. Secur., 6(2), pp. 89-96, 2009.

[6] Benmohamed, H., Leleve, A. and Prevot, P., Generic framework for remote laboratory integration, Inf. Technol. Based High. Educ. Training, 2005. ITHET 2005. 6th Int. Conf., p. T2B, 2005. DOI: 10.1109/ITHET.2005.1560229

[7] Vargas, H., Dormido, R. and Duro, N., Creación de laboratorios virtuales y remotos usando Easy Java Simulations y Labview. 'El sistema Heatflow como un caso de estudio, XXVII Jornadas de Automática, pp. 1182-1188, 2006.

[8] Dormido, S., Compartiendo recursos de experimentación a través de Internet: La experiencia automatL@bs, Rev. 100cias@uned, pp. 365-382, 2008.

[9] Zutin, D.G., Auer, M.E., Maier, C. and Niederstatter, M., Lab2go—A repository to locate educational online laboratories, Educ. Eng. (EDUCON), 2010 IEEE, pp. 1741-1746, 2010. DOI: 10.1109/EDUCON.2010.5492412

[10] Borge-Diez, D., Laboratorio remoto de eficiencia energética integrado en redes de generación distribuida, Tesis Dr., Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2012.

[11] Zapata, L. and Larrondo-Petrie, M.M., Models of remote laboratories and collaborative roles for learning environments, February, pp. 408-414, 2016. DOI: 10.1109/REV.2016.7444517

[12] Yew, A.W.W.S., Ong, K. and Nee, A.Y.C., Towards a griddable distributed manufacturing system with augmented reality interfaces, Robot. Comput. Integr. Manuf., 39, pp. 43-55, 2016. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.12.002

[13] Osterlund, J. and Lawrence, B., Virtual reality: Avatars in human spaceflight training, Acta Astronaut., 71, pp. 139-150, 2012. DOI: 10.1016/j.actaastro.2011.08.011

[14] Fletcher, C., Ritchie, J., Lim, T. and Sung, R., The development of an integrated haptic VR machining environment for the automatic generation of process plans, Comput. Ind., 64(8), pp. 1045-1060, 2013. DOI: 10.1016/j.compind.2013.07.005

[15] Zhu, W. and Lee, Y.S., Five-axis pencil-cut planning and virtual prototyping with 5-DOF haptic interface, CAD Comput. Aided Des., 36(13), pp. 1295-1307, 2004. DOI: 10.1016/j.cad.2004.01.013

[16] Xu, X., From cloud computing to cloud manufacturing, Robot. Comput. Integr. Manuf., 28(1), pp. 75-86, 2012. DOI: 10.1016/j.rcim.2011.07.002

[17] Wu, D., Terpenny, J. and Gentzsch, W., Cloud-Based Design, engineering analysis, and manufacturing: A Cost-Benefit analysis, Procedia Manuf., 1, pp. 64-76, 2015. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.061

[18] Álvares A.J. and Ferreira, J.C.E., WebTurning: Teleoperation of a CNC turning center through the Internet, J. Mater. Process. Technol., 179(1-3), pp. 251-259, 2006. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.096

[19] Newman, S.T., Nassehi, A., Xu, X.W., Rosso, R.S.U., Wang, L., Yusof, Y., Ali, L., Liu, R., Zheng, L.Y., Kumar, S., Vichare, P. and Dhokia, V., Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology, Robot. Comput. Integr. Manuf., 24(6), pp. 699-708, 2008. DOI: 10.1016/j.rcim.2008.03.002

[20] Nyanga, L., Van Der Merwe, A.F., Matope, S. and Dewa, M.T., A web based manufacturability agent framework for an E-manufacturing system, Procedia CIRP, 28, pp. 167-172, 2015. DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.029

[21] Calvo, I., Marcos, M., Orive, D. and Sarachaga, I., A methodology based on distributed object-oriented technologies for providing remote access to industrial plants, Control Eng. Pract., 14(8), pp. 975-990, 2006. DOI: 10.1016/j.conengprac.2005.05.008

[22] Maiti, A. and Tripathy, B., Remote laboratories: Design of experiments and their web implementation, Educ. Technol. Soc.,

16(3), pp. 220-233, 2013. DOI: 10.2307/jeductechsoci.16.3.220
[23] Olympiou, G. and Zacharia, Z.C., Blending physical and virtual manipulatives: An effort to improve students' conceptual understanding through science laboratory experimentation, Sci. Educ., 96(1), pp. 21-47, 2012. DOI: 10.1002/sce.20463
[24] Olaya, E.S., Cortés, C.J. y Duarte, O.G., Despliegue de la función calidad (QFD): Beneficios y limitaciones detectados en su aplicación al diseño de prótesis mioeléctrica de mano, Ing. e Investig., 57(57), pp. 30-38, 2005.
[25] Zamora-Musa, R., Laboratorios remotos. Análisis, características y desarrollo como alternativa a la práctica en la Facultad de ingeniería, Rev. Inge-CUC, 6(6), pp. 281-290, 2010.
[26] Yong, L., Rivas, L. y Chaparro, J., Modelo de aceptación tecnológica (TAM): Un estudio de la influencia de la cultura nacional y del perfil del usuario en el uso de las TIC, Innovar, 26(36), pp. 187-203, 2010.
[27] Abdulwahed, M., Towards enhancing laboratory education by the development and evaluation of the 'TriLab': A triple access mode (virtual, hands-on and remote) laboratory. Tesis Dr., Universidad Loughborough, Reuno Unido UK, 2010.
[28] Ovez, F.T.D., The effectiveness of 4mat teaching model in overcoming learning difficulties in the perimeter and area of circle and perpendicular cylinder among the seventh year students, Procedia - Soc. Behav. Sci., 46, pp. 2009-2014, 2012. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.05.419
[29] Ma, J. and Nickerson, J.V., Hands-on, simulated, and remote laboratories, ACM Comput. Surv., 38(3), p. 7-es, 2006. DOI: 10.1145/1132960.1132961
[30] Heradio, R., de la Torre, L., Galan, D., Cabrerizo, F. J., Herrera-Viedma, E. and Dormido, S., Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis, Comput. Educ., 98, pp. 14-38, 2016. DOI: 10.1016/j.compedu.2016.03.010

J.D. Velosa-García, es Ing. Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Msc. en Ingeniería - Materiales y Procesos de Manufactura. Estudiante de doctorado en Ingeniería de la Universidad EAN, Colombia y de la Universidad Castillla La Mancha, España. Actualmente es profesor titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad EAN. El área de investigación en manufactura y materiales y los modelos pedagógicos aplicados en Ingeniería.
ORCID: 0000-0002-8265-9532

L. Cobo, es Ing. de Sistemas y Computación de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. También posee un MSc. en Ingeniería de Sistemas y Computación, es Dr. en Ingeniería de la misma Universidad. Obtuvo un PhD. en Génie Informatique de la Université de Montréal, Canadá. Actualmente es profesor titular de la Universidad EAN. El área de investigación está concentrada en la analítica para el internet de las cosas, la analítica de datos educacionales y las redes inalámbricas de sensores.
ORCID: 0000-0003-3034-101X

F.J. Castillo-García, es Ing. Industrial en 2000 y Dr. Ingeniero Industrial en 2010 por la Universidad de Castilla-La Mancha, España. En la actualidad es profesor contratado Dr en la E.I.I. de Toledo donde imparte asignaturas de área de ingeniería de sistemas y automática. Sus principales líneas de investigación son las aplicaciones control de orden fraccional, el control de robots cuadrúpedos y el diseño mecatrónico de robots paralelos comandados mediante cables. Tiene más de 20 publicaciones en revistas indexadas en JCR y más de 50 contribuciones en congresos nacionales e internacionales. Ha participado en numerosos proyectos de investigación con financiación pública y privada y en la actualidad es Investigador Principal de dos proyectos de I+D del plan nacional de investigación.
ORCID: 0000-0001-5389-4253

E. Espíldora, es Dra. En 2003 de la Universidad de Castilla-La Mancha, España, trabajando en química fullerena bajo la dirección del Prof. F. Langa. Se unió al grupo de Prof. Nazario Martín de la Universidad Complutense de Madrid donde trabajó como investigadora postdoctoral (2008) y fue científica visitante en IMDEA-Nanoscience (2013), trabajando en la preparación de materiales basados en fullereno para aplicaciones fotovoltaicas. Actualmente es profesora asociada de ciencia de materiales y sistemas de manufactura en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de Castilla-La Mancha.
ORCID: 0000-0001-6003-4497



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
de Sistemas e Informática

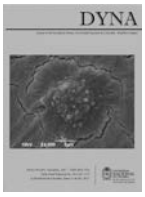
Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas
Especialización en Mercados de Energía
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas
Doctorado en Ingeniería- Sistemas e Informática

Mayor información:

E-mail: acsei_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5365

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Performance evaluation of M-ary algorithm using reprogrammable hardware

Sergio Andrés Arenas-Hoyos & Álvaro Bernal-Noreña

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia. sergio.arenas@correounivalle.edu.co, alvaro.bernal@correounivalle.edu.co

Received: June 5th, 2017. Received in revised form: August 23th, 2017. Accepted: September 18th, 2017

Abstract
Several ways to perform data encryption have been found, and one of the functions involved in standard algorithms such as RSA is the modular exponentiation. Basically, the RSA algorithm uses some properties of modular arithmetic to cipher and decipher plain text, with a certain performance dependence on text lengths. The growth in computing capacity has created the need to use robust systems that can perform calculations with significantly large numbers and the formulation of procedures focused on improving the speed to achieve it. One of these is the M-ary algorithm for the execution of the modular exponential function. This paper describes an implementation of this algorithm in reprogrammable hardware (FPGA) to evaluate its performance.
The first section of this work introduces the M-ary algorithm. The second section uses block description for implementation understanding. The third section shows the results in time diagrams, and finally, the last section conclusions.

Keywords: cryptosystems; modular exponentiation; modular arithmetic; RSA algorithm; FPGA; M-ary algorithm.

Evaluación del desempeño del algoritmo M-ary en hardware reprogramable

Resumen
Se han encontrado diversas formas de realizar cifrado de datos, y una de las funciones involucradas en algoritmos estándar como el RSA es la exponencial modular. Básicamente, el algoritmo RSA utiliza algunas propiedades de la aritmética modular para cifrar y descifrar textos planos, con cierta dependencia en la longitud del texto. El crecimiento en la capacidad de cómputo ha creado la necesidad de utilizar sistemas robustos que puedan realizar cálculos con números significativamente grandes, y la formulación de procedimientos enfocados en mejorar la velocidad para lograrlo. Uno de éstos es el algoritmo M-ary para la ejecución de la función exponencial modular. Este artículo describe una implementación de este algoritmo en hardware reprogramable (FPGA) para evaluar su desempeño.
La primera sección introduce el algoritmo M-ary. La segunda, usa descripción en bloques para comprender la implementación. La tercera, muestra los resultados en diagramas de tiempo, y finalmente, la última sección expone conclusiones.

Palabras clave: criptosistemas; exponencial modular; aritmética modular; algoritmo RSA;FPGA; Algoritmo M-ario.

1. Introduction

Modern systems are designed to obtain better performance in terms of merit figures, such as power, area and/or speed. In hardware terms, the natural language of a computer is a set of integers restricted by a number, named modulo, establishing a ring of integers. This introduces the concept of modular arithmetic and its consequent number representation that is used in many areas, including digital signal processing or cryptographic systems [5]. This representation been probed using modular arithmetic, specifically Residue Number System RNS [12], instead of two-complement or classical weighted binary, to increase the speed performance in FIR filters [8,9].

This paper focuses on a specific implementation of a special modular function, modular exponentiation. Taking advantage of the inherent flexible characteristics of FPGA

How to cite: Arenas-Hoyos, S.A. and Bernal-Noreña, A., Performance evaluation of M-ary algorithm using reprogrammable hardware DYNA, 84(203), pp. 75-79, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

architecture, it is possible to develop a system that uses the M-ary algorithm [10] to test various characteristics, which are verified with a software equivalent and compared with previous implementations of the method.

Previous systems were made with different schemes, taking advantage of a pure hardware co-design approach (hardware subsystem and software subsystem) or using algorithms such as an addition-chain to reduce multiplication steps [7,11]. These systems were based on combining their best characteristics.

Modular exponentiation consists in finding a solution to the following eq. (1):

$$Z = X^y mod M, 2^{(n-1)} < M < 2^n \quad (1)$$

where *n* is the length of *M* in bits.

The M-ary algorithm can be subdivided into different sub processes as follows [5]: exponent segmentation in *w* windows of *d* bits, preprocessing and storing of every possible power of any base in a range determined by 0 to 2^d, squaring and multiplying to obtain a result. These steps are illustrated in the pseudo code scheme shown in Fig. 1.

Modular exponentiation implies another operation, modular multiplication. This function is implemented with an algorithm called the Montgomery Method [6,12]. This process takes two cycles, one for pre-calculating a result in a space called the M-residues Space with an undesirable factor R^-n called the multiplicative inverse of R = 2^n mod M. After the first cycle, a second cycle is used to recover the desired multiplication without the R^-n factor. This method avoids computing the integer division, which is an expensive operation in hardware.

The Montgomery Method is described in the pseudo code shown in Fig. 2.

```
Set V0 = 1 and V1 = X
        From j = 2 to (2d-1) do {
                Vj= Vj-1XmodM;
        From i=k-1 to 0 do
                        d-1
                F(i) = ∑yid+t2t
                        t=0
        Set Z = VF(k-1)
        From i=k-2 to 0 do
                From j=0 to (d-1) do
                        Z = Z*ZmodM
                If F(i) ≠ 0 then Z = Z*VF(i) modM
Halt
```

Figure 1. Pseudo code for M-ary algorithm
Source: [4]

```
Z = 0
for i = 0 to n-1
    Z = Z + x_i × Y
    if Z is odd then Z = Z + M
    Z = Z/2
if Z = M then Z = Z - M
```

Figure 2. Pseudo code for Modular Multiplication using the Montgomery algorithm.
Source: [2]

Modular multiplication
Inputs: *A, B, M, Inv*
Outputs: *R_final*

R_MM, R_final = 0
1: R_MM= Montgomery (A, B, M)
2:R_final= Montgomery (R_MM, Inv, M)

Return R_final

Figure 3. Pseudo code for Modular Multiplication
Source: The authors.

Modular multiplication can be described as shown in Fig. 3.

2. Implementation

The complete system was modeled with VHDL language using basic libraries like the IEEE Standard, allowing the system to be more generic and portable among different architectures. Reprogrammable hardware is used because it allows the design of digital architectures with certain flexibility.

In a block description, modular exponentiation has four subsystems that work together including the Montgomery Multiplier, the Storage Unit, the Exponent Segmentation Unit, and the Control Unit. These blocks are shown in Fig. 4.

Sequential logic uses a Finite States Machine under the Moore scheme, where the outputs depend only on the actual state because asynchronous behaviors should be avoided due to a complex and significant quantity of states (approximately 40 for the principal control module).

Internally, the Montgomery Multiplier has another sub control unit, which synchronizes a data path and advertises to the central unit when multiplication is finished. This controller also switches sources in the multiplier when a Montgomery cycle is completed, as illustrated in Fig. 5.

Operands have a 12-bits length, implying the use of 12-bits and 1-bit carry units.

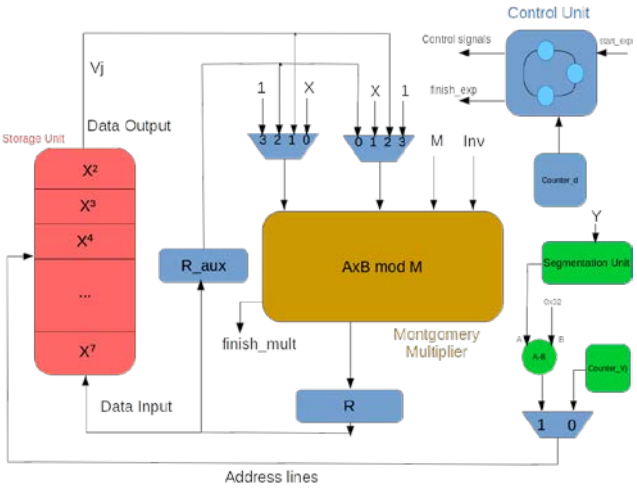


Figure 4. Modular exponentiation general system
Source: The authors.

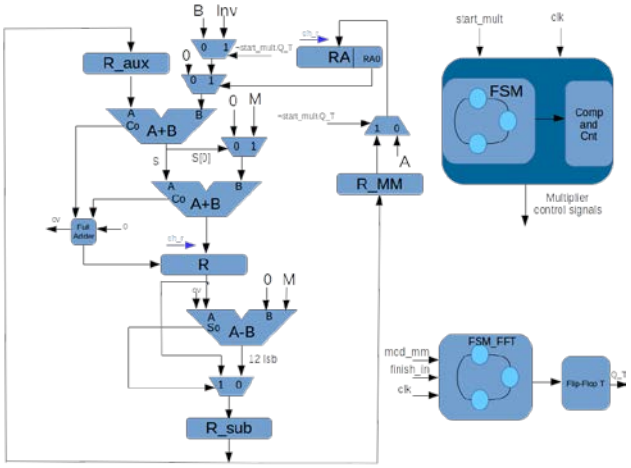


Figure 5. Modular multiplication subsystem
Source: The authors.

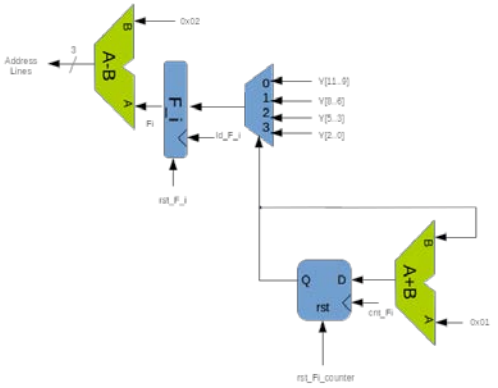


Figure 6. Segmentation Unit
Source: The authors.

The segmentation unit uses a 4-to-3 multiplexer in order to fragment the exponent in fields that are used as a kind of pointer to preprocessing powers. A counter helps select which of those segments is going to be used. There is an offset of 2 addresses because X^0 and X^1 are not stored in the memory register bank. The block diagram (Fig. 6) shows the internal constitution of this unit.

Address lines are used to control a storage unit, which is composed by a set of 16 registers with 12 bits width each, and an input decoder takes the address and enables writing to one register. When reading is required, a 16-to-12 multiplexer connected to the address lines takes the register data and puts it into the output register; these lines send a Vj signal to the Montgomery Multiplier. This system allows writing and reading one register at a time, and the internal structure of the system is shown in Fig. 7.

3. Experimental results

For testing purposes, a test block is added. The test block contains the inputs pattern to the M-ary block. Each block contains a set of 48 bits, which are subdivided in 4 numbers

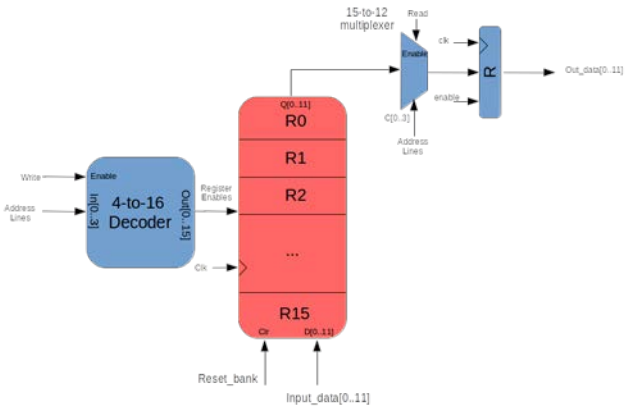


Figure 7. Storage Unit
Source: The authors.

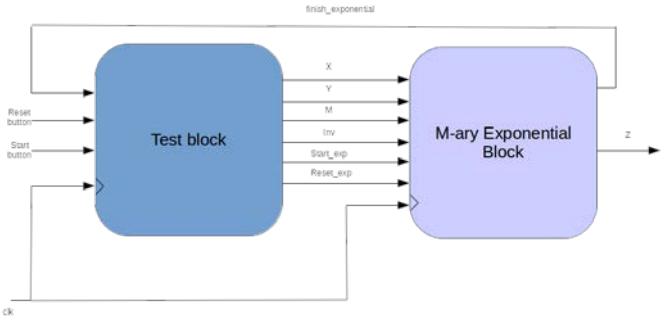


Figure 8. Testing system
Source: The authors.

of 12-bit length and represent the needed inputs as follows: a base (X), an exponent (Y), a modulus (M) and a correction factor (R). There are a total of 4 samples, as reflected in the use of a storage system with an attribute of 4 words - 48 bits ROM. This system starts each exponential process and senses a finish flag bit provided by the exponential block. When an exponential process finishes, a counter changes the address pointer that is controlling the ROM behavior and loads the respective data subsets in the output registers. Fig. 8 illustrates the testing structure.

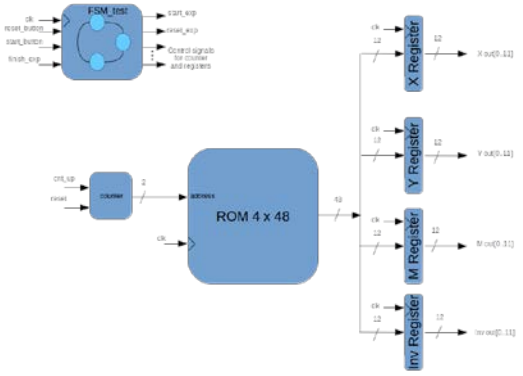


Figure 9. Test block, detailed overview
Source: The authors.

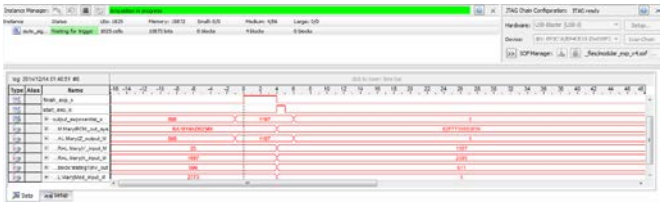


Figure 10(a). Data set X = 1697, Y = 25, M = 2773, Inv = 566, Z = 1197



Figure 10(b). Data set X = 2000, Y = 140, M = 2901, Inv = 733, Z = 982
Source: The authors.

A detailed scheme of the internal structure in the testing block can be seen in Fig. 9.

This system is for testing purposes, so the hardware requirements were not great, allowing for a low-cost system, such as the DE0 evaluation board.

Physical implementation of the previous block was carried out using Quartus II software, Signal-Tap, and a DE0 development board that has an EP3C16F484C6N FPGA from Altera Corp. Figs. 10(a) and 10(b) show the timing diagrams for some data sets.

An estimation of the merit figures was obtained using Timer Quest and Quartus II tools as follows:

Max. working frequency = 77,57 MHz
Total Thermal Power = 74,29 mW, Area percentage: 19 %

With all this examples in mind, it is convenient to show another. The following example addresses the cryptographic application of the modular exponentiation, and its aim is to cipher and decipher a character that is written in an ASCII-like style.

The next steps are used to obtain the public and private keys of the RSA algorithm [3]:

1. Takes two prime numbers p and q as well as their product n:

$$p = 11, q = 227, n = 2497$$

2. Calculates Euler's Phi function of n using:

$$\varphi(n) = \varphi(p).\varphi(q) = (p-1).(q-1) \quad (2)$$

$$\varphi(n) = (11-1).(227-1) = 10.226 = 2260$$

3. Chooses a prime number e, which is less than φ(n)

$$e = 137$$

4. Finds the multiplicative inverse in modulus φ(n) of e, defined by:

$$d = e^{-1} mod(\varphi(n)) \quad (3)$$

$$d = 137^{-1} mod(2260)$$

5. Uses an iterative algorithm in Matlab to find the multiplicative inverses, based on the following fact:

$$d.e = i.\varphi(n) + 1 \quad (4)$$

$$d = \frac{(i.\varphi(n)+1)}{e}, d \text{ is an integer}$$

Iterating over i, where d is an integer, to find that:

$$d = e^{-1} mod(\varphi(n)) = 33$$

Multiplies both d and e:

$$d.e\ mod\ (\varphi(n)) = 33.137\ mod(2260)$$
$$d.e\ mod(\varphi(n)) = 4521\ mod\ (2260) = 1$$

This proves that *e* is the multiplicative inverse of *d* in modulo φ(n).

6. Creates a private key with the set (p, q, d) = (11, 227, 33) and a public key (n, e) = (2497, 137). Now, using ASCII code, "s" is represented with 83 as the message to transport to use the cipher and decipher steps.
7. Cipher step consists of using the modular exponentiation to solve the next equation:

$$C = M^e mod(n) \quad (5)$$

$$C = 83^{137} mod\ 2497 = 283$$

Fig. 11 shows cipher results.

8. Finally, the decipher step consists of using modular exponentiation to solve the next equation:

$$M = C^d mod(n) \quad (6)$$

$$M = 283^{33} mod\ 2497 = 83$$



Figure 11. Ciphering "s" character (plain text)
Source: The authors

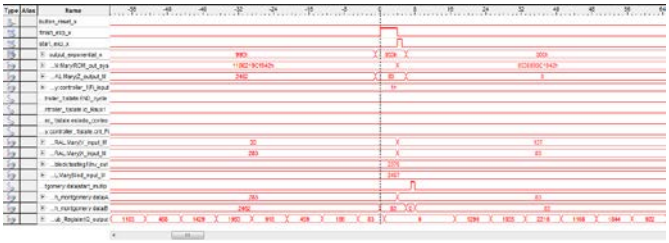


Figure 12. Deciphering the cipher equivalent of “s” character
Source: The authors.

Fig. 12 shows the decipher results.

4. Conclusions

- With practical work experience, it was clearly shown that the synchronization between blocks is affected by the dependence of the data. Its solution facilitates the treatment of the signals involved in the design of digital systems.
- The design of equivalent procedures in software facilitated error debugging in the hardware implementation.
- The modular multiplication control system was optimized using a Flip-Flop T to reduce the number of steps in FSM. Additionally, if a zero value segment was detected in the exponent, the central control unit avoided a multiplication.
- Using an EP3C16F484C6N Cyclone III FPGA from Altera Corp., the merit figures reported were as follows:
  - Maximum working frequency = 77.57 MHz.
  - Total thermal power = 74,29 mW.
  - Area percentage = 19 % of 15408 logic elements.
- In future work, the optimization of system controllers is a possible aim to reduce the number of clock cycles per operation. For the data path, the systolic design should be evaluated and considered to reduce complexity in the system controllers and to avoid synchronization between blocks. On the other hand, it would be interesting to create a completely parameterizable block where the amount of data and window bits are adjustable to requirements within cryptographic designs. Another important point to be explored is the use of modular arithmetic to implement more efficient digital signal processing filters in terms of time [5].

Bibliographic

[1] De Macedo-Mourelle, L. and Nedjah, N., Fast reconfigurable hardware for the M-ary modular exponentiation. In Digital System Design, DSD 2004. Euromicro Symposium on System Design, pp. 516-523, IEEE. August, 2004.

[2] Harris, D., Krishnamurthy, R., Anders, M., Mathew, S. and Hsu, S., An improved unified scalable radix-2 Montgomery multiplier. In Computer Arithmetic, 2005. ARITH-17 2005. 17th IEEE Symposium on IEEE. June, 2005, pp. 172-178.

[3] Rivest, R.L., Shamir, A. and Adleman, L., A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. Communications of the ACM, 21(2), pp. 120-126, 1978.

[4] Bernal, A., Conception et étude d'une architecture numérique de haute performance pour le calcul de la fonction exponentielle modulaire Dr. dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, France, 1999.

[5] Chang, C.H., Molahosseini, A.S., Zarandi, A.A.E. and Tay, T.F., Residue number systems: A new paradigm to datapath optimization for low-power and high-performance digital signal processing applications. IEEE circuits and systems magazine, 15(4), pp. 26-44, 2015.

[6] Montgomery, P.L., Modular multiplication without trial division. Mathematics of Computation, 44(170), pp. 519-521, 1985.

[7] Nedjah, N. and de Macedo-Mourelle, L., Four hardware implementations for the m-ary modular exponentiation. In Information Technology: New Generations, 2006. ITNG 2006. Third International Conference on 2006 IEEE. April, 2006, pp. 210-215.

[8] Di Claudio, E.D., Orlandi, G. and Piazza, F., Fast RNS DSP algorithms implemented with binary arithmetic. In Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. ICASSP-90., 1990 International Conference on IEEE. April, 1990, pp. 1531-1534.

[9] Ramírez, J. and Meyer-Baese, U., High performance, reduced complexity programmable RNS-FPL merged FIR filters. Electronics Letters, 38(4), pp. 199-200, 2002.

[10] Egecioglu, O. and Koç, C.K., Fast modular exponentiation. Communication, Control and Signal Processing, 1, pp. 188-194, 1990.

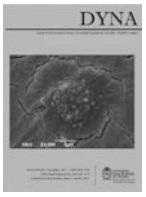
[11] Nedjah, N., Mourelle, L.M., Santana, M. and Raposo, S., Massively parallel modular exponentiation method and its implementation in software and hardware for high-performance cryptographic systems. IET Computers and Digital Techniques, 6(5), pp. 290-301, 2012.

[12] Menezes, A.J., Van Oorschot, P.C. and Vanstone, S.A., Handbook of applied cryptography, Chap 14 Efficient Implementation. CRC press. Retrieved from: http://cacr.uwaterloo.ca/hac/(1996).

S. Arenas-Hoyos, received the BSc. in Electronic Eng. from Universidad del Valle, Colombia in 2015. In September 2011, he joined the Digital Architectures and Microelectronic Group of the Universidad del Valle as researcher. His areas of interests are the programmable architectures, digital systems design, hardware description languages, embedded systems and digital signal processing.
ORCID: 0000-0002-5396-241X

A. Bernal-Noreña, received the BSc. in Electrical Eng. in 1987 from Universidad del Valle, Cali, Colombia, the MSc. degree in Science in Electrical Engineering majoring in VLSI circuit design from Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil in 1997, and the PhD degree in Microelectronics from Institute National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France in 1999. Currently, is full professor at the Engineering Faculty of Universidad del Valle, Cali, Colombia and leader of the Group of Digital Architectures and Microelectronic.
ORCID: 0000-0003-4766-8086

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Variation of technological properties of field natural rubber lattices from *Hevea brasiliensis* clones and natural rubber-based compounds

Diego Hernán Giraldo-Vásquez [a] & Sandra Milena Velásquez-Restrepo [b]

[a] *Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. dhernan.giraldo@udea.edu.co*
[b] *Grupo BIOMATIC - Biomecánica, Materiales, TIC, Diseño y Calidad para el sector cuero, plástico, caucho y sus cadenas productivas, Centro de Diseño y Manufactura del Cuero del SENA, Itagüí, Colombia. smvelasquez@sena.edu.co*

Received: June 14th, 2017. Received in revised form: August 29th, 2017 Accepted: September 25th, 2017

Abstract
Natural rubber (NR) is a widely used biopolymer, but the variability of its properties is a great disadvantage. In this work, variation during a 6-month period of total solids (TSC), dry rubber (DRC), ash, volatile-matter, and nitrogen content of field natural rubber (NR) lattices and mechanical properties of NR solid sheets-based compounds was studied. NR samples were collected from IAN 710, IAN 873 and FX 3864 clones of *Hevea brasiliensis* at a plantation within the state of Antioquia, Colombia. Rainfall, environmental temperature, relative humidity, and sunlight hours were daily registered. NR sheets-based compounds were manufactured and their rheometric and mechanical properties were measured. Significant variations ($p<0.05$) among clones and tappings for most of the measured properties were found. Leaf senescence was the phenological stage that presented the greatest influence on NR properties. Some recommendations to control the variation of properties of raw NR during manufacturing of rubber goods were stated.

Keywords: Natural rubber; process control; variability in raw materials; rubber testing.

Variación de las propiedades tecnológicas de látex de campo de caucho natural de variedades clonales de *Hevea brasiliensis* y de compuestos de caucho natural

Resumen
El caucho natural (NR) es un biopolímero ampliamente usado, pero la variabilidad de sus propiedades es una gran desventaja. En este trabajo se estudió la variación del contenido de caucho seco (DRC), total de sólidos (TSC), cenizas, material volátil y nitrógeno de látex de campo de NR, así como de las propiedades mecánicas de compuestos basados en láminas sólidas de NR, evaluando muestras recolectadas durante 6 meses. Las muestras se obtuvieron de tres variedades clonales de *Hevea brasiliensis* -IAN 710, IAN 873 and FX 3864- cultivadas en una plantación en Antioquia, Colombia. En el cultivo donde se recolectó el látex se monitorearon diariamente pluviosidad, temperatura ambiente, humedad relativa y horas de sol. Se moldearon compuestos emplenado láminas de NR, determinando sus parámetros reométricos y sus propiedades mecánicas. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p<0.01$) para la mayoría de las propiedades evaluadas como efecto de la variedad clonal y la época de recolección. La defoliación fue la etapa fenológica que presentó la mayor influencia sobre las propiedades del NR. Se presentan algunas recomendaciones para controlar la variación de las propiedades del NR durante la fabricación de artículos con este material.

Palabras clave: caucho natural; control de procesos; variabilidad en materias primas; ensayos a cauchos.

1. Introduction

Natural rubber (NR) is a highly demanded raw material for manufacturing a wide range of products. Most of the NR used in industrial processes is obtained by tapping the latex of *Hevea brasiliensis trees*, followed by preserving the NR latex in liquid form or crumbing and drying it to produce its coagula [1]. Since NR lattices tapping and collection involves many manual-labors, NR production is a high impact alternative for the socio-economic development of agricultural communities in Asia, Africa, and South America [1,2]. Projections of the International Rubber Study Group -

How to cite: Giraldo-Vásquez, D.H. and Velásquez-Restrepo, S.M., Variation of technological properties of field natural rubber lattices from Hevea brasiliensis clones and natural rubber-based compounds DYNA, 84(203), pp. 80-87, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

IRSG indicate that the world NR demand is forecasted to grow to 12.5 million tons in 2016, increasing to 16.0 million tons in 2024, continuing the upward trend of recent years [3]. As an alternative for the improvement of farmers' incomes, almost six thousands of them have established and harvested small NR plantations in Colombia in the last two decades.

Productivity of NR plantations has been improved by incorporating new genetic varieties of *Hevea brasiliensis* and evaluating the properties of the NR obtained from the existing ones; several studies on the properties of NR obtained from RRIM 600, WG 1, GT 1, IAN 873, FX 3864, and PB 235 clonal varieties harvested in Brazil have been carried out [4-9].

As a natural raw material, properties of NR strongly depend on the tree clone type, tapping frequency, weather, and season. These yields to variability in NR properties, what generates loss of materials and energy during the various stages of industrial processes [10]. Variations can be explained because NR latex is a very complex colloidal system. NR particles comprise 30–45% of the latex weight, but lipids, proteins, and sugars are also latex biochemical constituents; type and ratio of each substance contribute to rubber specific properties. During the drying process of NR sheets, thermo-oxidation and storage hardening may result in changes of NR bulk properties [7].

The objective of this study is to assess the variation of NR latex of three clones that are planted in Colombia and Brazil, during a six month period. Mechanical properties of compounds manufactured with NR sheets from coagula of the same plantations were also evaluated.

2. Methodology

IAN 710, IAN 873 and FX 3864 are *Hevea brasiliensis* clones developed in Brazil by crossing original Brazilian species with the Asian clone PB 86. These three clones are widely harvested in Brazil and they are the most planted *Hevea* clones in Colombia [11]. FX 3864 has presented good resistance to South American Leaf Blight (SALB) due to the attack by *Microcyclus ulei*, while IAN 873 exhibits better productivity and denser foliage than IAN 710 and FX 3864 [11,12].

In this study, NR lattices from IAN 710, IAN 873 and FX 3864 clones were collected and evaluated over a 6-month period (February–July 2012). During this study, leaf senescence occurred between late January and February, leaf development between late February and March; from late March to July, mature leaf was the phenological stage. The trees selected for collecting samples were 14 years old and 8 years of tapping. Latex tapping was carried out every two days (D2 system), to 36 trees of each clonal series. Trees with similar diameter trunks were chosen. Plantation is located at Tarazá municipality, Antioquia, Colombia.

A randomized complete block design was used for NR collection from each clone, for lattices and for sheets and their compounds. An analysis of variance (ANOVA) was carried out for each test condition, using a significance level of 0.01. Tukey's test was used for each test condition to identify differences among means.

Rainfall, environmental temperature, relative humidity, and sunlight hours at plantation were daily registered during the study.

Field latex samples were monthly collected and stabilized prior to their analysis in laboratory. Dry rubber (DRC), total solids (TSC), ash content, volatile-matter content, and nitrogen content were measured for each sample according to ASTM D1278 [13]. Reference values for the properties were taken from ASTM D 2227 [14].

TSC tests were carried out in an oven at 100 °C for 2 hours using about 2.5 ± 0.5 g of liquid field latex. Mass was determined by an analytical balance. TSC was calculated by eq. (1):

$$\%\, TSC = \frac{C - A}{B - A} * 100 \tag{1}$$

where: A is the petri dish mass in grams, B is the petri dish mass plus the original sample in grams, and C is the petri dish mass plus the dry sample in grams.

For determining DRC, a co-precipitation of some constituents which did not include the rubber was made during the latex acid coagulation. DRC was calculated by eq. (2):

$$\%\, DRC = \frac{dry\ mass\ of\ coagulum}{mass\ of\ the\ wet\ sample} * 100 \tag{2}$$

Ash content tests were carried out in a muffle furnace at a temperature up to 550 ° C, with approximately 5 g of dry rubber per sample. The final mass of residual ashes in the crucible was weighted by using an analytical balance and the final ash content was determined by eq. (3):

$$\%\, Ash\ content = \frac{C - B}{D} * 100 \tag{3}$$

where: D is the sample mass, B is the empty crucible, and C is the crucible plus the ash mass.

To determine the volatile-matter content, about 10 to 12 grams of rubber were placed on a watch glass and heated in a muffle furnace at a temperature of 100 ± 5 °C until getting a constant weight. Samples were placed in a desiccator until these were cooled at room temperature; samples were weighted after cooling. Volatile-matter content was calculated by eq. (4):

$$V = \left[\left(\frac{A - B}{A}\right) - \left(\frac{C - D}{C}\right)\right] * 100 \tag{4}$$

where: V is the volatile-matter content, A is the sample mass at the beginning, B is the sample mass after its homogenization in the mill, C is the sample mass before drying in the muffle furnace, and D is the sample mass after drying in the muffle furnace.

Measuring of DRC, TSC, ash and volatile-matter content was carried out in triplicate for each test condition. Nitrogen (N) content was measured by the Kjeldahl process applied to 2 gr of each sample cutted into small pieces, as stated in ASTM D1278 standard [13]. N content measure was carried out once for each test condition.

NR sheets were obtained every two months at the plantation. Field lattices were coagulated for 24 hours using an acetic acid solution diluted in water at 1% v/v. After coagulation, the samples were washed to remove residual acetic acid and rolled using an open rolls mill. Finally, the sheets were outdoors dried for 8 days, under a roof top.

NR sheets were mixed with sulfur as vulcanizing agent, stearic acid, and zinc oxide as activators, N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfenamide (TBBS) as accelerator and carbon black as reinforcing filler. Only the type of NR was varied among compounds, seeking to evaluate the variation of properties related to the origin of NR. Accelerator/sulfur ratio and sulfur content were chosen to obtain a conventional vulcanization system.

Mixing was carried out in an open rolls mill. Rheometric cure curves at 160 °C for the compounds were obtained according to ASTM D 5289 [15,16]. From rheometric tests, the optimum vulcanization times (t90) were determined. Specimens for tensile, uniaxial compression, and compression-set test were manufactured by compression molding. Shore A hardness was determined for cured cylindrical specimens. Uniaxial compression tests of samples after compression-set tests were also carried out.

Tensile tests and hardness measurements were carried out in quintuplet for each test condition, and uniaxial compression and compression-set tests were carried out in triplicate for each test condition

3. Results and discussion

3.1. Climatic variables

As mentioned before, climatic conditions at plantation could influence the NR properties. Seeking to identify if there is any relationship between climatic variables and NR lattices and sheets studied in this work, measures of climatic variables are shown in Figs. 1 and 2. Data were taken daily, but results were grouped by fortnights in order to facilitate the visualization of each variable behavior.

It can be observed that dry season occurs between January and February, with some rainy days since April to July. As expected, relative humidity at midday and afternoon were related to rainfall and sun hours per day. Rainfall reached the highest values among all the measures during the second fortnight of May. It is important to notice that relative humidity was generally higher at morning, when tapping was carried out.

The influence of climate variables behavior on NR properties will be discussed in next sections.

3.2. Technological properties of lattices

Monthly variation of dry rubber content (DRC) and total solids content (TSC) by clonal series is shown in Figs. 3 and 4, respectively. It must be taken into account that TSC and DRC are strongly related because TSC represents the amount of all nonvolatile materials present in latex; these nonvolatile materials include rubber itself. It is well known that in *Hevea brasiliensis* latex, rubber contains more than 90% of poly (*cis*-1, 4-isoprene) [5], therefore, DRC and TSC values are

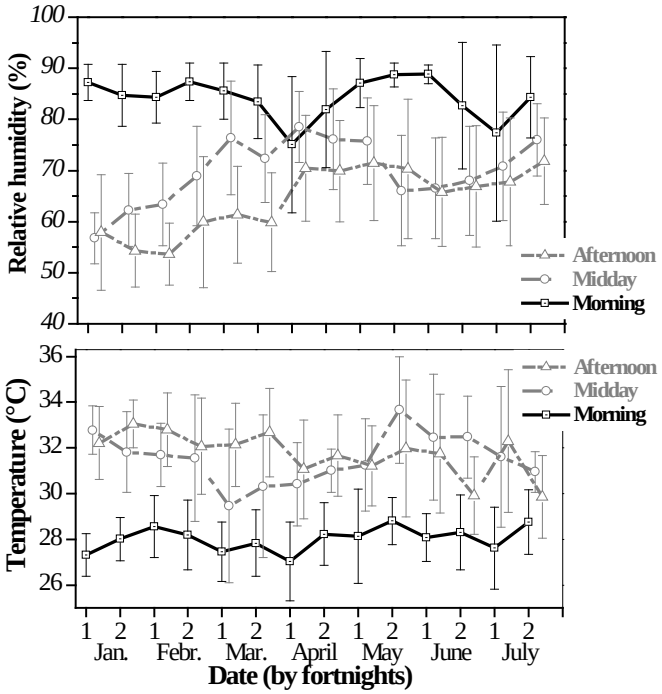


Figure 1. Temperature and relative humidity at plantation where NR lattices were collected. Average and standard deviation are plotted. Data were horizontally shifted in order to facilitate the visualization of results.
Source: The authors.

usually very close. DRC values are related with the physiological response of the tree because it is an indicator of the biosynthetic activity of lactiferous vessels [4, 6].

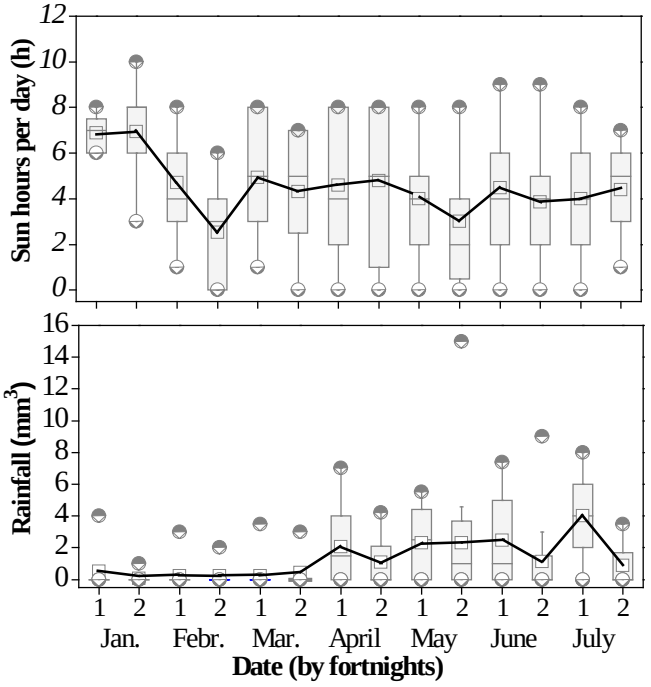


Figure 2. Boxplot of rainfall and sun hours per day at plantation were NR lattices were collected. Lines connecting the average values are showed to facilitate the visualization.
Source: The authors.

The highest TSC and DRC occur in February-March period and the lowest values occur in May for IAN 873 and FX 3864 clones. For IAN 710 clone, the highest TSC and DRC occur only in February and the lowest values occur in April. Lower values of the percentage of DRC and TSC generally match the few sun hours, high rainfall and relative humidity at midday and afternoon. This agrees with the description in several studies of Moreno et al. [4, 6]. DRC and TSC values are related to a decrease in the biosynthesis of the rubber tree between January and February when the foliation and flowering senescence begin. It is significant to notice that DRC and TSC for the three clonal varieties studied in this work are above the average values that are reported in literature [4-8].

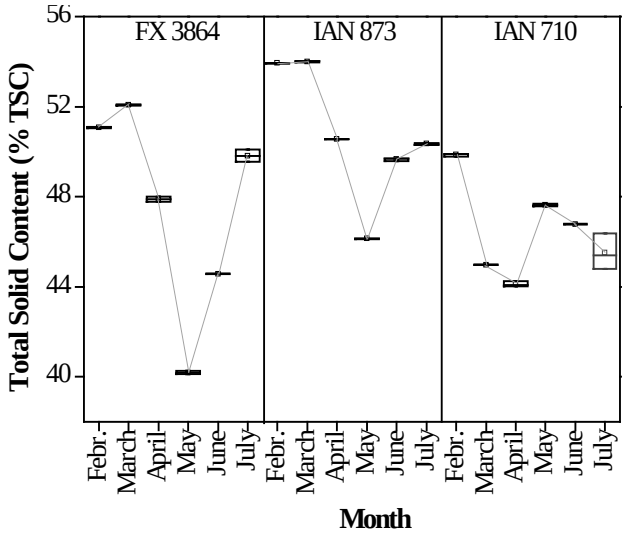


Figure 3. Monthly variations in TSC of field latex.
Source: The authors.

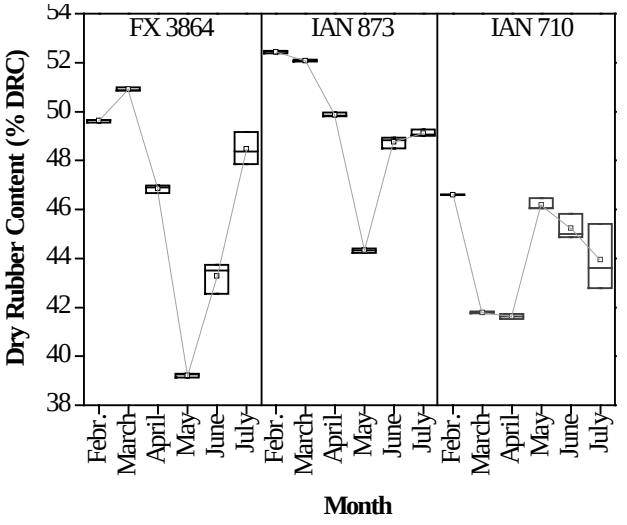


Figure 4. Monthly variations in DRC of field latex.
Source: The authors.

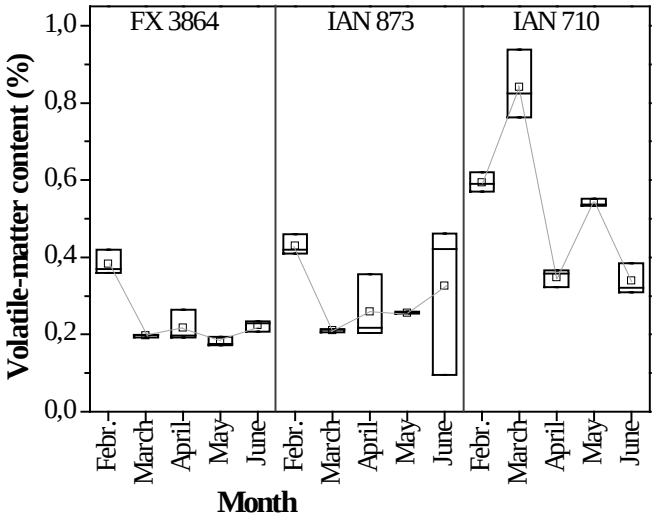


Figure 5. Monthly variations in volatile-matter content of field latex.
Source: The authors.

In Fig. 5, the variation of volatile-matter content is shown. Volatile-matter in NR latex is related to high amounts of moisture, as well as contamination with volatile substances during coagulation of rubber sheets. Volatile-matter content for most of the samples was less than the 0.8%, which is the maximum percentage allowed by ASTM D 2227; just in March the values were higher than the limit for IAN 710 clone. The variance in some samples of a same clone at the same collection time is due to the lack of greater control over the collection and processing of rubber carried out by farmers during tapping.

Highly significant variations ($p < 0.01$) among season and the clones were observed for TSC, DRC, and volatile-matter content. Season-clones interaction was also significant ($p < 0.01$) for these properties. Comparison of all the possible pairs of clones means through Tukey tests indicated that there were significant differences in TSC, DRC, and volatile-matter content. Variations of lattices properties suggested different performances among clones even at the same agronomic and climatic conditions, as reported in other studies on Brazilian and African NR [4-6,14].

Fig. 6 shows the variation of ash content. Ashes in NR latex are related to nonvolatile mineral fraction, including minerals inherent in the rubbery substance such as Ca and Mg [4,6]. Ash content of all the samples was below 0.60%, the maximum specified in ASTM D2227 standard [9]. ANOVA and Tukey tests indicated that no significant differences were observed among clones, or over the period of the study. N, P, K, Na, Cl and S are mobile in *Heveas*, while Zn, Cu, Mn, Fe, and Mg are partially mobile. When nutrients are absorbed by a process of constant reutilization, as occurs during leaf senescence, ash content tends to decrease, as observed in February for IAN 873 and IAN 710 [4,6].

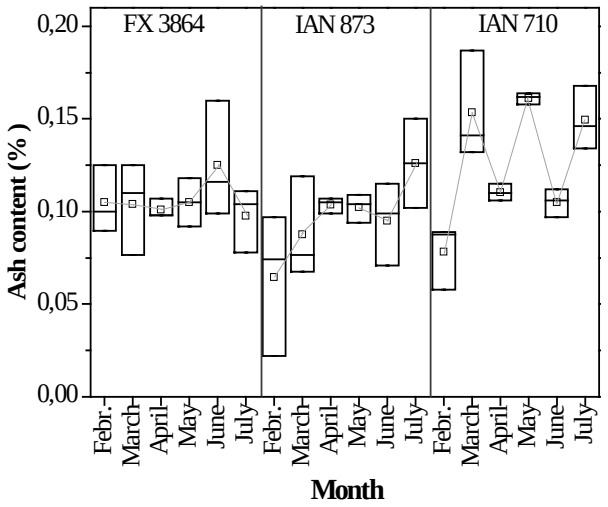


Figure 6. Monthly variations in ash content of field latex.
Source: The authors.

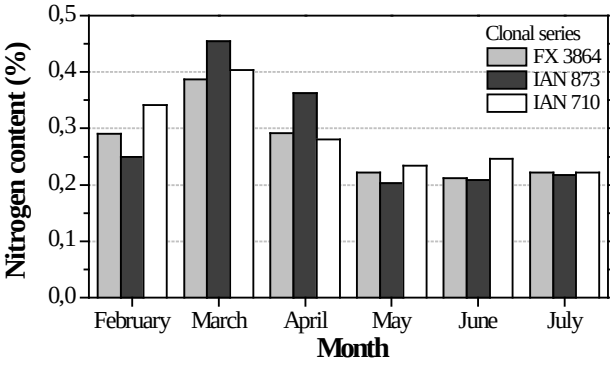


Figure 7. Monthly variations in nitrogen content of field latex.
Source: The authors.

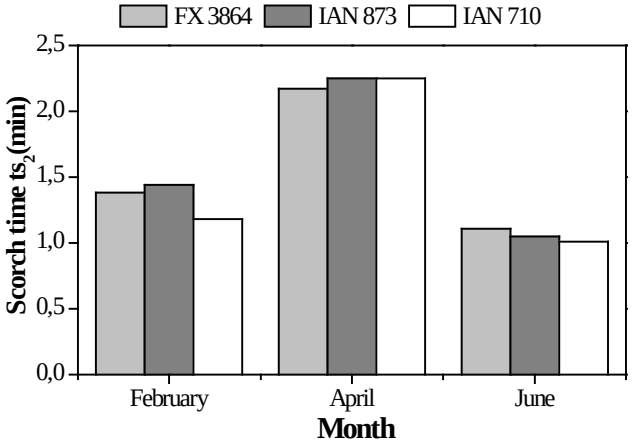


Figure 8. Variation in vulcanization induction times according to rheometric tests.
Source: The authors.

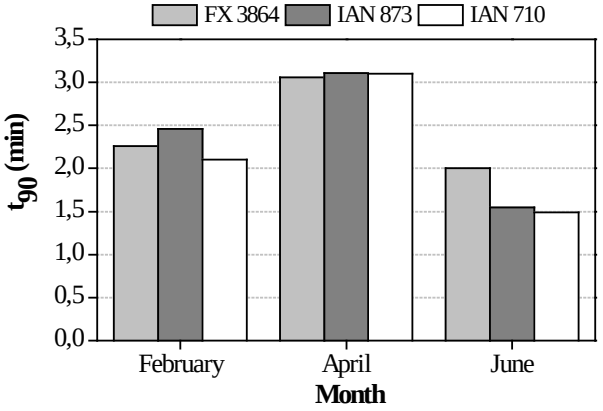


Figure 9. Variation in vulcanization times according to rheometric tests.
Source: The authors.

Variation of nitrogen content is presented in Fig. 7. It can be observed that nitrogen content increased during leaf development (March). This is because during this phenological stage, the demand for nitrogen changes according to biosynthetic activity for latex production. Nitrogen content for all the samples was within the ASTM 2227 standard specification for industrial processes [14], regarding that the maximum value recommended is 0.6%. Latex from IAN 710 clone showed some differences in nitrogen content when compared to lattices from the other two clonal series. Aristizabal et al. reported that the higher DRC corresponds to the lower nitrogen content, which is related to the phenological stage [9]. In our work, this behavior was not observed.

3.3. Properties of NR sheets-based compounds

Figs. 8 and 9 show the variation in processing times according to rheometric tests. Compounds with NR tapped in April showed the highest processing times for the three clonal series. Differences in t90 and scorch time of clones could be related to changes in rubber plasticity and viscosity, due to the fact that of NR particles in latex are surrounded by a complex mixture of proteins, lipids, and fatty acids that can form long chains and interact with elastomer chains [16].

Another probable cause of variations is that drying and chewing are not rigorously controlled in small plantations. It has been reported that molecular weight and gel content in NR vary markedly with the drying conditions after washing with water, because storage hardening takes place after drying even if the natural rubber is left to stand at room temperature [10].

Moduli at 100 and 300 % of elongation in tensile tests for specimens cured according to rheometric tests are reported in Figs. 10 and 11, respectively. Compounds based on tapped NR in April showed the highest values of tensile moduli for the three clones. IAN 873 NR-based compounds had higher properties than the other clones. Some differences in tensile properties were observed over the time for each clone.

Fig. 12 shows the variation in Shore A hardness for specimens cured according to rheometric tests.

ANOVA demonstrated that hardness varied over the time for FX 3864 and IAN 873 clones. No variation in hardness was observed over the time for IAN 710 compounds. Compounds based on IAN 710 NR showed the lowest values of hardness, but for FX 3864 and IAN 873 compounds the hardness varied even in a same month.

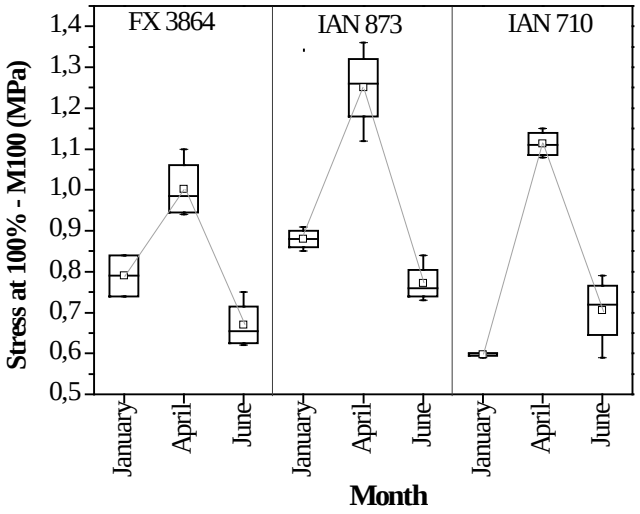


Figure 10. Tensile moduli at 100% (M100) of NR-based compounds.
Source: The authors.

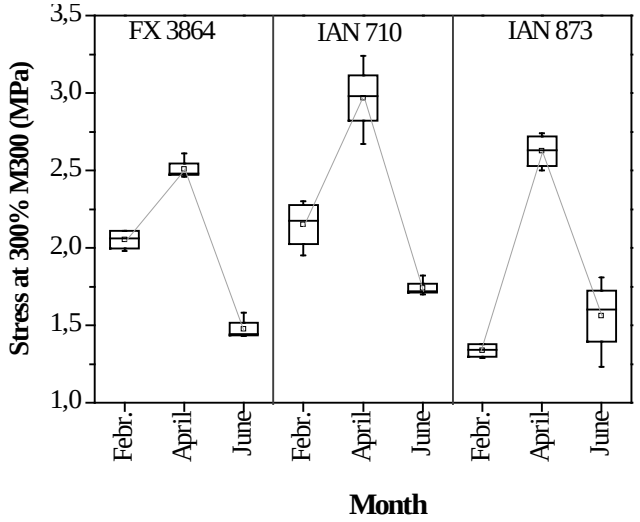


Figure 11. Tensile moduli at 300% (M300) of NR-based compounds.
Source: The authors.

Uniaxial compressive moduli for specimens cured according to rheometric tests are reported in Fig. 13. Compounds based on tapped NR in April showed the highest values of compressive moduli for the three clones. For the other test conditions, some differences in compressive moduli were observed over the time and among clones. Compression-set for specimens cured according to rheometric tests are reported in Fig. 14. The best compression-set values were presented during April for the three clones. IAN 710 compounds showed the worst compression-set of the three clones. Uniaxial compression tests after compression-set were carried out for comparing the resistance to change the mechanical properties under the effect of time and temperature.

Uniaxial compressive moduli after compression-set tests are reported in Fig. 15. All the specimens showed a decrease in compressive moduli, as an effect of the thermal aging

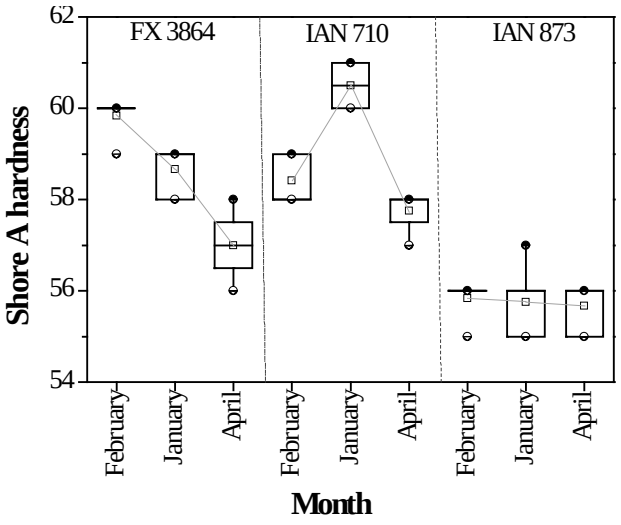


Figure 12. Shore A hardness of NR-based compounds.
Source: The authors.

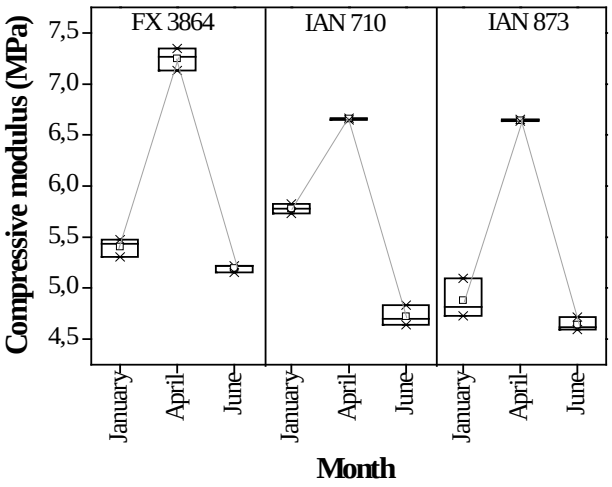


Figure 13. Uniaxial compressive moduli of NR-based compounds.
Source: The authors.

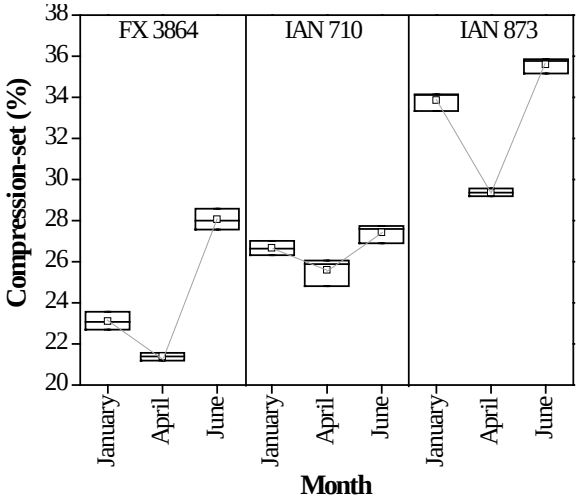


Figure 14. Compression-set of NR-based compounds.
Source: The authors.

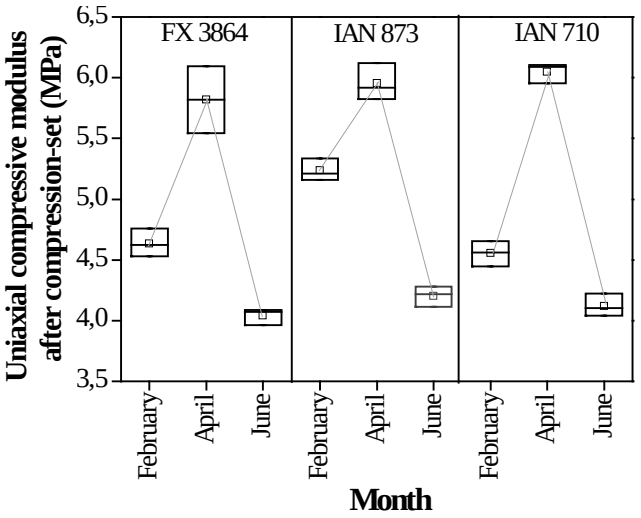


Figure 15. Uniaxial compressive moduli after compression-set tests. Source: The authors.

during compression-set tests. However, the lower variation of compressive moduli was observed for IAN 873 and IAN 710 compounds.

Mechanical properties of NR sheets-based compounds studied in this work showed significant variations ($p < 0.01$) among tapings. Highly significant variations ($p < 0.01$) among clones were observed for Shore A hardness and compression-set, however, this behavior was not found for the other mechanical properties. The difference in the way how mechanical properties varied is attributed to the role of activators, sulfur and accelerator on the mechanical properties of vulcanized NR [16].

4. Conclusions

Technological properties of NR lattices and NR sheets-based compounds showed highly variability with season, except for ash content in lattices. Significant variations were observed among the clones for almost all of the lattices properties evaluated over the time of this study. Hardness, compression-set and viscosity-related rheometric properties presented significant variations among clones, but vulcanization times, tensile and compressive properties of NR sheets-based compounds did not show significant variation among clones, which is explained by to the role of vulcanization system on these properties for vulcanized NR.

Although rainfall and sun hours per day may have influenced the variations of the properties of the NR evaluated, each clone presented different responses to climatic variations, which is attributed to its intrinsic characteristics. It was observed that the phenological stage seems to influence NR properties, specially the leaf senescence. New researches over a major time of lattices and coagula are needed in order to achieve a better understanding on performance of materials studies here.

NR is a complex biopolymer with an intrinsic variability in composition and properties, but in this work it was detected that better NR tapping, collecting, and drying practices at plantations must be carried out seeking to reduce the variation of NR properties.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support of Asociación de Caucheros de Tarazá y Uré (CADTU) for the work at their plantation.

References

[1] Racha, D., Tirawanichakul, Y., Tirawanichakul, S., Kumar, A. and and Tekasakul, P., Techno-economic assessment of forced-convection rubber smoking room for rubber cooperatives. Energy, June, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.161.

[2] FPT Securities Joint Stock Company, Natural rubber industry report, [Online]. 2013. [Accessed 4 June 2017]. Available at: https://www.bsc.com.vn/Handlers/DownloadReport.ashx?ReportID=674295

[3] International Rubber Study Group IRSG, The World rubber industry outlook- review and prospects to 2024, [Online]. 2015. [Accessed 4 June 2017]. Available at: http://www.rubberstudy.com/news-article.aspx?id=5092&b=default.aspx

[4] Moreno, R., Ferreira, M., Gonzalves, P. and Mattoso, L. Avaliação do látex e da borracha natural de clones de seringueira no Estado de São Paulo, Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 38 (5), pp. 583-590, 2003. DOI: 10.1590/S0100-204X2003000500005

[5] Pamela, F., Soh, G., Nkeng, E. and Ehabe, E. Effect of natural coagula maturation on the processability, cure, and mechanical properties of unfilled vulcanizates of Hevea natural rubber, Journal of Applied Polymer Science, 103(4), pp. 2359-2363, 2007. DOI: 10.1002/app.25175.

[6] Moreno, R., Ferreira, M., Gonzalves, P. and Mattoso, L. Technological properties of latex and natural rubber of Hevea brasiliensis clones, Scientia Agricola, 62(2), pp. 122-126, 2005. DOI: 10.1590/S0103-90162005000200005

[7] Galiani, P., Avaliação e caracterização da borracha natural de diferentes clones de seringueira cultivados nos estados de Mato Grosso e Bahia, PhD dissertation, Universidade Federal de São Carlos, Brazil, 2010.

[8] Quesada-Méndez, I., Aristizábal-Gutiérrez, F. and Montoya-Castaño, D., Characterization of two latex parameters from Hevea brasiliensis (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. clones in the Colombian altillanura, Revista Colombia Forestal, 15(1), pp. 139-146, 2012.

[9] Aristizabal, F., Caro, M. and Montoya, D., Línea de investigación en caucho natural y su industria del Grupo de Bioprocesos y Bioprospección. Encuentro internacional del caucho, Bucaramanga, Colombia, 2009.

[10] Rolere, S., Bottier, C., Vaysse, L., Sainte-Beuve1, J. and Bonfils, F., Characterisation of macrogel composition from industrial natural rubber samples: Influence of proteins on the macrogel crosslink density. eXPRESS Polymer Letters, 10(5), pp. 408-419, 2016. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2016.38

[11] Cuellar, A., Galindo, L. and Correa, J., Incidencia y severidad de Microcyclus ulei en una colección de caucho en la Amazonia colombiana. Ingenierías and Amazonía, 3(2), pp. 93-104, 2010.

[12] Suarez, Y., Molina, J. and Furtado, E., Clones de Hevea brasiliensis de alta productividad caracterizados por resistencia a Microcyclus ulei en jardin clonal en el magdalena medio colombiano. Summa Phytopathologica, 41(2), pp. 115-120, 2015. DOI: 10.1590/0100-5405/1985.

[13] American Society for Testing of Materials ASTM, ASTM D 1278 Standard Test Methods for Rubber from Natural Sources—Chemical Analysis, 2007.

[14] American Society for Testing of Materials ASTM, ASTM D 2227 Standard Specification for Natural Rubber (NR) Technical Grades, 2007.

[15] American Society for Testing of Materials ASTM, ASTM D5289 Standard Test Method for Rubber Property-Vulcanization Using Rotorless Cure Meters, 2012

[16] Sima, R. and Shojaei, A., Vulcanization kinetics and reversion behavior of natural rubber/styrene-butadiene rubber blend filled with nanodiamond – The role of sulfur curing system. European Polymer Journal, 81, pp. 98-113. 2016. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2016.05.021.

D.H. Giraldo, received the BSc. Eng in Mechanical Engineering in 2000 from the Universidad Nacional de Colombia, Medellin, Colombia, and the MSc. degree in Engineering in 2003 from the Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil. Since 2004 he is a full professor in the Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. His research interests include polymer processing, mechanical behavior of materials and reverse engineering.
ORCID: 0000-0002-4306-9978

S.M. Velásquez, received the BSc. Eng in Bioengineering in 2008 and MSc. degree in Engineering in 2011, all of them from Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia. From 2009 to 2011, she worked for rubber and plastic manufacturing companies as manager. Since 2011 she has been a researcher at Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. His research interests include innovation and applied research in industrial processes.
ORCID: 0000-0002-6697-2801

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

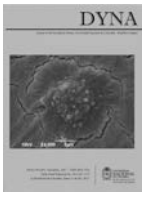
Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

High power printed circuit board design for automotive fuse block usage

Iván Juan Carlos Pérez-Olguín

Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. ivan.perez@uacj.mx

Received: March 25th, 2016. Received in revised form: September 08th, 2017. Accepted: September 22th, 2017.

Abstract
The minimal size for the conductor calculation is always the first point of interest when an electrical designer is creating a High Power Printed Circuit Board for automotive applications; in this paper you will see the factors considered to calculate the conductor size, the math information, the background information for the factors selection and the conservative rules implemented to protect the circuits for an overload; in addition this document shows two different methods to define the conductor size for the Printed Circuit Board, one based in international standards (Actual Design) and the other based in design assumptions defined to reduce the conservative rules used to calculate the conductor size (Proposal Design). In addition, you can see the validation data and the statistical results to support the implementation for the proposal method in the fuse block design used in the automotive industry, due the Proposal Design provides High Power Printed Circuit Boards with 33% less copper compared to the Actual Design.

Keywords: Temperature rise, trace width size, automotive fuse block and current carrying capacity.

Diseño de tablillas eléctricas de alta potencia para uso en cajas de fusibles automotrices

Resumen
El cálculo del tamaño mínimo de un conductor eléctrico es siempre el primer punto de interés al momento de diseñar una tablilla eléctrica de alta potencia; en este artículo se presentan los factores considerados para calcular el tamaño del conductor, las fórmulas matemáticas utilizadas, la revisión del estado del arte y las reglas de conservación definidas para proteger los circuitos de una sobrecarga eléctrica; asimismo se presentan dos métodos para definir el tamaño del conductor, uno basado en estándares internacionales (método actual) y otro basado en supuestos de diseño que reducen las reglas de conservación para calcular el tamaño del conductor (método propuesto), además se presentan los resultados de las pruebas de validación y los análisis estadísticos que respaldan la implementación del método propuesto en el diseño de las tablillas eléctricas de alta potencia utilizadas en centrales eléctricas destinadas a la industria automotriz y que ofrece una reducción del 33% del contenido de cobre de las tablillas eléctricas de alta potencia en comparación con el método de diseño actual.

Palabras clave: Incremento de temperatura, tamaño del conductor, cajas de fusibles automotrices y capacidad de manejo de corriente.

1. Introduction

One of the key aspects of High Power Printed Circuit Board development is determining the appropriate trace sizes for the current flow defined by the circuit requirements. It is necessary to consider the material used to develop the High Power Printed Circuit Boards (copper typically). The conductive material presents a certain amount of impedance to current flowing through it; with electrical energy lost in the form of heat. Usually, in order to determine a good approximation, for current carrying capacity an allowable temperature rise is pre-selected by the electrical layout designer, and the factors considered for calculations are: the width of the trace, the thickness of the trace and the resistivity of the conductor material.

The resistivity of copper is defined using standard values from the IPC-4101[1]. The width and thickness of a conductor is determined primarily on the basis of the current carrying capacity required and the maximum permissible conductor temperature rise pre-defined by the type of the

How to cite: Pérez-Olguín I.J.C., High Power Printed Circuit Board Design For Automotive Fuse Block Usage DYNA, 84(203), pp. 88-94, December, 2017.
© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.
Revista DYNA, 84(203), pp. 88-94, December, 2017, ISSN 0012-7353
DOI: http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n203.56448

automotive fuse block (the High Power Printed Circuit Board is placed inside) and the physical space allowed for the conductor path. The conductor's permissible temperature rise is defined as the difference between the maximum safe operating temperature of the laminate material and maximum temperature of the thermal environment to which the board is subjected.

This document includes a comparative analysis for two different methods to calculate the trace width size (one based on the IPC-D-275[2] and other based on the IPC-2221[3]/IPC-2152[4]) besides the design assumptions and the supportive data that shows the calculation methods do not impact the current carry capacity requirements and only incorporates the respective knowledge, the lessons learned and the international standards at the time that the specifications were released.

2. Printed circuit boards industry standards

[5] Stated could find several standards related to Printed Circuit Board design; these standards are created by the Institute of Printed Circuits (IPC – Association Connecting Electronics Industries), the Electronic Industries Alliance (EIA), the Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC), the International Engineering Consortium (IEC), the US Department of Defense, the American National Standard Institute (ANSI) and the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

In automotive industries' case and this research, the design rules are based upon the IPC Standards. The IPC is a global trade association consisting of more than 2,300 member companies. The IPC is made up of contributors from the industry and includes designers, printed circuit board manufacturers, electronics assembly companies, suppliers and original equipment manufacturers. Contributing members bring lessons learned and known good practices to the table, for discussion and debate. The IPC documents and disseminates this knowledge through its industry-accepted standards [5].

The next sections show the methodology used to calculate the trace width size for the Printed Circuit Boards, the mathematical equations, the cross-sectional fitting curve for different IPCs standards and the design assumptions used in Proposal Design to implement the international standards. For the specific case of the High Power Printed Circuit Boards, these assumptions take into consideration the years of experience of a TIER 1 company. The reason for the assumptions is due to the High Power Printed Circuit Boards designed are out of the scope of test data provided by some international standards.

3. IPC-D-275 trace size

A common model in thermodynamics was used by [6-9], and [10] to estimate the current capacity for traces in general conditions. We can start with the idea that the temperature change of the trace is proportional to I^2R or $\Delta T \approx I^2R$, since R is inversely proportional to the cross-sectional area, A, we can rewrite the equation as $\Delta T \approx I^2/A$; rearranging terms leads to $I \approx \sqrt{(\Delta T)(A)}$ or $I \approx (\Delta T)^{1/2}(A)^{1/2}$; and finally we can obtain the more general equation for current carrying capacity:

$$I = (K)(\Delta T^{\beta 1})(A^{\beta 2}) \quad (1)$$

Where, I indicate the current in amperages, ΔT the change in temperature above ambient in ^{O}C and A the cross-sectional area in mils^2. To estimate the coefficients K, $\beta 1$ and $\beta 2$ is convenient to convert them to linear form using logarithms, as follows:

$$Ln(I) = Ln(K) + \beta 1 Ln(\Delta T) + \beta 2 Ln(A) \quad (2)$$

[6] Analyzed the Equation 2 using the cross-sectional area from IPC-D-275[2] for four different traces thickness and 300 data random points. The Equation 3 displays the resulting regression model with K, $\beta 1$ and $\beta 2$ parameters (99.3455% r-square value).

$$Ln(I) = -2.73791 + 0.428273 Ln(\Delta T) + 0.67321 Ln(A) \quad (3)$$

Which leads to the estimate of $I = (K)(\Delta T^{\beta 1})(A^{\beta 2})$ as:

$$I = (0.0647)(\Delta T^{0.428})(A^{0.673}) \quad (4)$$

However, there are several shortcomings to these constant values and the original data. One in particular is the lack of information contained within the cross-sectional charts reflecting the form factor of the traces under study. The main limitations are:

- The data does not provide a way of independently obtaining the width and thickness components of the cross-sectional data except by estimating them.
- 35A maximum current value studied for outer layers.
- 17.5A maximum current value for inner layers.
- Only four different conductor trace thicknesses (1/2, 1, 2 & 3 ounces by square feet) are considered.
- 100^{O}C maximum ΔT for outer layers.
- 45^{O}C maximum ΔT for inner layers.

4. IPC-2221/IPC-2152 trace size

The IPC-2221[3]/2152[4] equation parameters are different from those in IPC-D-275[2] in that they are more conservative and are implicitly derated to compensate for manufacturing effects. The values calculated with this new model are less conservative and represent better approximation of the test data used to create the cross-sectional charts placed into the IPC-2221[3]/IPC-2152[4]. The new model replaces the model in the IPC-D-275[2]. The constant values K, $\beta 1$ and $\beta 2$ have been updated in order to provide a better fitting curve:

$$I = (0.048)(\Delta T^{0.44})(A^{0.725}) \quad (5)$$

Where, I indicates the current in amperages, ΔT the change in temperature above ambient in ^{O}C and A the area in

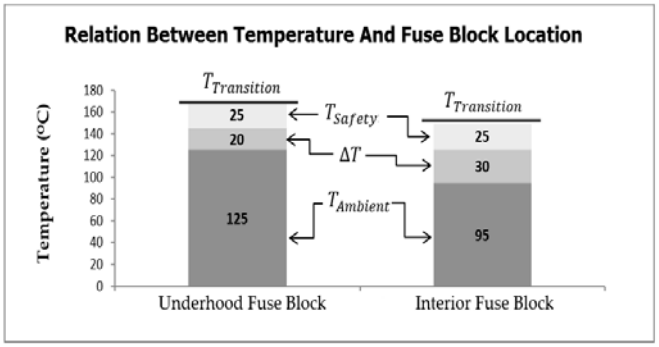


Figure 1. Relation between temperature and automotive fuse block location. Source: The author.

mils[2]. Other authors and companies use different constants values for the fitting curve approximation.

5. Theoretical temperature rise

Determine the theoretical temperature rise (ΔT) is key to the design of High Power Printed Circuit Boards, because is directly related with the size of the electrical conductor; the automotive industry usually considers for the fuse blocks design a $\Delta T = 20^{O}C$ for underhood location or close to heat sources and $\Delta T = 30^{O}C$ for interior or rear locations. The formula used to calculate the temperature rise is:

$$\Delta T = T_{Transition} - T_{Ambient} - T_{Safety} \quad (6)$$

Where, ΔT represent the temperature rise above the ambient, $T_{Transition}$ the transition glass fibber temperature of the High Power Printed Circuit Board, $T_{Ambient}$ the ambient temperature for fuse block location and T_{Safety} the safety temperature established as a protective factor against variations between the calculated value and the reality, to reduce the risk of overheating. Fig. 1 displays the Equation 6 temperatures by fuse block location (the High Power Printed Circuit Board is placed inside).

6. Assumptions for automotive fuse block applied to proposal design

As mentioned before, the IPC Standard includes a chart with the relationship of the current carrying capacity, at various temperature rises, with respect to the cross-sectional areas, for inner and outer layers. Using these charts; a designer would be able to calculate the conductor thickness and width necessary to support a given current value and a predicted temperature rise of that system. For inner and outer traces, the former IPC-2221[3], IPC-D-275[2] and MIL-STD-275[17] are all copies of the conclusions of a *National Bureau of Standards* study, and are based on inadequate historic information and are empirical rather than supported by test data [11].

The IPC-2152[4] includes more factors to calculate the current carrying capacity. These factors make the width calculation based on this IPC Standard more conservative than the previous standard, but the results are restricted for currents up to 35A and for conductor traces up to 3 ounces. In addition, taking into consideration the comments from Mike Jouppi (Chairman of the Task Group in charge to develop the IPC-2152[4]) there is more to sizing conductors that just current, cross-sectional area and temperature rise. Although the current, cross-sectional area and temperature rise remain the main drivers, some of these influencing factors are the substrate thickness, the substrate material, the presence of copper planes, the environment (vacuum, air and forced convection), the power dissipation and the mounting configuration and orientation. The assumptions for the automotive fuse blocks applied to Proposal Design are:

- The High Power Printed Circuit Boards use values out of the scope of studies placed in the IPCs. This requires the use of the extrapolation from the IPC-2152[4] chart and the use of the current, cross-sectional area and temperature rise to calculate the trace width.
- The trace width must be calculated based on 135% of the fuse rating value, which protects the circuit application.
- The maximum steady state current expected on each circuit will be 70% of the fuse rate value.
- The ΔT used for underhood compartment is 20^{O}C in which its ambient temperature does not exceed 125^{o}C. For different $T_{Ambient}$ the ΔT can be calculated following the Equation 6.
- The ΔT used for internal compartment is 30^{O}C in which its ambient temperature does not exceed 95^{O}C. For different $T_{Ambient}$ the ΔT can be calculated following the Equation 6.
- No constant values difference (K, $\beta 1$ and $\beta 2$) for the width estimation of traces in the outer layers and inner layers even though the IPCs have different information for both conditions. Nevertheless, it appears that in reality the IPC inner layer data was simply derated 50% (on average) from the IPC outer layer data.

The Fig. 2 displays a graphical comparison between the methods used in this study, to calculate the trace widths versus the IPC Standard, considering $\Delta T = 20^{o}$C and one-ounce copper layer.

Description:

1. Representation of the width conductor size calculated for 70% of the fuse rate value which is the maximum current expected under normal conditions.
2. Representation of the width conductor size calculated for 100% of the fuse rate based on IPC-2221**[**3]/IPC-2152[4] charts.

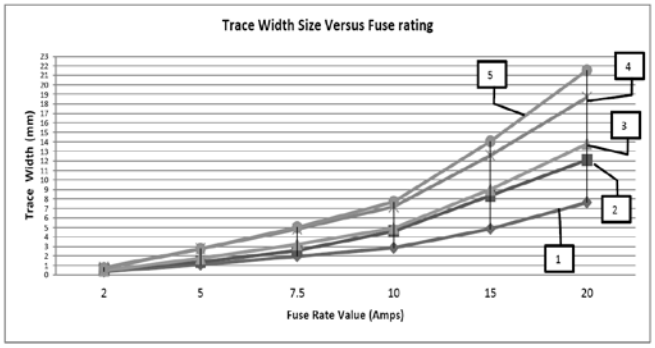


Figure 2. Trace width size versus fuse rating. Source: The author.

3. Representation of the width conductor size calculated for 100% of the fuse rate based on IPC-D-275[2].
4. Representation of the width conductor size according to the Proposal Design, based on IPC-2221[3]/IPC-2152[4], which considers 135% of the fuse rate value.
5. Representation of the width conductor size according to the Current Design, based on IPC-D-275[2], which also considers 135% of the fuse rate value.

In conclusion, when the trace is powered, current flowing through it will generate heat creating a temperature difference between the trace and the surrounding environment (ΔT) and it is dependent upon the trace cross-sectional area and various factors such as thickness, dielectric material, adjacency of copper in the board and the environment condition.

However, for the above estimations not all these factors were considered, because some of them are still under investigation and the test results have proved that the safety margin (T_{Safety} from Eq. 6) is wide enough to avoid any damage in the High Power Printed Circuit Board under normal conditions.

7. Trace width size comparison

To test the design methods, two different constants values (K, $\beta 1$ and $\beta 2$) were used to solve the Equation 1 and determine the trace width size; the Actual Design based on the IPC-D-275[2] (Fig. 2, line 5) and the Proposal Design based on the IPC-2221[3]/IPC-2152[4] (Fig. 2, line 4). To demonstrate that the change of the constants values does not impact the validation test results for the final product, test boards were designed with equal inputs and outputs according to schematics and prototype parts were ordered to run validation test; the test performed was the Power Dissipation and Thermal Mapping. Table 1 compares the prototype parts characteristics.

A cross-sectional analysis with dimensions is shown in the Fig. 3. It verifies that the supplier has provided parts with the minimum copper thickness in accordance with table 3.11 and table 3.12 in IPC-6012[12] for the Actual Design and the Proposal Design.

The specification E5-5L1T-14A067-AA[13] establishes that the Power Dissipation Test, provides information about the electrical center's ability to dissipate and manage heat (the High Power Printed Circuit Board is placed inside the fuse block) and Thermal Mapping Test provides information as to where the most critical thermal areas of the electrical center may be, and provides information about where to place thermocouples for the test that require thermal data. For both tests the temperature shall not increase above the ambient temperature by more than 55^{O}C.

Table 1.
Actual and Proposal Design Characteristics.

High Power Printed Circuit Board	Actual Design	Proposal Design
Number of Layers	6 layers	4 layers
Layer ounces	4 ounces	4 ounces
IPC Standard	IPC-D-275	IPC-2221/2152
PCB weight	215 grams	173 grams

Source: The author.

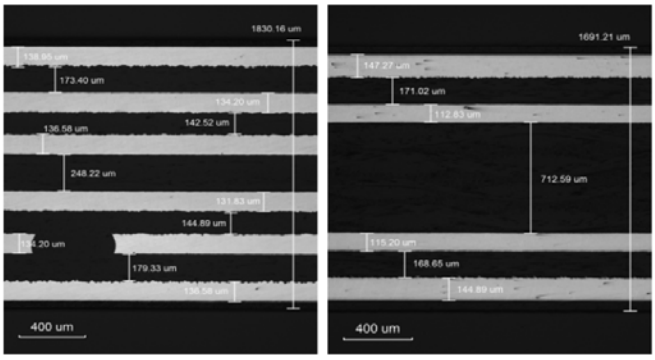


Figure 3. Cross-sectional view with dimensions for Actual Design and Proposal Design.
Source: The author.

Thermal mapping test procedure:

1. Attach each conductive layer to terminal, fuse, relay,..., remove or cut housings (if applicable) to provide images of the conductor or circuit board.
2. Apply maximum steady state load current to each input-output circuit simultaneously at vehicle voltage for one hour or until temperature stabilizes.
3. Measure and record the ΔT using a thermal image. Images are to be recorded perpendicular to all heat sources wherever possible (include thermocouples if necessary).
4. Alternate ways to perform this test for multilayer fuse block, include thermocouples if necessary.
5. Power dissipation test procedure:
    1. Before and after the test, measure and record the voltage drop from input to output of the circuits identified in the vehicle test load matrix.
    2. Secure the fuse block in vehicle position (use the vehicle bracket).
    3. Ensure that the fuse block and connectors interfaces are properly assembled (each component in the right position).
    4. Place thermocouples at the critical areas.
    5. Conduct test at 125^{O}C±3^{O}C.
    6. Apply maximum load current and vehicle intermittent load as identified. Perform the test for a minimum of 48 hours or the number of cycles it takes for the temperature measurements to stabilize.
    7. Measure and record ΔT.
    8. Inspect the fuse block for external damages and internal damages (tear down analysis).

For the case of the fuse block under study the maximum ambient temperature is 125^{O}C. Table 2 shows voltage drop values for two samples before and after the Power Dissipation Test. Similar measurements are shown for both designs: actual and proposed. The electrical and electronic SMD components placed inside the fuse block meets the AEC-Q100 [16] standard.

Fig. 4 includes the ΔT obtained after the Power Dissipation Test for Actual Design and Proposal Design. The highest temperature captured by measurement instrument is 161.2^{O}C at the Actual Design component K33 (average 158.7^{O}C). And this component also has the highest temperature for the Proposal Design at 160.9^{O}C maximum temperature recorded (average 158.4^{O}C). With these results, we can assume no differences at automotive fuse block level between the different designs, however in order to provide more visual evidence, Fig. 4 also displays a Thermal Mapping Images for both designs.

Table 2.
Voltage drop values before/after Power Dissipation Test.
Proposal Design
System Voltage Drops @ 1 amps

		Initials				Sample	
Voltage Drop Number	Vehicle Circuit Name	Fuse Number	Fuse Size	Fuse Type	Vehicle Circuit Number	# 1	# 2
1	ABS VALVES	F71	30A	Micro J-Case	150	9.2	9.2
2	ABS PUMP	F84	60A	J-Case	151	4.7	4.8
3	CIGAR/PWR PT1	F10	20A	Micro J-Case	507	19.5	19.5
4	PWR PT3	F5	20A	Micro J-Case	510	20.2	20.2
5	TRANS OIL	F78	20A	Micro J-Case	169	12.1	12.0
6	HORN	F49	20A	Micro	3	29.6	29.9
7	EFAN # 1	F61	40A	J-Case	6	8.9	9.1
8	EFAN # 2	-	-	-	517	11.6	12.0
9	EFAN # 2	F64	30A	Micro J-Case	519	14.0	14.3
10	EFAN # 3	F60	40A	J-Case	519	9.4	9.1
11	HEATED BACKLIGHT	F69	40A	Micro J-Case	811	9.7	8.8
12	FUEL PUMP	F88	30A	Micro J-Case	840	12.4	12.5
13	VPWR2	F8	20A	Micro	32	19.3	19.2
14	A/C CLUTCH	F22	10A	Micro	43	44.6	44.9
15	BLOWER MOTOR	F81	40A	J-Case	46	9.3	8.9
16	STARTER	F86	30A	Micro J-Case	40	11.6	11.5

		Finals				Sample	
Voltage Drop Number	Vehicle Circuit Name	Fuse Number	Fuse Size	Fuse Type	Vehicle Circuit Number	# 1	# 2
1	ABS VALVES	F71	30A	Micro J-Case	150	9.2	9.2
2	ABS PUMP	F84	60A	J-Case	151	4.7	4.7
3	CIGAR/PWR PT1	F10	20A	Micro J-Case	507	19.4	19.6
4	PWR PT3	F5	20A	Micro J-Case	510	20.2	20.2
5	TRANS OIL	F78	20A	Micro J-Case	169	12.1	12.0
6	HORN	F49	20A	Micro	3	29.6	29.7
7	EFAN # 1	F61	40A	J-Case	6	13.1	9.2
8	EFAN # 2	-	-	-	517	19.6	14.4
9	EFAN # 2	F64	30A	Micro J-Case	519	16.7	15.8
10	EFAN # 3	F60	40A	J-Case	519	9.6	12.5
11	HEATED BACKLIGHT	F69	40A	Micro J-Case	811	8.7	8.9
12	FUEL PUMP	F88	30A	Micro J-Case	840	12.3	13.4
13	VPWR2	F8	20A	Micro	32	21.8	20.8
14	A/C CLUTCH	F22	10A	Micro	43	45.9	45.2
15	BLOWER MOTOR	F81	40A	J-Case	46	9.6	13.0
16	STARTER	F86	30A	Micro J-Case	40	13.5	13.5

Actual Design
System Voltage Drops @ 1 amps

		Initials				Sample	
Voltage Drop Number	Vehicle Circuit Name	Fuse Number	Fuse Size	Fuse Type	Vehicle Circuit Number	# 1	# 2
1	ABS VALVES	F71	30A	Micro J-Case	150	9.1	9.0
2	ABS PUMP	F84	60A	J-Case	151	4.6	4.6
3	CIGAR/PWR PT1	F10	20A	Micro J-Case	507	18.2	18.1
4	PWR PT3	F5	20A	Micro J-Case	510	18.9	18.8
5	TRANS OIL	F78	20A	Micro J-Case	169	12.0	11.9
6	HORN	F49	20A	Micro	3	28.0	27.4
7	EFAN # 1	F61	40A	J-Case	6	9.1	8.7
8	EFAN # 2	-	-	-	517	10.4	10.1
9	EFAN # 2	F64	30A	Micro J-Case	519	16.2	19.0
10	EFAN # 3	F60	40A	J-Case	519	9.2	9.0
11	HEATED BACKLIGHT	F69	40A	Micro J-Case	811	9.3	8.8
12	FUEL PUMP	F88	30A	Micro J-Case	840	12.0	12.4
13	VPWR2	F8	20A	Micro	32	19.1	18.8
14	A/C CLUTCH	F22	10A	Micro	43	40.4	40.2
15	BLOWER MOTOR	F81	40A	J-Case	46	10.3	8.6
16	STARTER	F86	30A	Micro J-Case	40	11.7	11.7

		Finals				Sample	
Voltage Drop Number	Vehicle Circuit Name	Fuse Number	Fuse Size	Fuse Type	Vehicle Circuit Number	# 1	# 2
1	ABS VALVES	F71	30A	Micro J-Case	150	9.2	9.2
2	ABS PUMP	F84	60A	J-Case	151	4.6	4.6
3	CIGAR/PWR PT1	F10	20A	Micro J-Case	507	18.3	18.4
4	PWR PT3	F5	20A	Micro J-Case	510	19.1	19.0
5	TRANS OIL	F78	20A	Micro J-Case	169	12.1	12.0
6	HORN	F49	20A	Micro	3	28.2	27.9
7	EFAN # 1	F61	40A	J-Case	6	14.9	8.9
8	EFAN # 2	-	-	-	517	11.1	16.9
9	EFAN # 2	F64	30A	Micro J-Case	519	17.6	23.1
10	EFAN # 3	F60	40A	J-Case	519	10.8	9.1
11	HEATED BACKLIGHT	F69	40A	Micro J-Case	811	8.6	8.5
12	FUEL PUMP	F88	30A	Micro J-Case	840	11.8	13.1
13	VPWR2	F8	20A	Micro	32	22.2	20.8
14	A/C CLUTCH	F22	10A	Micro	43	41.1	41.1
15	BLOWER MOTOR	F81	40A	J-Case	46	13.5	11.8
16	STARTER	F86	30A	Micro J-Case	40	14.9	13.7

Source: The author.

To evaluate if the two designs have the same responses (temperature) after the Power Dissipation Test a hypothesis test was evaluated for each component connected to a thermocouple. The test selected was the 2-Sample t, but before applying this statistical tool it was necessary to apply the Johnson transformation to transform the non-normal data (obtained with the thermocouples) to normal data. Fig. 5 presents one of the Johnson transformations obtained using the software Minitab, with 14 thermocouples readings for the sample size.

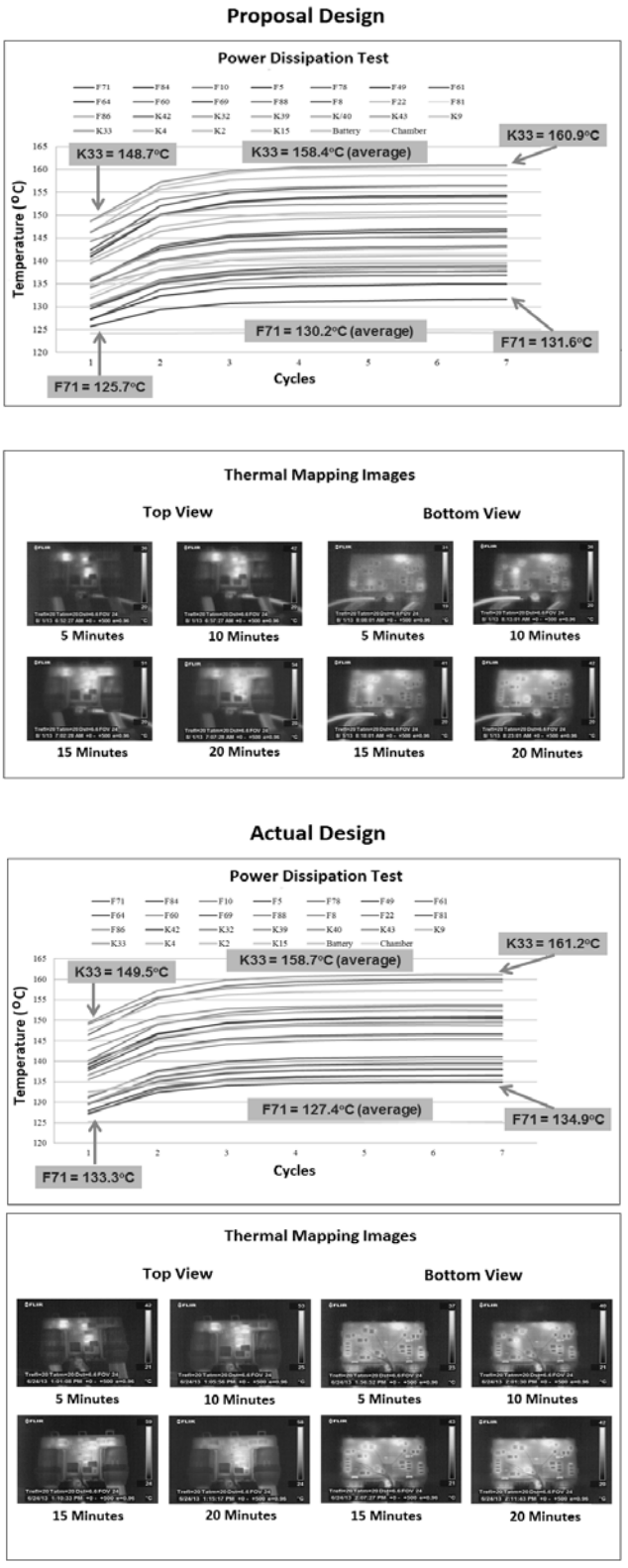


Figure 4. Power dissipation test and thermal mapping.
Source: The author.

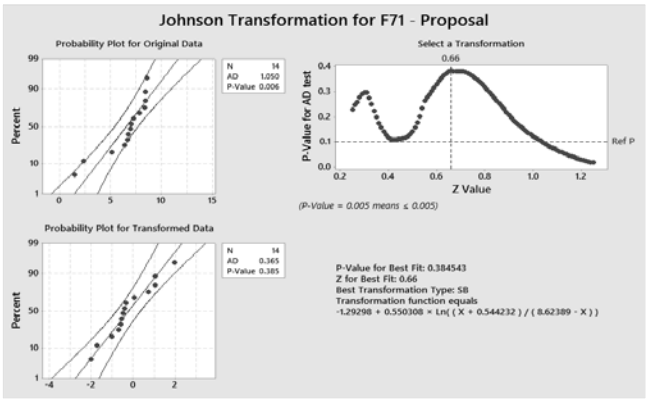


Figure 5. Johnson transformation from software Minitab.
Source: The author.

Once the Johnson transformation was applied, it was necessary to evaluate the variances for each component data for the current design and the proposal design. The hypothesis test selected was the 2-Variances at 95% confidence value (alpha equal to 0.05):

$$H_0: \sigma^2_{\text{Proposal Design}} = \sigma^2_{\text{Actual Design}}$$

$$H_1: \sigma^2_{\text{Proposal Design}} \neq \sigma^2_{\text{Actual Design}}$$

Fig. 6 displays one of the 2-Variances hypothesis test for component F71, Observing the interval plot can be assuming that the standard deviation in both designs are the same. In addition, the statistical data provided by the F test (at 95% confidence level) is equal to 0.929 (P-value) that's means that H_0 cannot be rejected. So, using simple words "the variance, of the temperature collected by the thermocouples, between both designs have not shown to be different in the component F71".

The 2-Sample t was performed for each component connected to a thermocouple, at 95% confidence level, with the below hypothesis:

$$H_0: \mu_{\text{Proposal Design}} = \mu_{\text{Actual Design}}$$

$$H_1: \mu_{\text{Proposal Design}} \neq \mu_{\text{Actual Design}}$$

Fig. 7 includes a boxplot chart with a mean connected line. With visual analysis, we cannot conclude that a difference of the means values exists between the two set of analyzed data. This is confirmed with the P-value equal to 0.529 observed in the statistical results.

8. Conclusions

In this study, two High Power Printed Circuit Boards design alternatives were evaluated (called Actual Design and Proposal Design). To support the implementation of the design change, a Power Dissipation Test and Thermal Analysis using prototype fuse block parts were evaluated, in a test laboratory with ISO/IEC 17025:2005 (general requirements for the competence of testing and calibration laboratories) certification granted by American Association for Laboratory Accreditation, obtaining similar statistical results between the designs, which means that regardless of the design used the copper conductors can handle similar current values under a specific theoretical temperature rise.

Test and CI for Two Variances: F71 - Proposal, F71 - Actual

```
Method

Null hypothesis         σ(F71 - Proposal) / σ(F71 - Actual) = 1
Alternative hypothesis  σ(F71 - Proposal) / σ(F71 - Actual) ≠ 1
Significance level      α = 0.05

F method was used. This method is accurate for normal data only.


Statistics

                                                95% CI for
Variable          N  StDev  Variance            StDevs
F71 - Proposal   14  1.094     1.198  (0.793, 1.763)
F71 - Actual     14  1.122     1.259  (0.814, 1.808)

Ratio of standard deviations = 0.975
Ratio of variances = 0.951


95% Confidence Intervals

                                    Tests
                CI for
      CI for StDev      Variance                          Test
Method       Ratio         Ratio  Method  DF1  DF2  Statistic  P-Value
F       (0.553, 1.721)  (0.305, 2.963)  F        13   13       0.95    0.929
```

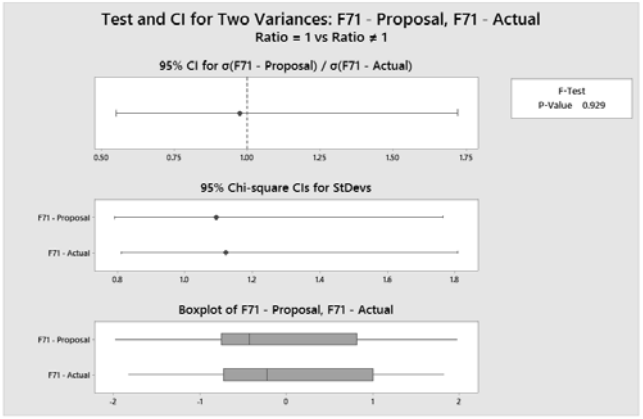


Figure 6. 2-Variances hypothesis test from software Minitab.
Source: The author.

Two-Sample T-Test and CI: F84 - Proposal, F84 - Actual

```
Two-sample T for F84 - Proposal vs F84 - Actual

                N   Mean  StDev  SE Mean
F84 - Proposal  14  -0.22   1.15     0.31
F84 - Actual    14   0.04   1.01     0.27


Difference = μ (F84 - Proposal) - μ (F84 - Actual)
Estimate for difference:  -0.260
95% CI for difference:  (-1.100, 0.580)
T-Test of difference = 0 (vs ≠): T-Value = -0.64  P-Value = 0.529  DF = 25
```

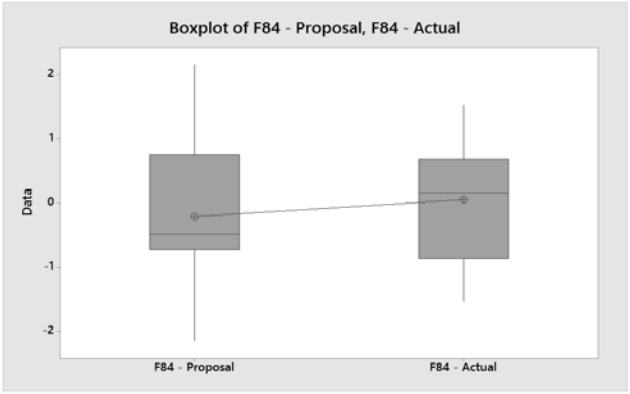


Figure 7. 2-Sample t hypothesis test from software Minitab.
Source: The author.

The actual values used to calculate the conductor size of the High Power Printed Circuit Board are out of the scope of the state of the art and the international standards; this means that the companies dedicated to produce this king of product only use estimated values.

The conductor size thickness typically used in this product is 2, 3 or 4 ounces with fuse values around 5A, 7.5A,

10A, 15A, 20A, 15A, 20A, 25A, 30A, 40A, 50A, 60A and up to 350A (no differences between inner and outer layers). The industry standards are limited to 3 ounces, 35A for outer layers and 17.A for inner layers.

The statistical results allow the change of the design rules, this has an economic impact reducing the copper content of the High Power Printed Circuit Boards, due accord the automotive fuse blocks studied, the Proposal Design contains 33% less copper content versus the Actual Design.

This research is actually implemented in the automotive industry with extensive validation results for different automotive OEMs (Original Equipment Manufacturer) fuse block specifications. Including the Ford Motor Company specification ES-5L1T-14A067-AA[13], Toyota TSC 1900G[14] and General Motors GMW 3172[15].

References

[1] IPC, IPC-4101 Specification for base materials for rigid and multilayer printed boards, Bannockburn, Illinois: www.ipc.org, 2009.
[2] IPC, IPC-D-275 Design standard for rigid printed board and rigid printed board assemblies, Bannockburn, Illinois: www.ipc.org, 1991.
[3] IPC, IPC-2221 Generic standard on printed board design, Bannockburn, Illinois: www.ipc.org, 2012.
[4] IPC, IPC-2152 Standard for determining current carrying capacity in printed board design, Bannockburn, Illinois: www.ipc.org, 2009.
[5] Mitzner, K., Complete PCB design using OrCAD capture and PCB editors, Newnes Editors. ISBN 978-0-7506-8971-7, 2009.
[6] Brooks, D., Temperature rise in PCB traces. Proceedings of the PCB Design Conference, West, March 23-27, 1998.
[7] Brooks, D., Trace currents and temperature, Part 1: The basic model. The PCB Design Magazine, 1(1), pp. 56-61, 2012.
[8] Brooks, D., Trace currents and temperature, Part 2: Empirical results. The PCB Design Magazine, 1(2), pp. 20-25, 2012.
[9] Brooks, D., Trace currents and temperature, Part 3: Fusing currents. The PCB Design Magazine, 2(1), pp. 50-54, 2013.
[10] Brooks, D., Trace currents and temperature, Part 4: Via heating. The PCB Design Magazine, 2(2), pp. 30-32, 2013.
[11] Bolton Institute, The University of Bolton. 2003. [online]. Available at: http://www.ami.ac.uk/courses/ami4817_dti/u02/pdf/meah0221.pdf. [acceced: 25 September 2014].
[12] IPC, IPC-6012 Qualification and performance specification for rigid printed boards, Bannockburn, Illinois: www.ipc.org, 2010.
[13] Ford Motor Company, ES-5L1T-14A067-AA Engineering specification – Panel assembly fuse junction.
[14] Toyota, TSC 1900G Test methods for junction blocks and relay for automobiles.
[15] General Motors, GMW 3172 General specification for Electrical/Electronic components – Environmental/Durability.
[16] Automotive Electronic Council, AEC-Q100 Failure Mechanism based stress test qualification for packaged integrated circuits., [online]. Available at: http://www.aecouncil.com, 2007.
[17] Military Standard, MIL-STD 275 Printed wiring for electronic equipment, Department of Defense, Washington, D.C., 1984.

I.J.C. Pérez-Olguín, received the BSc. in Industrial Eng. in 1999 from the Instituto Tecnológico de Los Mochis, the MSc decree in Industrial Engineering (Operation Research) in 2003 from the Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, Mexico, and the PhD degree in Industrial Engineering (Robust Optimization) in 2008 from the Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, Mexico. He has more than 14 years of experience in the automotive industry working in electrical design, devices application and prototypes (5 records of inventions and 2 patents granted). He is a professor in Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México. His research interests include: operation research, robust optimization, electrical design and lean manufacturing.
ORCID: 0000-0003-2445-0500



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Administrativa e Ingeniería Industrial

Oferta de Posgrados

Especialización en Gestión Empresarial
Especialización en Ingeniería Financiera
Maestría en Ingeniería Administrativa
Maestría en Ingeniería Industrial
Doctorado en Ingeniería - Industria y Organizaciones

Mayor información:

E-mail: acia_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 02

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Model for decision-making, change of LPG stove to induction stove, case in Ecuador

Freddy Benjamín Naula-Sigua [a], Jorge Arturo Campoverde-Campoverde [a] & Denis Borenstein [b]

[a] *Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. freddybenja@gmail.com, jorge.campoverde@ucuenca.edu.ec*
[b] *Departamento de Ciências Administrativas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. denisb@ea.ufrgs.br*

Received: January 17th, de 2017. Received in revised form: September 18th, 2017. Accepted: September 26th, 2017

Abstract
The Ecuadorian Government has been proposed to introduce in a massive scale in the national market, the use of Induction Stoves as a replacement of the LPG Stove (liquefied Petroleum Gas). Nevertheless, when choosing the induction stove, by the citizens, in addition to economic factors other factors could be taken into consideration, but they could fall into subjectivism. In other words, multiple criteria should be also considered. This article contributes with a method of support that suggests the user a possible best option, taking into account qualitative and quantitative criteria as well. Possible scenarios are also analyzed and also their impact in the final decision.

Keywords: MCDA; Induction Stove; Clean Energy; Renewable Energy.

Modelo para la toma de decisiones, caso cambio de cocina de GLP a inducción en Ecuador

Resumen
El gobierno ecuatoriano se ha propuesto introducir de forma masiva en el mercado nacional, el uso de las cocinas de inducción, ello en reemplazo de la cocina GLP (Gas Licuado de Petróleo). Sin embargo en la elección de la cocina de inducción o GLP, por parte del ciudadano, además de los factores económicos intervienen también criterios o factores que caen dentro de la subjetividad; Es decir intervienen múltiples criterios. El presente artículo aporta con un método de apoyo que sugiere al usuario una posible mejor opción, teniendo en cuenta criterios tanto cuantitativos como cualitativos. Además se analizan posibles escenarios y su impacto en la decisión final.

Palabras clave: MCDA; Cocinas de Inducción; Energía Limpia; Energía Renovable.

1. Introducción

A nivel global existen aproximadamente 2.600 millones de personas sin acceso a instalaciones de cocción limpia [1]. En este contexto la tecnología de inducción magnética, aplicada a la cocción de alimentos es una de las más eficientes [11]. Su principio de funcionamiento se basa en las corrientes de Foucault: es decir, en el efecto que tienen las corrientes parásitas[1] sobre materiales ferromagnéticos. Éstas corrientes generan calor en el mencionado material[2] debido al efecto Joule. Existe entonces una transferencia de energía de manera más directa, por lo tanto se obtiene también una mayor eficiencia en la transferencia energética entre el elemento que provoca la inducción y aquel utensilio de cocina que se ha de calentar [12].

Considerando esta eficiencia energética, El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable de Ecuador (MEER) implementó el Plan Nacional de Cocción Eficiente. Uno de los ejes principales de éste plan es reemplazar las cocinas que utilizan gas licuado de petróleo (GLP), por cocinas eléctricas de inducción [7]. Este plan está alineado con los objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir, en lo referente al cambio de la matriz

How to cite: Naula-Sigua, F.B., Campoverde-Campoverde, J.A. and Borenstein, D., Modelo para la toma de decisiones, caso cambio de cocina de GLP a inducción en Ecuador DYNA, 84(203), pp. 95-100, December, 2017.
[1] Conocidas también como corrientes Eddy o torbellino
[2] Los utensilios de cocción de hierro.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

energética en el Ecuador, que estimula el uso de energías renovables y limpias.

La introducción de las cocinas de inducción se volvió una prioridad para el gobierno ecuatoriano al considerar: que el uso del GLP, como fuente de energía para las cocinas en el Ecuador representa un problema económico [3] debido a los altos subsidios que a éste combustible se destina; al considerable efecto contaminante resultante de las altas emisiones de CO_2, y desde luego también, aprovechar de mejor manera la hidroelectricidad, cuyo potencial viable se calcula en 21.000MW [7].

Considerando lo mencionado anteriormente, la meta del Gobierno es reemplazar 3,5 millones de cocinas de GLP por cocinas de inducción hasta el año 2018 [2]. Sin embargo, la introducción de las cocinas de inducción ha encontrado resistencia en la población; inclusive cuando se ha promocionado el subsidio al consumo de energía eléctrica derivado del uso de las mencionadas cocinas, el cual sería de hasta 80Kwh por mes, esto se reflejaría lógicamente en bajos costos de operación, más sin embargo no se ha logrado mayor avance. Ésta resistencia tiene sus bases, entre otras, en el hecho de que todavía la mayoría de los hogares no disponen de las respectivas instalaciones eléctricas de 220V, que es el voltaje con el cual funcionan las cocinas de inducción; además en las condiciones actuales el costo operacional[3] de la cocina de inducción, no necesariamente es percibido como el más conveniente. Por otra parte, se han implementado aranceles a las cocinas a GLP desde mediados del 2016 de tal manera que las cocinas de inducción se vuelvan más atractivas para la población en general.

Adicionalmente, la selección de una cocina eficiente también puede ser considerada en términos de calidad, seguridad y en el impacto que tiene en el ambiente, además de otros factores cualitativos que están relacionados con las preferencias de las personas, el contexto y lugar. En el presente estudio se pretende utilizar análisis multicriterio para apoyar el proceso de selección de la mejor alternativa para los hogares ecuatorianos, considerando un equilibrio aceptable entre beneficios sociales, costos económicos, seguridad, aspectos ambientales y eficiencia energética. Para contar con la seguridad de que todos los aspectos están siendo considerados en la decisión, se utilizó el método de función de evaluación lineal aditivo (FELA). Éste método permite la organización de datos e intuiciones de manera lógica y estructurada en forma de jerarquía de criterios [10].

Con el propósito de conocer las valoraciones de los usuarios de los diferentes niveles socio-económicos respecto a cambios en el subsidio al GLP como a la energía para Inducción, se solicitó a grupos representativos de cada uno de los segmentos socio-económicos: bajo, medio y alto, evaluar las diferentes opciones en cocinas respecto a cada uno de los criterios en los contextos de: el subsidio al GLP y a la Electricidad se mantiene, el subsidio se elimina parcialmente y el subsidio se elimina por completo.

2. Metodología

Para desarrollar una estructura jerárquica que considere simultáneamente elementos cuantitativos y cualitativos que apoyen la selección de una cocina eficiente, el problema fue organizado en las siguientes etapas:

2.1. Definición del problema

Consiste en la definición del problema, a través del planteamiento del objetivo general y las diferentes alternativas. El objetivo del proceso decisorio es seleccionar la mejor alternativa de una cocina nueva que presente las mejores condiciones en cuanto a los beneficios sociales, costos económicos, impactos ambientales, seguridad y aspectos diarios de su uso. En el mercado de línea blanca en el Ecuador existen diferentes opciones, que de forma general son las siguientes: cocinas a GLP, cocinas a Inducción y cocinas Eléctricas; sin embargo dado el contexto y el nivel de la presencia de cada una de las opciones en los distintos hogares se consideró adecuado tan solo contar como alternativas: la cocina a GLP y la cocina a Inducción. Éstas alternativas se evaluaron considerando el conjunto de criterios que serán definidos en el paso 2.2.

2.2. Definición de los criterios y estructuración del modelo de decisión

Consiste en la definición de los elementos principales que caracterizan el proceso de compra de una nueva cocina. Para llevar a cabo esta actividad se consultaron diferentes bases de datos, como: manuales de cocinas, entrevistas con técnicos eléctricos, funcionarios de empresas eléctricas, artículos especializados [12]. Como un resultado importante de esta etapa se reconocieron los aspectos: sociales, económicos, de impacto ambiental, que están directamente relacionados al problema. Todo lo cual se realizó considerando el proceso de validación de criterios definido en [5], en el cual se consideran aspectos tales como:

1. Operatividad de los criterios.- Los atributos deben ser indicadores significativos del rendimiento.
2. Claridad.- La definición del criterio debe ser concisa y clara.
3. Integridad.- El conjunto de criterios debe abordar todos los aspectos críticos de un problema.
4. En la Tabla 1 se presenta la definición inicial de los criterios. Estos criterios fueron posteriormente validados en el paso 4.

2.3. Evaluación de los criterios

En la medida en que la simplicidad es un requisito muy importante para el éxito del modelo, y considerando además que el usuario la mayoría de las veces es una persona no especializada en el proceso decisorio utilizando modelaje, se optó, para evaluar las cocinas, por un enfoque de función de evaluación lineal aditivo (FELA). Las características de este enfoque también son totalmente compatibles con la función principal del modelo de análisis de decisión, es decir, para servir como un sistema de apoyo a la decisión para la compra de una nueva cocina. La aplicación del enfoque FELA a problemas prácticos implica cuestiones teóricas que están bien descritas en [4,6,8], tales como la independencia en la preferencia de los criterios y la formulación matemática de la función de valor.

[3] El costo en el que se incurre para el funcionamiento de la cocina

Tabla 1.
Definición de los Criterios.

Criterio	Subcriterio	Definición	Unidad de Medida
Seguridad (SE)		Condición que permiten minimizar el riesgo debido a las características técnicas de la cocina y/o al tipo de energía que utilice para su funcionamiento.	Cualitativa
Eficiencia Energética (EE)		Grado de optimización del consumo eléctrico relativo a cierta actividad de manera que cuando conseguimos realizar esa misma actividad con menos energía, se está mejorando la eficiencia energética.	%Kwh
Facilidad de Limpieza (FL)		Eliminación de la suciedad y la reducción de la población microbiana, a niveles no perjudiciales para la salud de quienes manejan el equipo.	Cualitativa
Facilidad de Uso (FU)		Facilidad con que las personas pueden utilizar una cocina y obtener como resultado los alimentos en el estado deseado.	Cualitativa
Impacto Ambiental (IA)		La contaminación es la introducción de contaminantes a un medio natural que provocan en este un cambio adverso.	Ppm de CO2
Costos	Adquisición (CA)	Costo total para el Comprador de la propiedad o unidad adquirida.	$/
	Operacionales (CO)	Son los costos constantes para mantener el equipo en funcionamiento	$/mes
	Instalación (CI)	Inversión que realiza el propietario de manera previa a la apertura y uso del equipo.	$/
	Mantenimiento (CM)	Es el precio pagado por concepto de las acciones realizadas para conservar o restaurar el equipo a un estado específico.	$/año

Fuente: Los Autores

En éste método los criterios deben ser estructurados según la jerarquía expuesta en la Fig. 1, la cual tiene concordancia con

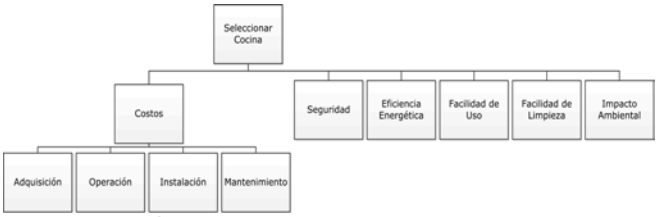


Figura 1. Jerarquía de los Criterios
Fuente: Los Autores.

los criterios expuestos en la Tabla 1; de esta manera se estructura el modelo de decisión.

El valor de una alternativa es calculado usando la ecuación (1).

$$V_i = \sum_j w_j \, v_{ij} \qquad (1)$$

En la cual v_{ij} es la valoración bruta de la alternativa i para el criterio j; w_j es el peso del criterio j y $\sum_j w_j = 1$.

Para jerarquías que contienen varios niveles de atributos la fórmula es más compleja, pero el principio es el mismo. Comenzando en la parte inferior de la jerarquía, la evaluación de cada alternativa con respecto al nivel superior se ejecuta utilizando la ecuación (1). Este proceso se lo debe realizar para todas las familias de los criterios en el nivel inferior de la jerarquía. De esta manera se consiguen evaluaciones para cada nivel respecto a su criterio madre o nivel superior. Repetir el proceso para todas las familias de atributos a ese nivel y continuar hasta llegar a la raíz del árbol.

La valoración de cada una de las opciones se obtienen usando la función patrón de normalización lineal expresada en la ecuación (2).

$$v_{norm} = \frac{V_{ij} - V_{min}}{v_{max} - v_{min}} \qquad (2)$$

En el cual v_{norm} es la valoración normalizada de: V_{ij} en el intervalo [0,1], y v_{max} y v_{min} son las mejores y peores valoraciones brutas de las alternativas en el criterio analizado, y V_{ij} es la valoración bruta de una alternativa en relación al criterio analizado.

2.4. Validación y ponderación de los datos

En este contexto, la ponderación de los criterios es una tarea difícil. Los pesos pueden ser expresados como los factores que definen el equilibrio entre los criterios de escala, y la ponderación consiste en definir la importancia relativa de cada criterio con respecto al conjunto de criterios. En la medida en que el modelo de análisis de decisión supone que los criterios son mutuamente excluyentes, los pesos deben reflejar las relaciones de compensación existentes entre el conjunto de criterios. La literatura sobre el análisis de decisiones presenta diferentes métodos para ayudar al tomador de decisiones a definir pesos [8]. Independientemente del método es importante considerar que los pesos están basados en juicios de valor de los individuos, por lo que es conveniente contar con un equipo de personas

Tabla 2.
Resultados de la Encuesta.

Criterio	MI	I	PI	NI	Total
(SE)	59.63%	35.63%	3.74%	1.00%	100%
(EE)	44.43%	45.76%	8.74%	1.08%	100%
(FU)	44.47%	45.89%	8.65%	1.00%	100%
(FL)	38.61%	46.76%	13.06%	1.58%	100%
(IA)	52.20%	35.41%	9.89%	2.49%	100%
(CA)	48.67%	44.10%	5.90%	1.33%	100%
(CO)	54.58%	36.02%	7.82%	1.58%	100%
(CI)	39.73%	43.64%	13.47%	3.16%	100%
(CM)	36.74%	47.71%	13.30%	2.24%	100%

Fuente: Los Autores

Tabla 3.
Pesos Ponderados de los Criterios.

Criterio	Peso	Subcriterio	Peso
(SE)	0.180		
(EE)	0.165		
(FU)	0.158		
(FL)	0.166		
(IA)	0.168		
Costos	0.163	(CA)	0.260
		(CO)	0.264
		(CI)	0.238
		(CM)	0.237

Fuente: Los Autores.

con conocimientos suficientes y apropiados que valoren de manera adecuada [4,10].

En éste estudio hemos procedido a validar y ponderar los criterios simultáneamente mediante una encuesta[4] dirigida a la población en general, en la cual los encuestados seleccionan la opción que mejor les parezca en una escala Likert de cuatro dimensiones: Muy Importante (MI), Importante (I), Poco Importante (PI), Nada Importante (NI). La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos del experimento, que consistió en aplicar 1.200 encuestas de forma estratificada, tanto en la región urbana como rural de la ciudad de Cuenca.

Estos resultados se utilizaron para definir ponderaciones promedio iniciales, sin embargo pueden ser alterados o cambiados de acuerdo a las preferencias de los decisores. Basados en los resultados de la Tabla 2 y de la estructura observada en Fig.1, la Tabla 3 presenta la ponderación inicial recomendada.

2.5. Implementación computacional del modelo

El modelo fue implementado en Excel de manera que el entorno para los decisores resulte lo más amigable posible. Dado que el decisor provee los pesos y las valoraciones brutas en las distintas alternativas en relación a los criterios, la implementación computacional hace todo los cálculos tediosos, proveyendo un ranking de las opciones posibles. La utilización de Excel facilitó además los cálculos respectivos con las distintas valoraciones de las opciones, en lo criterios que corresponden cuando se cambiaron los escenarios: los subsidios tanto al GLP como a la Electricidad se mantienen, se eliminan parcialmente y se eliminan por completo.

Tabla 4.
CO de acuerdo al Escenario.

Escenario	GLP	Inducción
El subsidio se mantiene	$5.00	$5.45
El subsidio se elimina parcialmente	$16.00	$7.45
El subsidio se elimina por completo	$32.00	$9.45

Fuente: Los Autores

Al variar las condiciones del subsidio lo que básicamente se hizo es alterar el Costo de Operación (CO) de ambas cocinas. Lo que influye en la valoración que el decisor dio a cada de las opciones en los criterios restantes. En la Tabla 4 se presentan los distintos Costos de Operación mensuales de acuerdo al escenario.

3. Experimento computacional

En los casos en los cuales las valoraciones brutas no fueron posibles obtener de la población, lo hicimos a través de manuales técnicos e información obtenida en sitios web especializados. Se decidió eliminar el criterio “costo de mantenimiento” debido a que éste valor es casi nulo para las cocinas de gas y desconocido para las de inducción. Se consideran las siguientes condiciones energéticas: $ 0.04 USD por los primeros 80 Kwh y $ 0.09 USD los Kwh excedentes [13], se asume que un hogar consumiría en promedio 105Kwh por mes; por otro lado un consumo promedio de 2 cilindros de gas por mes de 15 Kg por hogar en el caso de la cocina a GLP. Se efectuó el experimento bajo el supuesto de que el decisor no está acostumbrado a las cocinas de inducción y tendrá cierta dificultad en aprender el funcionamiento de la misma durante los primeros días o cada vez que la utilice para un nuevo tipo de comida. La emisión de CO2 esta tanto de la cocina a Inducción como de la GLP se obtuvo de [9].

El experimento se lo realizó de la siguiente manera:

1. Valoraciones brutas para cada una de las opciones tomadas de la población en general.
2. Valoraciones brutas tomadas de manera puntual para los grupos económicos: bajo, medio y alto en el escenario en el cual el subsidio se mantiene.
3. Valoraciones brutas tomadas de manera puntual para los grupos económicos: bajo, medio y alto en el escenario en el cual el subsidio se elimina parcialmente.
4. Valoraciones brutas tomadas de manera puntual para los grupos económicos: bajo, medio y alto en el escenario en el cual el subsidio se elimina por completo.

Como ya se mencionó, se consideraron solamente dos alternativas, lo cual por otro lado ayuda a simplificar el experimento. Sin embargo las alternativas compartieron ciertas características: 4 hornillas.

A la luz de lo mencionado anteriormente, la Tabla 5 muestra las valoraciones de la población en general; a su vez en la Tabla 6 se observan las valoraciones de los distintos sectores tomando en cuenta cada uno de los escenarios. En ésta Tabla 6 se exponen tan solo los criterios que se ven afectados por el cambio de

[4] Ver modelo de encuesta en Anexo.

Tabla 5.
Valoraciones Brutas Tomadas de la Población General.

Alternativa	SE	EE	FU	FL	IA	CA	CO	CI
Inducción	100	84%	50	100	≤500 ppm CO2	$279	$5.45	$38
GLP	20	40%	100	50	≥1mil ppm CO2	$300	$5	$0

Fuente: Los Autores

Tabla 6.
Valoraciones de Acuerdo a los Escenarios

Alternativa	NS	FL	FU	CO
Nivel Económico Bajo				
Con subsidio al GLP y a la electricidad				
Inducción	97	93	65	$5.45
GLP	78	77	92	$5
Con subsidio parcial al GLP y a la electricidad				
Inducción	96	94	65	$7.45
GLP	70	78	91	$16
Sin subsidio al GLP y a la electricidad				
Inducción	90	95	65	$9.45
GLP	67	78	90	$32
Nivel Económico Medio				
Con subsidio al GLP y a la electricidad				
Inducción	94	88	94	$5.45
GLP	60	75	78	$5
Con subsidio parcial al GLP y a la electricidad				
Inducción	93	91	90	$7.45
GLP	58	73	74	$16
Sin subsidio al GLP y a la electricidad				
Inducción	94	89	86	$9.45
GLP	60	75	74	$32
Nivel Económico Alto				
Con subsidio al GLP y a la electricidad				
Inducción	90	89	82	$5.45
GLP	61	77	85	$5
Con subsidio parcial al GLP y a la electricidad				
Inducción	90	88	81	$7.45
GLP	63	76	84	16
Sin subsidio al GLP y a la electricidad				
Inducción	90	90	82	$9.45
GLP	62	75	85	$32

Fuente: Los Autores

escenarios, quedando los demás constantes. Se exponen en el siguiente orden: nivel económico bajo, medio y alto. Y en cada uno de ellos los escenarios: con subsidio, con subsidio parcial y sin subsidio.

Para la obtención de los resultados finales hemos considerado la ponderación presentada en la Tabla 3. El peso del criterio Costo de Mantenimiento, dado que fue eliminado, se ponderó entre los otros costos.

Del experimento computacional se obtuvo los siguientes resultados:

Al analizar los resultados se evidencia que en cualquier caso la cocina de inducción muestra o indica mejores preferencias. No obstante se puede observar que existe un incremento en

Tabla 7.
Valoraciones Totales de las Opciones en los Distintos Estratos.

	Valoración	
Escenarios\Opciones	**Inducción**	**GLP**
Situación Actual		
Población General	0,7267	0,2733
Segmento Bajo	0,7267	0,2733
Segmento Media	0,8924	0,1076
Segmento Alto	0,7267	0,2733
Eliminación Parcial del Subsidio		
Segmento Bajo	0,7833	0,2167
Segmento Medio	0,9489	0,0511
Segmento Alto	0,7833	0,2167
Eliminación Completa del Subsidio		
Segmento Bajo	0,7833	0,2167
Segmento Medio	0,9489	0,0511
Segmento Alto	0,7833	0,2167

Fuente: Los Autores

Se puede observar que la decisión depende del decisor y sus preferencias, el lugar y el contexto macroeconómico. A pesar de que la decisión resulta simple en un inicio, cuando se consideran las compensaciones de los decisores, la decisión empieza a ser compleja, justificándose el uso del modelo a nivel individual.

3. Conclusiones

Este estudio describe el desarrollo de un modelo de análisis con múltiples criterios para la selección de una cocina nueva. El modelo considera simultáneamente aspectos cualitativos y cuantitativos para apoyar la decisión; equilibrando aspectos sociales, riesgos ambientales, costos económicos y eficiencia energética. El estudio es motivado por el plan nacional de cocción eficiente impulsado por el gobierno ecuatoriano dentro del objetivo de cambio de la matriz energética, y éste a su vez dentro Plan Nacional del Buen Vivir; se ha considerado adicionalmente el subsidio temporal a la energía eléctrica que está promoviendo el gobierno para la obtención de mejores resultados en cuanto al proyecto Cocinas de Inducción.

El experimento computacional utilizado, nos indica que en las actuales condiciones, la alternativa mejor puntuada es la cocina de Inducción, independientemente del escenario considerado.

Una característica adicional de éste modelo es que se pueden manejar o plantear estrategias que permitan modificar los pesos de los distintos criterios, tanto los del lado gubernamental como los del usuario.

Referencias

[1] Banerjee, M., Prasad, R., Rehman, I. and Gill, B., Induction stoves as an option for clean cooking in rural India. Energy Policy, 88, pp. 159-167, 2016. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.10.021

[2] El Comercio. El subsidio al gas licuado de petróleo continuará hasta el 2017. [en Línea]. 2014. [Consultado Noviembre 30, 2016] Disponible en: http://www.elcomercio.com/actualidad/subsidio-gas-2017-cocinas-induccion-electricidad.html

[3] Banco Central del Ecuador. Cifras del sector petrolero ecuatoriano No. 109, 2016. Technical Report 113, Bancon Central del Ecuador, Quito, [en Línea]. 2016. [Consultado Septiembre 19, 2016]: Disponible en:

https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/cspe2016109.pdf

[4] Department of Communities and Local Government. Multi-criteria Analysis: A manual. London, UK, [en Línea]. 2009. [Consultado Agosto 20, 2016] Disponible en: http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf

[5] Falkner, C.H. and Benhajla, S., Multi-attribute decision models in the justication of CIM systems. The Engineering Economist, 35(2), pp. 91-114, 1990. DOI: 10.1080/00137919008903008

[6] French, S., Decision theory: An introduction to the mathematics of rationality. Halsted Press, New York, NY, 1986.

[7] Gonzales-Carrión, J.E. y Carvajal-Perez R.N., Algoritmo inteligente para evaluar el impacto de la introducción masiva de cocinas de inducción. Ingeniería Energética, [en Línea]. 36, pp. 304-312, 2015. [Consultado Agosto 24, 2016] Disponible en: http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v36n3/rie09315.pdf

[8] Keeney, R. and Raifa, H., Decision analysis with multiple conflicting objectives. Wiley & Sons, New York, NY, [online]. 1975. Consultado Septiembre 2, 2016] Available at: http://pure.iiasa.ac.at/375/1/WP-75-053.pdf

[9] Martínez-Gómez, J., Ibarra, D., Villacis, S., Cuji, P. and Cruz, P.R., Analysis of LPG, electric and induction cookers during cooking typical Ecuadorian dishes into the national efficient cooking program. Food Policy, 59, pp. 88-102, 2016. DOI: 10.1016/j.foodpol.2015.12.010

[10] Keeney, R.L., See, K.E. and Von Winterfeldt, D., Evaluating academic programs: With Applications to U.S. Graduate Decision Science Programs. Operations Research, 54(5), pp. 813-828, 2006. DOI: 10.1287/opre.1060.0328

[11] Smith, K.R. and Sagar, A., Making the clean available: Escaping India's Chulha Trap. Energy Policy, 75, pp. 410-414, 2014. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.09.024

[12] Sweeney, M., Dols, J., Fortenbery, B. and Sharp, F., Induction cooking technology design and assessment. [online]. [Consulted August 20th, 2016] ACEEE Summer Study on Energy E-ciency in Buildings, pp 370-379, 2014. Available at: http://aceee.org/files/proceedings/2014/data/papers/9-702.pdf

[13] El Universo. Técnicos hacen cálculos del consumo de nuevas cocinas, [en Línea]. 2014. [Consultado Agosto 20, de 2016] Disponible en: http://www.eluniverso.com/noticias/2014/05/01/nota/2903351/tecnicos-hacen-calculos-consumo-nuevas-cocinas

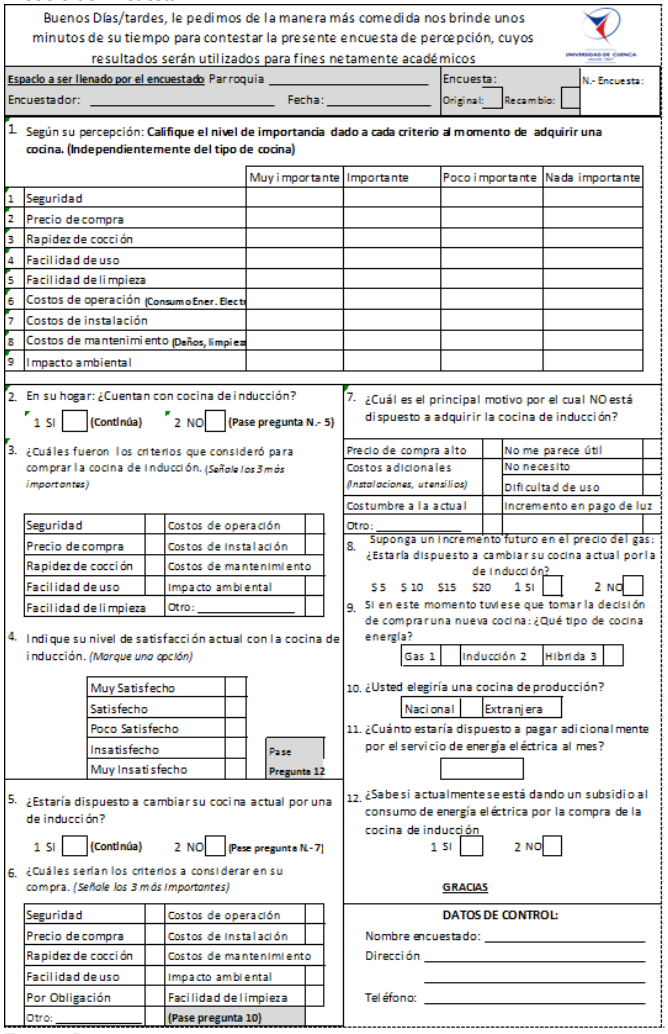
F.B. Naula-Sigua, recibió el BSc. de Ing. Comercial por la Universidad de Cuenca, Ecuador, en 2016. Investigador Junior en el Grupo de Investigación Empresarial, Universidad de Cuenca. Ha participado como ponente en el I Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas y Económicas, Loja Ecuador 2017. Actualmente cursando el Magister en Finanzas por la Universidad de Chile.
Orcid: 0000-0003-2218-6216

J.A. Campoverde-Campoverde, Obtuvo el BSc. De Ing. Eléctrico en la Universidad de Cuenca, Ecuador, 1987. Es MSc. en Administración de Negocios en la Universidad de Quebec, Montreal, Canadá en 2007. Actualmente es profesor agregado de la Universidad de Cuenca y se desempeña como coordinador del Grupo de Investigación Empresarial GIE, de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad de Cuenca.
Orcid: 0000-0002-1633-5644

D. Borenstein, obtuvo su BSc. en Ingeniería Naval por la Universidad de Federal do Rio De Janeiro, Brasil 1986. Es MaSc. en Administración por la Universidad de Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, en 1991. Y Dr. en Investigación Operativa, University of Stratchclyde, Escocia, 1995. Realizo estudios post-doctorado en Department of Systems and Industrial Engineering, University of Arizona, USA, en el periodo de 10/2003-10/2004. Actualmente es profesor Asociado de la Universidad Federal do Rio Grande De Sur-Brasil.
Orcid: 0000-0002-6220-3159

Anexo 1.

Modelo de Encuesta



Buenos Días/tardes, le pedimos de la manera más comedida nos brinde unos minutos de su tiempo para contestar la presente encuesta de percepción, cuyos resultados serán utilizados para fines netamente académicos

Espacio a ser llenado por el encuestado: Parroquia _____ Encuesta: N.- Encuesta:
Encuestador: _____ Fecha: _____ Original: Recambio:

1. Según su percepción: **Califique el nivel de importancia dado a cada criterio al momento de adquirir una cocina. (Independientemente del tipo de cocina)**

		Muy importante	Importante	Poco importante	Nada importante
1	Seguridad				
2	Precio de compra				
3	Rapidez de cocción				
4	Facilidad de uso				
5	Facilidad de limpieza				
6	Costos de operación (Consumo Ener. Elect				
7	Costos de instalación				
8	Costos de mantenimiento (Daños, limpieza				
9	Impacto ambiental				

2. En su hogar: ¿Cuentan con cocina de inducción?
1 SI (Continúa) 2 NO (Pase pregunta N.- 5)

3. ¿Cuáles fueron los criterios que consideró para comprar la cocina de inducción. *(Señale los 3 más importantes)*

Seguridad		Costos de operación	
Precio de compra		Costos de instalación	
Rapidez de cocción		Costos de mantenimiento	
Facilidad de uso		Impacto ambiental	
Facilidad de limpieza		Otro: _____	

4. Indique su nivel de satisfacción actual con la cocina de inducción. *(Marque una opción)*

Muy Satisfecho	
Satisfecho	
Poco Satisfecho	
Insatisfecho	
Muy Insatisfecho	

Pase Pregunta 12

5. ¿Estaría dispuesto a cambiar su cocina actual por una de inducción?
1 SI (Continúa) 2 NO (Pase pregunta N.- 7)

6. ¿Cuáles serían los criterios a considerar en su compra. *(Señale los 3 más importantes)*

Seguridad		Costos de operación	
Precio de compra		Costos de instalación	
Rapidez de cocción		Costos de mantenimiento	
Facilidad de uso		Impacto ambiental	
Por Obligación		Facilidad de limpieza	
Otro: _____		(Pase pregunta 10)	

7. ¿Cuál es el principal motivo por el cual NO está dispuesto a adquirir la cocina de inducción?

Precio de compra alto		No me parece útil	
Costos adicionales (Instalaciones, utensilios)		No necesito	
		Dificultad de uso	
Costumbre a la actual		Incremento en pago de luz	
Otro: _____			

8. Suponga un incremento futuro en el precio del gas: ¿Estaría dispuesto a cambiar su cocina actual por la de inducción?
$5 $10 $15 $20 1 SI 2 NO

9. SI en este momento tuviese que tomar la decisión de comprar una nueva cocina: ¿Qué tipo de cocina energía?
Gas 1 | Inducción 2 | Hibrida 3

10. ¿Usted elegiría una cocina de producción?
Nacional | Extranjera

11. ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar adicionalmente por el servicio de energía eléctrica al mes?

12. ¿Sabe si actualmente se está dando un subsidio al consumo de energía eléctrica por la compra de la cocina de inducción
1 SI 2 NO

GRACIAS

DATOS DE CONTROL:
Nombre encuestado: _____
Dirección _____
Teléfono: _____

Fuente: Los autores.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Incidence of the mechanized sowing speed in irrigated rice

Mauricio González-Betancourt [a], Ana Milena Alonso-Fernández [b] & Zaira Liceth Mayorga-Ruíz [b]

[a] *Investigador convenio COLCIENCIAS- SENA. Facultad de Ingeniería, Tecnológico de Antioquia, Medellín, Colombia. mao275@yahoo.com*
[b] *Centro Agropecuario "La Granja", Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, El Espinal, Colombia. zairamayorga3@gmail.com, anamilenalonsof@live.com*

Received: March 31th, de 2017. Received in revised form: September 21th, 2017. Accepted: September 26th, 2017

Abstract
This paper presents some experimental results to determine the incidence of mechanized sowing speed in the development and growth of rice in El Espinal-Tolima. Using a completely randomized design and a seed density of 104.5 ± 3.3 kg/ha, plots were sown in three replicates at 3.31 ± 0.05 km/h, 5.13 ± 0.18 Km/h, and 6.98 ± 0.24 km/h. Plant population, plant weight, dry matter, moisture content, and yield showed statistically significant differences with respect to sowing speed. This research found that the sowing speed has a proportional relationship with: a) the percentage of plants grouped in their roots, b) the number of non-productive tillers, c) the fuel consumed rate, d) uncovered seed, e) effective field capacity. The sowing speed of 5.13 ± 0.18 km/h was achieved by plants with a higher number of panicles per m^2 and yield: this is optimal.

Keywords: Sowing speed; irrigated rice; rice profitability

Incidencia de la velocidad de siembra mecanizada en el arroz de riego

Resumen
Se determinó la incidencia de la velocidad mecanizada de siembra en el desarrollo y crecimiento del arroz en El Espinal-Tolima. Utilizando un diseño completamente al azar y una densidad de semilla de 104.5 ± 3.3 kg/ha, se sembraron parcelas en tres repeticiones a 3.31 ± 0.05 km/h, 5.13 ± 0.18 Km/h y 6.98 ± 0.24 km/h. La población de las plantas, el peso de la planta, la materia seca, el contenido de humedad y el rendimiento mostraron diferencias estadísticamente significativas con respecto a la velocidad de siembra. Se encontró que la velocidad de siembra tiene una relación proporcional con: a) el porcentaje de plantas agrupadas en sus raíces, b) los tallos no productivos, c) el combustible consumido, d) las semillas descubiertas, e) la capacidad de campo efectiva. La velocidad de siembra de 5.13 ± 0.18 km/h logro plantas con mayor número de panículas por m^2 y rendimiento, lo cual es óptimo.

Palabras claves: Velocidad de siembra; arroz de riego; rentabilidad del arroz.

1. Introduction

The adoption of mechanized practices means a decrease in labor costs for the rice farmers; however, incorrect machining activities limit profitability. It is important to be able to compete in the international market and have access to free trade agreements [1]. In 2030, a free trade agreement will allow the United States to export rice to Colombia without tariffs, which will have an impact on the regional economy (Tolima) and the rural sector in Colombia.

Rice growers need to sow on a specific date and expand the sown area with the same seeder. This leads to an increase in the speed of planting rice without considering its impact. The effective mechanized planting of rice is achieved with certified and treated seed, which is planted at the right date, has a regulated seed density, good water management, and the proper machinery is used. The proper distribution of the seeds by the seeder is important to avoid stress in the rice during its development and growth. The seed that is exposed or placed at an inadequate depth influences uniform emergence, and in turn this means that not all plants develop in the same way in terms of their state and thus the application loses effectiveness.

The optimum speed of mechanized sowing increases the yield for corn [2-9], sunflower [10], soy [11-13], and wheat [14]. In references [4-9,12], yield has been favored with the

How to cite: González-Betancourt, M., Alonso-Fernández, A.M. and Mayorga-Ruíz, Z.L., Incidence of the mechanized sowing speed in irrigated rice DYNA, 84(203), pp. 101-109, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

lowest sowing speeds. In terms of rice sowing speed, El-Khateeb and Khodeir [15] evaluated forward speed and performance rice planting machines (mechanical drilling and mechanical transplanting). They found that increasing the forward speed for all rice planting machines tends to increase the effective field capacity, fuel consumption rate, power consumption, energy required, and slip ratio; it also decreases field efficiency. Blanco and Morales [16] recommend not exceeding 6 km/h. SOSBAI [17] recommend that the rice seeder is used at the appropriate speed in order to distribute seeds in a uniform manner in the line, which is varies according to the characteristics of the area.

The purpose of this work was to find out the difference in the effect of the mechanized sowing speed on the development, growth and yield of irrigated rice in El Espinal, Colombia. In this zone, rice irrigation is designed with small-scale land leveling, and rice levees at level curve are compacted with "Taipa" [18]. Rice levee acts like speed bumps (or speed breakers) during rice sowing.

2. Materials and methods

The experiment was established using a completely randomized design at the "La Granja" Agricultural Center, Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), in El Espinal, Tolima, located at 4 ° 9'56.89 "N and 74 ° 55'59.96" W. Nine plots were established based on three sowing speeds with three replicates. Each plot was 50 m long and 8.1 m wide. All plots were site-specific with similar production potential ("Sub-region of a field that expresses a relatively homogeneous combination of yield limiting factors [19]"). Site-specifications were determined according to references [20-22] with normalized difference vegetation index maps, soil characteristics, and the yields from the last two years. The soil was of sandy texture (Table 1, Fig. 1). There was a flat topography, which had a longitudinal and transverse slope of 0.82% and 0.11%, respectively.

Land preparation was undertaken with two disc harrow passes and a LandPlane pass. Irrigation was designed with small-scale land leveling, and rice levees on a level curve that was compacted with "taipa". The demarcation of the surrounding levees in the terrain was undertaken with laser level (Laser Leica Rugby 830). Controls were directed to broadleaf (Cucumis melo), cyperaceas (Cyperus rotundus), and Echinochloa colona in post-early, and applications focused on post-tardy.

The FEDEARROZ 2000 variety germination test reached 91 percent germination. According to Guzmán [23], more than 75% of rice growers use a seed density equal to or greater than 120 kg of seed per hectare. According to Pulver [24], and Carmona and Dotto [25], densities between 60 and 100 kg/ha produce stronger plants, achieve a population between 150 and 250 plants/m^2, and there is a possibility of 600 and 800 panicles/m^2 as well as high yields. Therefore, the seeder was calibrated with a seed density of close to 105 kg/ha.

Seeding was undertaken with a SEMEATO PD 17 seeder (17 lines x 17 cm) with a seed density of 104.5 ± 3.3 kg of seed/ha. Eq. 1 defined seeding speeds. The 6145J John Deere tractor engine speed, B1 at 1400 revolutions per minute (rpm),

Table 1.
Soil characteristics

*	SA	C	T	RD	AD	TP	pH	OM
1	58.4	18	FA	2.73	2.3	16.6	6.8	1.12
2	59	12.4	FA	2.91	2.0	30.9	7.2	0.68
3	63	11.6	FA	2.41	2.0	22.5	6.5	0.89
4	49.0	13.0	F	2.2	1.9	18.6	7.3	0.89

* Sampling point. SA= Sand (%). C= Clay (%). T = Texture. RD = Real Density (gr/cm^3). AD = Apparent Density (gr/cm3). TP = Total Porosity (%). OM = Organic matter (%).
Source: The authors

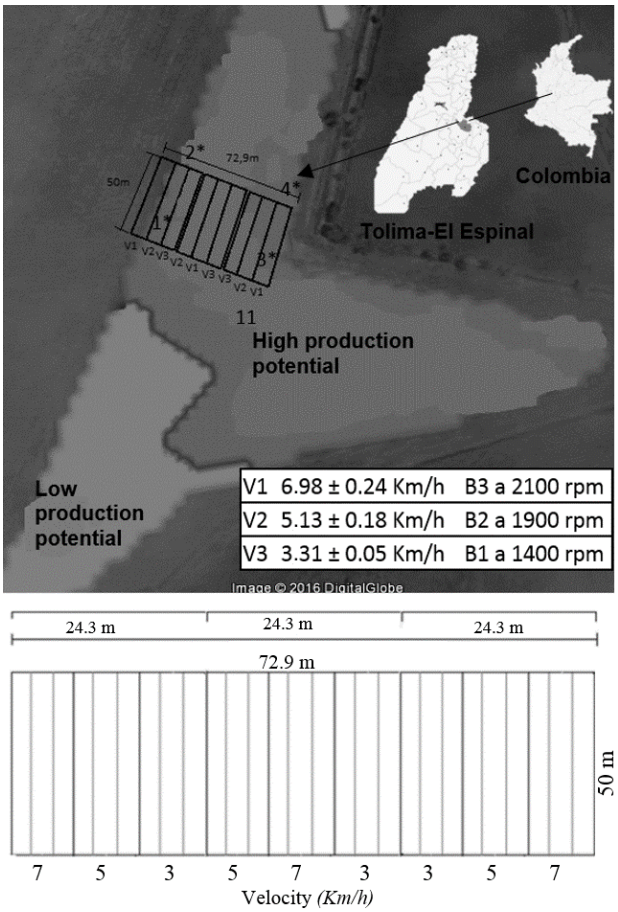


Figure 1. Location and plots characteristics of the Agricultural Center "La Granja".
Source: The authors, Google Earth, and Paint.

B2 at 1900 rpm, and B3 at 2100 rpm corresponded to speeds of 3.31 ± 0.05 km/h, 5.13 ± 0.18 km/h and 6.98 ± 0.24 km/h, respectively. The document will discuss 3, 5, and 7 km/h. The theoretical field capacity (TC) is the result of multiplying the average speed (km/h) when working width of the seeder (m) by a conversion factor equal to 0.1.

$$V = \left(\frac{L}{\bar{t}} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{L}{t_i} - \frac{L}{\bar{t}}\right)^2 / (N-1)}\right) x3{,}6 \qquad (1)$$

Where "V" is the seeder speed (Km/h), L is the length of the plot (50m), "t" is the time spent to traverse the plot (s), "n" is time taken by each sowing speed (treatment), and $\bar{t}$ is

the mean time.

Rice had intermittent irrigation in the dry season from May to October 2016, where the maximum solar radiation coincided with the reproductive and maturation rice phases. According to CORPOICA-NATAIMA weather station, which is to 6.7 km from the plots, in these phases the average solar radiation was 427.47 ± 84.79 Cal/cm^2-day. The irrigation sheet applied was 921 mm, and the total precipitation was 350 mm. The distribution of the monthly precipitation is bimodal, and there are abundant rains from March to May and from October to November. Ambient temperature in the vegetative phase oscillates between 21 and 36 °C, and between 20 and 38°C in the reproductive phase. FEDEARROZ-2000 tolerates daytime temperatures of between 29 to 37 °C, and does not tolerate night temperatures outside the range of between 21 to 25 °C [26]. Over a short period (10 days) in the reproductive stage, plots had a limited availability of water, which caused stress in the rice and has the ability to reduce yield [27].

Pyricularia control were undertaken with three applications of fungicide during the reproductive phase. FEDEARROZ 2000 has high susceptibility to diseases in relative humidity greater than 80%. The maximum relative humidity during rice development was 83%. Insecticide was not applied. Considering the chemical analysis of the soil, the nutritional requirements of FEDEARROZ 2000 [28], and the result of the FEDEARROZ Rice Fertilization System (SIFA; [29]), soil fertilizations were fractions with 160 kg-N/ha, 33 P_2O_5-kg/ha and 119 K_2O-kg/ha. When the average of the field readings with the chlorophyllometer SPAD 502 were between 34 ± 1 SPAD, nitrogen (NH_4) was applied. Field monitoring with Chlorophyllometer was undertaken according to Garcés and Castilla [30]. During floral primordium, the third fertilization was applied.

Variables measured in the vegetative, reproductive and maturation phases allowed the researchers to evaluate the incidence of mechanized sowing speed on rice development and growth. In the vegetative phase, eighteen days after sowing, and nine days after rice emergence (d. a. r. e), seed depth (SD) in thirty seedlings per plot were randomly selected and measured. Plant population per m^2 (P/m^2) was measured ten d. a. r. e with three replications per plot. Frame (1 m^2) was located at random.

The spacing between plants was determined ten d. a. r. e., and the distance between plants (Xi) was then measured within a frame (1 m^2) three replicates in each plot. The spaces between the plants were analyzed by the classification proposed by ISO 7256/1 *[31]*, which determines the percentage of spacing corresponding to normal, multiples, and fault classes.

For a seed density of 104 kg/ha, there are 62 seeds per linear meter; i.e. reference spacing (X_{ref}) of 1.6 cm. Normal class (NC) had X_i between 0.8 and 2.4 cm (0.5 X_{ref} <X_i <1.5 X_{ref}), multiple class (MC) had X_i less than 0.8 cm (X_i <0.5 m. X_{ref}), and fail class (FCS) had X_i greater than 2.4 cm. For the analysis were calculated the coefficient of variation (CV) and the precision index (PI) plant distribution (eq. 2 - 3).

$$CV = \frac{\sigma}{X}.100 \quad (2)$$

$$PI = \frac{\sigma}{X_{ref}}.100 \quad (3)$$

Where σ is the standard deviation of spacing between seedlings (cm), and X is the mean of all plant spacing (cm).

Field sampling was undertaken at maximum tillering (30 d. a. r. e.), flowering (99 d. a. r. e.), and maturation (127 d. a. r. e.). Each plot was divided into three parts, and in each of the parts a W path was taken, extracting two or more plants per point from the root. At a sampling point, roots grouped some plants. The percentage of plants grouped by their roots in each plot was determined (Plants grouped number/total number of plants * 100). In thirty rice plants selected per plot (70 plants in total) in the laboratory, plant length (PL), root length (RL), tillers length (TL), plant weight (PW), root weight (RW), and tillers weight (TW) were measured. Then, dry plant weight (DW), the percentage of dry matter (DM; eq. 4), and plant moisture (%P; eq. 5) were obtained. Drying was carried out at 60 ° C in a Memmert oven.

$$DM(\%) = \frac{DW}{PW} * 100 \quad (4)$$

$$PM\ (\%) = 100 - \ \%DM \quad (5)$$

In the reproduction (99 d. a. r. e.) and maturation phases (127 d. a. r. e.), three frames of 0.25 m^2 were randomly located in each plot. During flowering and maturation, the number of tillers (T/m^2) and panicles per m^2 (PA/m^2) were calculated. During maturation, 25 panicles were randomly collected within each plot. Filled grain per panicle (#G/PA: Number of filled spikelets panicle^{-1}), 1000 grain weight (1000GW), percentage of sterile spikelet (% SS), length of the panicle (PAL), and panicles weight per plant (PAW/P) were then characterized.

Variance analysis of the information collected in the statistical software "InfoStat" was performed, using the Duncan test with a 5% significance to compare means.

Fuel, seed, and yield with respect to mechanized sowing speed were then determined. The work team then estimated fuel consumed with volumetric containers, recharge of the tank after sowing the plot, and sowing area. The average fuel consumption rate (FC (Gallons/ha)) was then obtained by sowing speed. With six replications per plot, the percentage of uncovered seed (% US) per unit area was calculated as the average of the ratio between the number of seeds exposed in 1 m^2 and the seeds deposited in a 1 m^2 area by the seeder. In three samples of 0.25 m^2 per plot, the paddy yield using a manual grain harvest with 20.6% moisture was estimated.

3. Results and discussion

Table 2 presents the results from the variables measured in the three rice phases based on sowing speed. Sowing plots at 7 km/h allowed half the time required for planting with 3 km/h, and demanded 2.2 times more fuel than at a speed of 3 km/h.

The sowing speed of 5 km/h approached a seed depth for which the seeder was calibrated (3 cm) although there are no significant differences with the other speeds. Uncovered seed

was less than 1% at all speeds used. The sowing speed of 7 km/h obtained the highest percentage of uncovered seed. Sowing speed was proportional to the quantity of uncovered seed, which is in agreement with Mahl et al. [7] for corn. The plant population obtained in the plots was superior to the 150 plants/m^2 recommended by Pulver [24] in order to obtain good yields. According to FEDEARROZ [32], the plots sown at 5 and 7 km/h were in the range of 300 to 350 plants/m.

There were significant differences in spacing in terms of multiples and faults classes. Seedlings in the plots sown at 7 km/h were closer to each other and had the highest percentage of multiple and normal spacing (Table 2). Plants were quite far apart (more than 2.4 cm) in the plots that were sown at 5 km/h. There were no differences in the normal spacing percentages. The authors observed that the multiple class had the lowest percentage spacing with a sowing speed of 3 km/h. The variability in seed distribution, expressed by the coefficient of variation (CV), was high for all three speeds.

In terms of the seed's longitudinal distribution, the optimum result would be a percentage of normal spacing that is close to 100%. However, both soil and machinery factors influence the distribution of irregular plants [25]. The seeder delivers seeds in a continuous flow.

In the three phases, the plots sown at 7 km/h had a higher percentage of plants grouped by root (Figs. 2-3). Sowing at high speeds does not evenly distribute the seed [2], which favors nutrient, light, and water competition in nearby plants and consequently affects production [33].

The weight of the plant presented statistically significant differences in the vegetative and maturation phases; the higher weight were sowing speed of 5 km/h. Therefore, the percentage of dry matter and moisture content varies throughout the different phases. The plots sown at 7 km/h had the lowest percentage of moisture (Fig. 4). Water stress and temperatures below 35 °C influence moisture content in the reproductive phase. During this phase, plots sown at 3 km/h had a higher moisture content (plots with lower plants population). Temperatures may affect pollen formation, grain fertility [34], and decrease potential yields by up to 50% [35].

Table 2.
Relationship of sowing speed with different variables

Sowing					**Vegetative phase - seedling**						
V (Km/h)	**TC (Ha/h)**	**FC (G/ha)**	**% US**	**SD (cm)**	**P/m^2**	**FCS (%)**	**NC (%)**	**MC (%)**	**CV (%)**	**PI**	
3	0.96	2.55	0.86	3.14a	189b	25.63b	37.61a	36.76a	123.59	30	
5	1.48	3.75	0.4	3.06a	331a	29.38a	34.90a	35.72b	120.83	29.4	
7	2.02	5.62	0.17	3.17a	355a	12.11b	45.62a	42.27b	87.5	28.1	
Vegetative phase - tillering					**Reproductive phase - flowering**						
V (Km/h)	**PL (cm)**	**PW (g)**	**DM (%)**	**PM (%)**	**PL(cm)**	**PW (g)**	**%DM**	**%PM**	**RL (cm)**	**T/m^2**	**PA/m^2**
3	27.30a	2.29b	19.37b	80.63a	91.77a	132.33a	27.14b	72.86a	20.78b	544a	299a
5	28.11a	3.09a	17.53b	82.47a	90.25a	133.00a	32.82a	67.18b	20.51b	637a	370a
7	27.83a	2.68ab	22.37a	77.63b	92.04a	112.44a	31.28a	68.72b	22.58a	736a	385a
F value	0.78	6	7.58	7.58	1.23	2.26	13.98	13.98	4.3	0.95	0.84
P value	0.458	0.0028	0.0006	0.0006	0.2936	0.1065	<0.0001	<0.0001	0.0147	0.4097	0.4509
CV	15.86	57.26	42.58	10.48	8.7	58.02	23.27	10.24	23.72	37.35	35.91
Maturation phase					**Yield components**						
V (Km/h)	**LP (cm)**	**PW (g)**	**DM (%)**	**PM (%)**	**1000GW (g)**	**PAL (cm)**	**PAW/P (g)**	**#G/PA**	**PA/m^2**	**%SS**	**Y (Ton/ha)**
3	88.01a	70.09c	27.81c	72.19a	23.73a	19.72b	7.60b	93a	451a	22.40a	5.83a
5	88.10a	107.11a	29.81b	70.19b	23.77a	19.78b	10.49a	82a	497a	19.70a	5.93a
7	89.59a	91.03b	31.97a	68.03c	23.47a	21.15a	11.66a	93a	405a	22.03a	4.37b
F value	1.39	10.55	10.97	10.97	0.01	13.1	8.4	0.86	2.14	0.08	8.76
P value	0.251	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.9964	<0.0001	0.0003	0.4677	0.1468	0.9281	0.0166
CV	7.67	51.71	19.16	8.18	20.04	10	67.22	13.06	20.92	43.16	9.54

Means with the same letter are not significantly different from each other. Duncan ($p<0.05$). P value is the significance level

Source: The authors

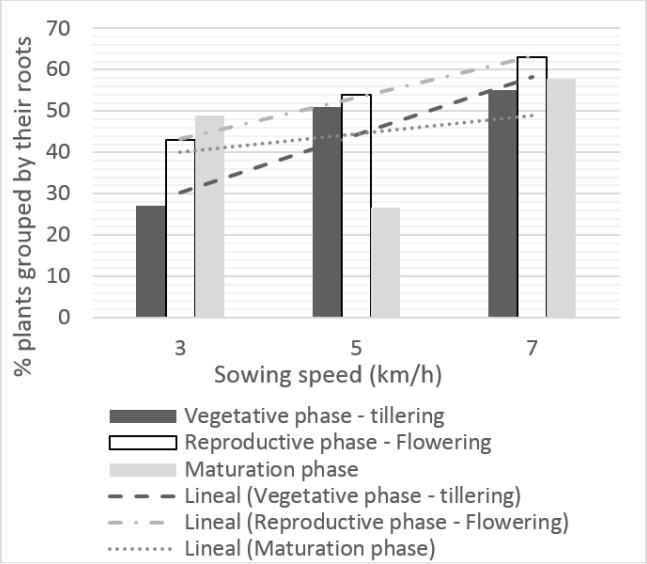


Figure 2. Percentage of grouping with respect to sowing speed and rice phase.
Source: The authors

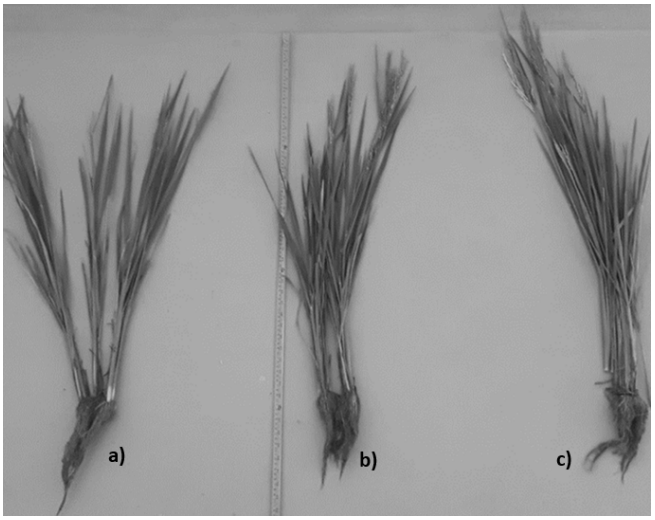


Figure 3. Plants grouped in the root. a-b) Three and two plants in competition; c) Plant with good development.
Source: The authors

No significant differences were found for plant length. However, after maximum tillers elongation, plants sown at 7 km/h were the largest, both in the aerial part and in the root. There are significant differences in terms of root length. The plots sown at 5 km/h had the shortest root length. As mentioned by Yoshida et al. [36], plants with the highest tillering ability tend to have a shorter root system due to competition for the assimilation of supplements, which is activated by the tillering process. Genetic factors, climatic conditions and agronomic management determined plant length [37]. Competing plants seek to grow by using light and water. Therefore, the competition between plants for light and water identified in plots sown at 7 km/h may explain the additional growth. The plant resources that are invested in the further elongation of the internode (sink and future source) affect the growth of the panicle (sink). In the reproductive-flowering phase, the number of tillers that did not produce panicle was higher as the sowing speed increased (Fig. 5).

There were no significant differences in the number of panicles per m^2, filled grain per panicle, 1000-grain weight, and percentage of sterile spikelet with respect to the sowing speed. Fig. 6 shows a principal component analysis. The number of panicles per m^2, 1000-grain weight, and yield were higher for the 5 km/h sowing speed, followed by 3 km/h (Figs. 7-8). The weight and length of the panicles per plant was higher in the 7 km/h plots planted.

The results of the components yield were compared with the work by Petro et al. ([38]; Zone benchmark, Figs. 7-8), where R1 and R2 represent the FEDEARROZ 2000 sowing campaigns in April and December 2013, respectively in Saldaña Tolima. Between Saldaña and El Espinal, there is a distance of 29.8 Km. The minimum temperature (Tmin) varied less than 1°C in the experiment (22.07 ±1.14 °C) and R1, as well as for R1 (23.05+1.10 °C) and R2 (23.07+0.89 °C: Fig. 9). The solar radiation in R1 (446.09 ±94.33 cal.cm-2.dia-1) and R2 (448.86 ±102.78 cal.cm-2.dia-1) were greater than the solar radiation

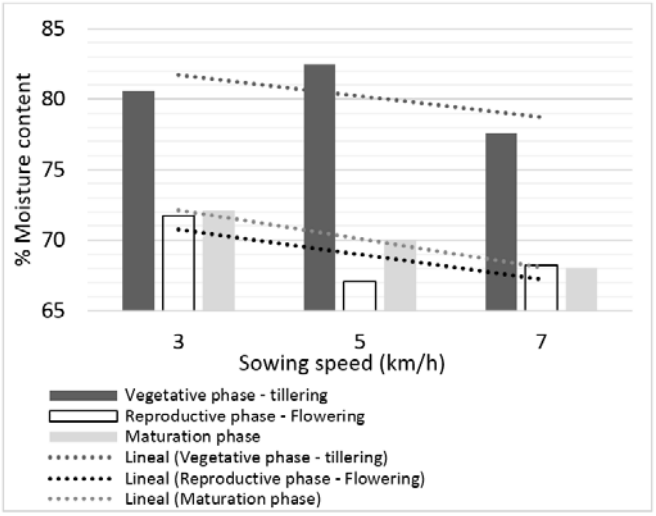


Figure 4. Percentage of moisture in the rice plant for the three phases.
Source: The authors

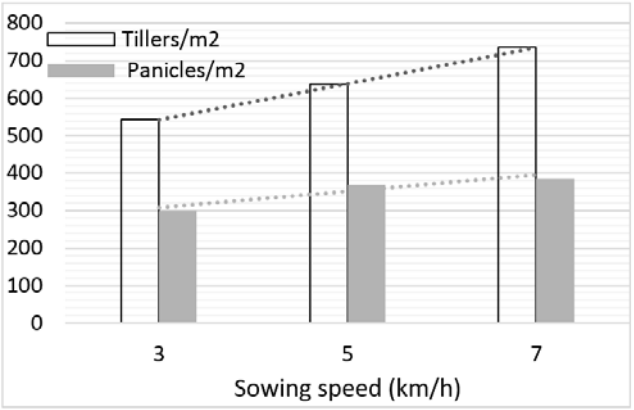


Figure 5. Tillers/m^2 vs. Panicles/m^2 for flowering rice.
Source: The authors

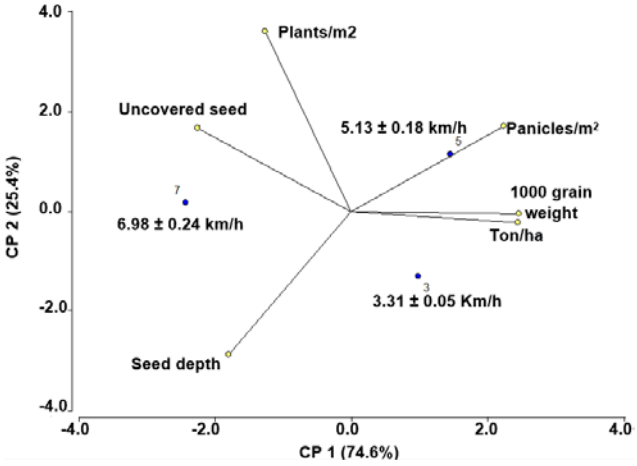


Figure 6. Principal component analysis.
Source: The authors

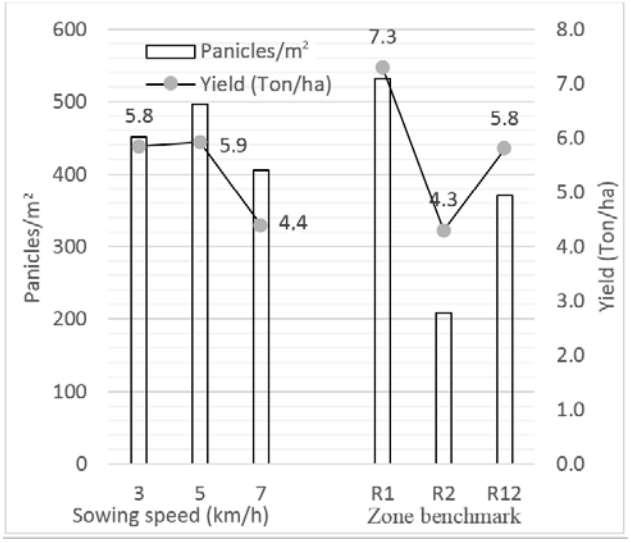


Figure 7. Panicles/m^2 vs. yield (Ton/ha) in experimental and reference plots
Source: The authors

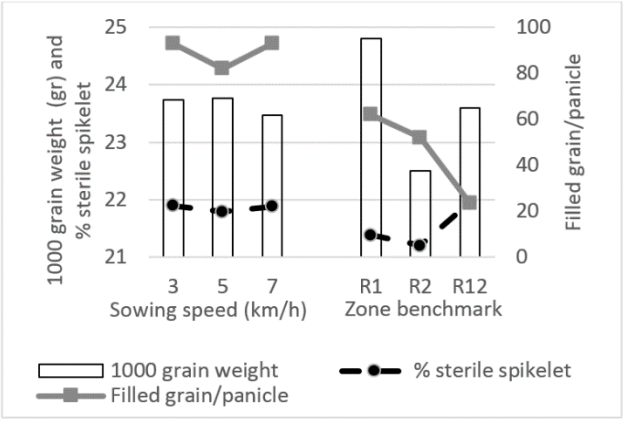


Figure 8. 1000-grain weight in experimental and reference plots
Source: The authors

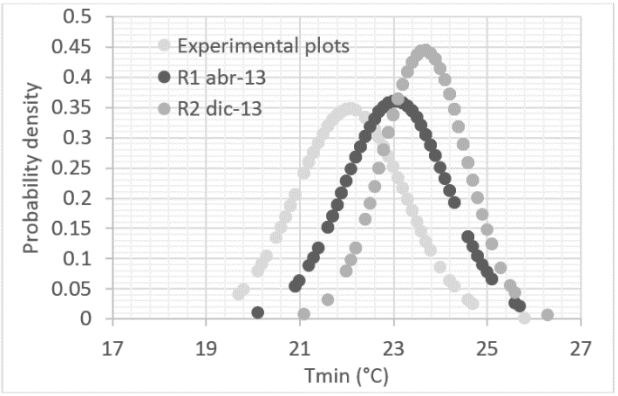


Figure 9. Distribution of the minimum temperature during rice growth in experimental and reference plots.
Source: The authors

in the experiment (424.5 ± 83.66 Cal/cm^2-day). The results from plots sowing at 5 km/h are higher than the results of R2, the average of R1 and R2 (R12: Fig. 7). Therefore, the yield falls within the range of the yields in the area.

The mechanized sowing speed showed incidence in the development, growth, and yield of irrigated rice. The results manifested that the 7 km/h sowing speed is closely associated with the percentage of uncovered seed and plant competition (Figs. 2-7). If seeds have distribution problems when they are sown, plants develop and grow in direct competition, which limits their yield potential. This occurred in plots sown at 7 km/h, for which the yield decreased by 25 percent compared to other plots (Fig. 8).

Rice yield was affected by competition between plants as they formed during the three rice phases [39-40]. Plant competition affected carbohydrate, nitrogen, and water reserves in plants. In the vegetative phase, leaves and tillers are the source of assimilates that are to be used for the growth of the panicles and for the filling of the grain. Rice plants save 68 percent of the carbohydrates until flowering, and 26 percent invest in the grain filling. Thus, flowering reserves can increase yields from one to two ton/ha [41]. The grain weight is determined in the maturation phase, in which the carbon and nitrogen balance of the entire plant are very important [40]. Furthermore, the rice plant is very sensitive to drought from the initiation stage of the panicle to the spike; this can reduce yield and increase the sterility of the spikelet [27].

Frizzell et al. [42] found that reducing seed density to an optimal point is favorable for the yield. Reducing planting density involves fewer seeds per linear meter in each line. If the seeds are well calibrated and the seeder has an optimum sowing speed, it is possible to increase the normal spaces between plants and reduce direct competition. A high plant population and distribution have an effect on the tillering. In rice transplants (20cm by 20cm), one plant reaches 30 tillers (750 tillers/m^2), while at densities of 80-100kg/ha in mechanized sowing, 2 or 3 tillers per plant are obtained (1000 tillers/m^2: [40]). Frizzell et al. [42] also found that the change in spacing between 6 in (15.2) and 10 in (25.4 cm) sowing lines was not favorable for the yield. Therefore, optimum distribution of the seed should be sought in each specific site

with similar production potential in order to obtain the highest yield. In "El Espinal", Tolima, the 5.13 ± 0.18 km/h sowing speed achieved a greater yield, and it used resources appropriate that were favorable for the profitability of the crop. The previously mentioned sowing speed is close to the 5.1 km/h sowing speed that favored the wheat yield [14].

Furthermore, based on secondary information, it can be affirmed that the wear rate of the tool increases with sowing speed, which in turn affects costs. Operational factors that affect the wear of tillage tools are the working speed, depth, and type of soil [43]. In the experiment, work team qualitatively identified that the tractor-seeder assembly supports greater stresses in direct relation to the sowing speed since rice levee act like speed bumps (or speed breakers) during rice sowing. An increase in sowing speed affects bearings, hoses, and discs (discs open slots for fertilizer and seed placement). Archard and Hirst [44] developed a relationship for sliding wear, where wear rate (W) is proportional to applied normal load (F) and relative velocity (v). A 0.5 m/s increase in working speed increases draft by about one Newton for sandy soil [43]. This relationship was modified to Graff, L. [44], equation 6, when the constant of proportionality (k) and weighting constants (b and c) were added.

$$W = kF^b v^c \tag{6}$$

Experimentally, the researchers have demonstrated the wear that tillage implements have on function of speed. For a chisel plow, tools was founded that the increase in working speed affects weight loss of the tool on equal soils (clay loam and silty loam) [46]. The wear rate of rotary plow blades was tested with 141, 177, and 251 rpm, which led to an average mass losses of 0.67 g, 1.35 g, and 2.33 g, respectively [47]. Therefore, the discs wear rate increases with sowing speed, which in turn affects costs.

4. Conclusions

This research provides an antecedent to the effects of the increase in the mechanized sowing speed of rice.

The number of plants, plant weight in the three rice phases, dry matter, moisture, and yield presented statistically significant differences with respect to the sowing speed. There is a proportional relationship between the sowing speed and percentage of plants that are grouped in their roots (direct competition between plants for nutrients, water, and light), and number of non-productive tillers. The rate of fuel consumed, the uncovered seed, and the work field capacity all have a proportional relation to the sowing speed. The optimal sowing speed for the proper development and growth of the rice was 5 km/h, which better locates and distributes the seed and leads to plants with a greater number of panicles/m^2 and a better yield. In addition, a 5 km/h sowing speed had an acceptable field capacity and consumption of inputs.

The yield is the result of the interaction between various factors relating to physiology, genetics, climate, and management. A difference of 25 percent was found between yields and sowing supplies; therefore, the way of sowing seeds has an influence on the profitability of rice.

Acknowledgments

This project was partially funded by SENNOVA and COLCIENCIAS. The authors would like to give special thanks to Alvaro Montilla, Milton Alarcon, Marcolini Serrano, Ricardo Cervera, Querubin Godoy, Daniel Briceño, Jose Eduardo Mora, Nilson Alfonso Ibarra (FEDEARROZ EL Espinal), Marlon Stivel Cruz Ladino (Apprentice), Álvaro Arley Castaño (CORPOICA-Nataima), and the Technology in Agrobiotechnology, Technology in Agricultural Mechanization, and Technology in Agricultural Production apprentices. The experiments necessary for the development of this research were undertaken at "La Granja" Agricultural Center, "Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)" [National Apprenticeship Service], El Espinal, Tolima.

References

[1] Chica, J., Tirado, Y.C. y Barreto, J.M., Indicadores de competitividad del cultivo del arroz en Colombia y Estados Unidos. Revista de Ciencias Agrícolas, 33(2), pp. 16-31, 2016. DOI: 10.22267/rcia.163302.49

[2] Staggenborg, S.A., Taylor, R.K. and Maddux, L.D., Effect of planter speed and seed firmers on corn stand establishment. Applied Engineering in Agriculture, 20(5), pp. 573-580, 2004. DOI: 10.13031/2013.17457

[3] Nielsen, R.L., Planting speed effects on stand establishment and grain yield of corn. Journal of Production Agriculture, 8(3), pp. 391-393, 1995. DOI: 10.2134/jpa1995.0391

[4] Liu, W., Tollenaar, M., Stewart, G. and Deen, W., Impact of planter type, planting speed, and tillage on stand uniformity and yield of corn. Agronomy journal, 96(6), pp. 1668-1672, 2004. DOI: 10.2134/agronj2004.1668

[5] Bragachini, M., Méndez, A., Scaramuzza, F., Vélez, J. y Villarroel, D., Impacto de la velocidad y la profundidad de siembra sobre uniformidad en la emergencia y distribución de plantas en maíz, Congreso de valor agregado en origen, Córdoba, Argentina, 2012. [online]. [Accessed: April 14, 2015]. Available at: http://inta.gob.ar/mwg-

[6] Mello, A.J.R., Furlani, C.E.A., Silva, R.P., Lopes, A. and Borsatto, E.A., Produtividade de híbridos de milho em função da velocidade de semeadura. Eng. Agríc., Jaboticabal, 27(2), pp.479-486, 2007. DOI: 10.1590/S0100-69162007000300017.

[7] Mahl, D., Desempenho operacional de semeadora em função de mecanismos de corte, velocidade e solos, no sistema plantio direto do milho, PhD Dissertation, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Brasil, 2006. [online]. [Accessed: January 14 of 2017]. Available at: http://hdl.handle.net/11449/101735

[8] Duarth, M., Tavares, C.A., Foralosso, A.A., Viganó, J.P., Primo, M.A., Bitencourt, R., Ferreira, R. and de Lima, S., Análise da distribuição de sementes no rendimento da cultura do milho em função da velocidade de deslocamento da semeadora. Cascavel, 2(1), pp.71-79, 2011.

[9] Trogello, E., Modolo, A.J., Scarsi, M., Silva, C.L., Adami, P.F. and Dallacort, R., Manejos de cobertura vegetal e velocidades de operação em condições de semeadura e produtividade de milho. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 17(7), pp. 796-802, 2013. DOI: 10.1590/S1415-43662013000700015

[10] Celik, I.A. and Ozturk, T.R., Effects of various planters on emergence and seed distribution uniformity of sunflower. Way Applied Engineering in Agriculture, 23(1), pp. 57-61, 2007. DOI: 10.13031/2013.22331

[11] Tourn, M., Soza, E., Hidalgo, R. y Di Marco, R., Emergencia de soya de segunda sobre trigo en siembra directa: Efecto de la velocidad de avance. Agrotecnia, 11, pp. 30-36, 2003.

[12] Castela, M.A., Carvalho, T., Netto, Z., Marinho, E. and Soares, D., Influência da velocidade da semeadora na semeadura direta da soja. Enciclopédia biosfera, Conhecer, [online]. 10(19), pp. 1199, 2014. [Accessed: April 21, 2015]. Available at: http://www.conhecer.org.br/enciclop/2014b/AGRARIAS/influencia%20da%20velocidade.pdf.

[13] Soza, E., Agnes, D., Quiros, P. y Longinotti, M., Uniformidad de implantación de una sembradora experimental, desempeñándose a tres velocidades de avance. Revista de la Facultad de Agronomía y Ciencias Agroalimentarias, 4 (7), pp. 13-26, 2013.

[14] Klein, V.A., Massing, J.P., Junior, I.J.B., Marcolin, C.D. and Vieira, M.L., Velocidade de semeadura de trigo sob sistema plantio direto. Revista de Ciências Agroveterinárias, 7(2), pp.150-156, 2008.

[15] El-Khateeb H. and Khodeir M., Relation between different sowing methods and rice varieties on yield and water requirements. Farm machinery and power. J. Ag. Eng., 26(3), pp. 1092-1103, 2009.

[16] Blanco R.X. y Morales-Montaña, H., Siembra y establecimiento del cultivo de arroz, en: Memorias del curso internacional sobre el manejo del cultivo de arroz (1er, 2014, Ibagué, Colombia). [online]. [Accessed: January 21, 2015]. Available at: http://flar.org/ii-curso-internacional/memorias-curso-internacional/

[17] Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado SOSBAI. Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil (XXXI, 2016, Bento Gonçalves, Brasil). Reunião técnica da cultura do arroz irrigado. Bento Gonçalves, Brasil, agosto, 2016.

[18] Pineda. D., Aplicación de la tecnología para manejo eficiente de agua para riego. Arroz. 58(485), pp. 22-32, 2010.

[19] Adhikari, K., Carre, F., Toth, G. and Montanarella, L., Site specific land management: General concepts and applications. EUR, 23978, pp. 1-60, 2009. DOI: 10.2788/32619

[20] Castilla A., Morales F., Ramirez O. y Mayorga Z., Manejo agronómico por ambiente rumbo a una agricultura de precisión en el cultivo de arroz. Arroz, 63(519), pp. 38-43, 2015.

[21] Córdoba, M.A., Herramientas estadísticas para el monitoreo y uso de la variabilidad espacial del rendimiento y propiedades de suelo intralote. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2014.

[22] Córdoba, M., Bruno, C., Aguate, F., Tablada, M. y Balzarini, M., Análisis de la variabilidad espacial en los lotes agrícolas. Manual de buenas prácticas agrícolas. Ed. Balzarini M. Eudecor, Córdoba, Argentina, 2014

[23] Guzmán, P., AMTEC: 3 años continuos. Crecimiento hacia la competitividad arrocera. Arroz, 63, pp. 4-8, 2015.

[24] Pulver, E.L., Manejo estratégico y producción competitiva del arroz con riego en América Latina. Producción eco-eficiente del arroz en América Latina, Ed. CIAT, 350 P., 2010.

[25] Carmona, L. y Dotto, G., Programa de agronomía del FLAR, en Memorias del curso internacional sobre el manejo del cultivo de arroz. 1er, 2014, Ibagué, Colombia. [online]. [Accessed: January 21, 2015]. Available at: http://flar.org/ii-curso-internacional/memorias-curso-internacional/

[26] FEDEARROZ. Presentación del proyecto AMTEC de la Federación Nacional de Arroceros de Colombia (FEDEARROZ), 2014. [online]. [Accessed: January 21, 2015]. Available at: http://es.slideshare.net/cgiarclimate/fe-39197270

[27] Chaudhary, R.C., Nanda, J.S. y Tran. D.V., Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz. FAO, Roma, 2003.

[28] Medina, R.J.H., Extracción de nutrientes de la variedad Fedearroz 2000 bajo el ambiente de La Gloria, Cesar. Arroz, 61(504), pp. 4-12, 2013.

[29] Castilla, L.y Florez, E., SIFA: Sistema de fertilización en el cultivo de arroz a través de la web. Arroz, 62(509), pp. 4-15, 2014.

[30] Garcés, G. y Castilla, L., Uso del clorofilometro (índice de verdor) como estrategia en la fertilización nitrogenada en el cultivo. Arroz, 63(517), pp. 34-43, 2015.

[31] International Organization for Standardization-ISO. Sowing equipment – Test Methods - Part 1: Precision drills for sowing in lines. 7256/1, 1984.

[32] Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ). Manejo integrado del cultivo de arroz. Bogotá: PRODUMEDIOS, 2004.

[33] Elmore, R., How does planter speed affect plant spacing?. Published by Iowa State University, 2002. [online]. [Accessed: January 14, 2017]. Available at: http://crops.extension.iastate.edu/corn/production/management/planting/planter.html

[34] Rang, Z.W., Jagadish, S.V.K., Zhou, Q.M., Craufurd, P.Q. and Heuer, S., Effect of high temperature and water stress on pollen germination and spikelet fertility in rice. Environmental and Experimental Botany, 70(1), pp. 58-65, 2011. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.08.009

[35] Jagadish, S.V.K., Murty, M.V.R. and Quick, W.P., Rice responses to rising temperatures–challenges, perspectives and future directions. Plant, Cell & Environment, 38(9), pp. 1686-1698, 2015. DOI: 10.1111/pce.12430

[36] Yoshida, S. and Hasegawa, S., The rice root system: Its development and function. Drought resistance in crops with emphasis on rice. International Rice Research Institute, Manila. Philippines, 1982.

[37] Cavichioli, F.A., Velocidade de semeadura e profundidade da haste em sistema plantio direto de milho e soja. PhD Dissertation, Universidade Estadual Paulista, Brasil, 2014.

[38] Petro-Paez, E.E., Cuasquer, J.B., Garces, G. y Rebolledo, M.C., Identificación de las características morfológicas relacionadas con la estabilidad del rendimiento de arroz en dos regiones de Colombia, en la Conferência Internacional do Arroz para América Latina e Caribe XII, febrero 23-26, 2015, Porto Alegre, RS, Brasil. [online]. [Accessed: January 14, 2017]. Available at: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca

[39] Riveros, G. and Rodríguez, N., Producción eco-eficiente del arroz en América Latina, La fisiología de la planta y la productividad del cultivo. Ed. CIAT, 2014, pp. 100-113.

[40] Rebolledo, C., Morfología y crecimiento del arroz, fisiología del rendimiento, cambio climático y modelos de simulación, en Memorias del curso internacional sobre el manejo del cultivo de arroz. 1er, 2014, Ibagué, Colombia. [online]. [Accessed: January 21, 2015]. Available at: http://flar.org/ii-curso-internacional/memorias-curso-internacional/

[41] Cock, J.H. and Yoshida, S., Accumulation of 14 C-labelled carbohydrate before flowering and its subsequent redistribution and respiration in the rice plant. Japanese Journal of Crop Science, 41(2), pp. 226-234, 1972. DOI: 10.1626/jcs.41.226

[42] Frizzell, D.L., Wilson Jr, C.E., Norman, R.J., Slaton, N.A., Richards, A.L., Hill, J.L. and Runsick, S.K., Influence of row spacing and seeding rate on rice grain yield. BR Wells Rice Research Studies, AAES Research Series 550, pp. 270-275, 2006.

[43] Srivastava, A.K, Goering, C.E., Rohrbach, R.P. and Buckmaster, D.R., Soil tillage. In Engineering Principles of Agricultural Machines, 2nd Ed. ed. P. McCann, 2006, pp. 169-229.

[44] Archard, J.F. and Hirst, W., The wear of metals under unlubricated conditions. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 236(1206), pp. 397-410, 1956.

[45] Graff, L., Discrete element method simulation of wear due to soil-tool interaction, Doctoral dissertation, University of Saskatchewan. Saskatoon, Canadá, 2010.

[46] González-Sánchez, H.A., Desarrollo de un modelo para determinación de abrasividad de suelos con características vérticas, Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia, 2012.

[47] Pérez, W., González, H. y Toro, A., Desgaste abrasivo de cuchillas de arado rotativo en un suelo franco arenoso. DYNA, 77(162), pp. 105-114, 2010.

M. Gonzalez-Betancourt, was awarded his BSc. in Agricultural Eng. jointly from the Universidad Nacional de Colombia (Palmira campus) and the Universidad del Valle, Cali, Colombia in 2008. He received his PhD in Engineering with an emphasis on Hydraulic Resources in 2014 from the Universidad Nacional de Colombia, Medellin, Colombia. Between 2008 and 2010, he worked at the Hydraulics Laboratory at the Universidad del Valle. Since 2009 he has been associated with the Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos research group (Postgraduate program in the use of Hydraulic Resources) at the Universidad Nacional de Colombia. From 2014 to 2017, he has worked as a Colombia-based researcher subject to the terms of the joint agreement between the Organización de Estados Iberoamericanos (Organization of Ibero-American States), the Servicio Nacional de Aprendizaje (National Apprenticeship Service) and

COLCIENCIAS (Administrative Department of Science, Technology and Innovation). Currently, he is a Faculty in Tecnologico de Antioquia.
ORCID: 0000-0001-5485-8043

A.M. Alonso-Fernández, was awarded her BSc. in Biology from the Universidad del Tolima, Ibague, Colombia in 2008. She received her MSc. in Management and Conservation of Tropical Forests and Biodiversity in 2013 from the Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica. From 2007 to 2009 she was a student-researcher in the Human Identification and Immunogenetics, research group at the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Between 2010 and 2011, she worked at the Genetics laboratory at the Universidad del Tolima. In 2013 she worked as a consultant at the German Corporation for International Cooperation for Ecuador. From 2014 to date she has worked as a researcher at the Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) and has an association with the SENAGROTIC research group.
ORCID: 0000-0001-9430-8775

Z.L. Mayorga-Ruíz, was awarded her BSc. in Agronomic Engineering from the Universidad del Tolima, Ibague, Colombia. Between 2014 and 2016, she worked at FEDEARROZ (National Rice Growers Federation) as technical assistant in Ibague, Colombia. Since 2016, she has worked as a researcher at the Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) and has an association with the SENAGROTIC research group.
ORCID: 0000-0003-0403-0082

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

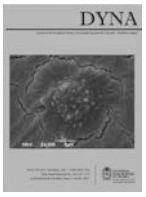
Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Cooperative primary user detection in multiband environments based on uniform sub-Nyquist sampling in sparse domain

Evelio Astaiza-Hoyos, Héctor Fabio Bermúdez-Orozco & Wilmar Yesid Campo-Muñoz

Facultad de Ingeniería, Grupo GITUQ, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. eastaiza@uniquindio.edu.co, hfbermudez@uniquindio.edu.co, wycampo@uniquindio.edu.co

Received: August 30th, de 2016. Received in revised form: Febrary 15th, 2017. Accepted: September 25th, 2017

Abstract
In this paper is proposed a novel cooperative Primary User (PU) detection algorithm in multiband environments (Wideband Spectrum Sensing - WBSS) based on Sub-Nyquist Sampling and Matrix Completion. In this way, addressing the problem of large number of samples to be processed when multiband signals are sampled at Nyquist rate or higher rates, seeking to improve the performance of wideband spectrum sensing in terms of detection probability. The simulation results show that the presented algorithm allows the improvement of the WBSS performance in terms of detection probability and the receiver's operational characteristics compared to other cooperative WBSS algorithms based on Sub-Nyquist sampling.

Keywords: Matrix completion; Sub-Nyquist sampling; detection probability; wideband spectrum sensing; primary user.

Detección cooperativa de usuarios primarios en entornos multibanda basado en muestreo sub-Nyquist uniforme en el dominio disperso

Resumen
En este artículo se propone un nuevo algoritmo cooperativo de detección de usuarios primarios (PU) en entornos multibanda (Sensado de Espectro de Banda Ancha - WBSS) basado en muestreo Sub-Nyquist y compleción de matrices. Así mismo se propone una matriz de muestreo uniforme para la señal multibanda en el dominio disperso. Abordando de esta forma, el problema del gran número de muestras a procesar cuando se realiza el muestreo de señales multibanda a tasa iguales o superiores a la tasa de Nyquist, buscando mejorar el desempeño del sensado de espectro de banda ancha en términos de la probabilidad de detección. Los resultados de simulación permiten evidenciar que el algoritmo propuesto mejora el desempeño del sensado en función de la probabilidad de detección y de las características operacionales del receptor con respecto a otros algoritmos de sensado de espectro de banda ancha cooperativo basados en muestreo Sub-Nyquist.

Palabras clave: Compleción de matrices; muestreo Sub-Nyquist; probabilidad de detección; sensado de espectro de banda ancha; usuarios primarios.

1. Introducción

Recientemente en las áreas de procesamiento digital de señales y comunicaciones inalámbricas, se han realizado una gran cantidad de investigaciones que abordan el problema del sensado de espectro en entornos multibanda. Donde un ámbito importante de aplicación es en los sistemas de Radio Cognitivo (CR) [1], en estos, la función de sensado de espectro (SS) cumple una tarea clave en la identificación de porciones de espectro no utilizado (Espacios en blanco - WS) por los usuarios que poseen los derechos de uso del espectro (Usuarios Primarios - PU). Este problema es mayor cuando la función de SS requiere identificar los WS presentes en un entorno multibanda, debido a la gran cantidad de muestras a procesar por el dispositivo de radio cognitivo (CRD), dadas las altas tasas de muestreo requeridas, incrementando el tiempo de sensado y la potencia consumida por el CRD [2]. Por ello, en los últimos años, basados en la idea de una

How to cite: Astaiza-Hoyos, E., Bermúdez-Orozco, H.F. and Campo-Muñoz, W.Y., Detección cooperativa de usuarios primarios en entornos multibanda basado en muestreo sub-Nyquist uniforme en el dominio disperso DYNA, 84(203), pp. 110-117, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

ocupación dispersa del canal de comunicaciones en escenarios multibanda (i.e. pocas bandas de frecuencia ocupadas y múltiples disponibles), se han trabajado diversidad de propuestas basadas en Sensado Compresivo (CS) [3,4], el cual proporciona una manera eficiente de procesar señales dispersas, es decir, que se pueden aproximar por una expansión en términos de una base adecuada, que solo tiene algunos términos significativos, esta característica permite realizar el sensado de espectro de banda ancha digitalizando la señal multibanda a tasas inferiores a la tasa de Nyquist.

En el escenario de CR, los CRD requieren efectuar permanentemente la detección de actividad de los PU en el canal de comunicaciones de la banda de interés bajo condiciones de Relación Señal a Ruido (SNR) tan bajas como sea posible (i.e. del orden de -20dB para el estándar IEEE 802.22) [5]. En este contexto, uno de los principales retos que se enfrentan en CR es la implementación del sensado de espectro de banda ancha, minimizando la tasa de muestreo requerida, garantizando alta probabilidad de detección y bajas probabilidades de omisión de detección y falsa alarma en condiciones de baja SNR. Por lo anterior, buscando mejorar el desempeño del SS de banda ancha basado en muestreo Sub-Nyquist en términos de las probabilidades mencionadas, se propone explotar la diversidad espacial mediante la cooperación de los distintos CRD en una misma región.

Por lo anterior, en este artículo se propone un nuevo método cooperativo de sensado de espectro de banda ancha, basado en CS y compleción de matrices, que permite reducir la cantidad de muestras a ser procesadas por cada CRD, minimiza la carga de información en los enlaces con el Centro de Fusión (FC) (centro de decisión cooperativo), y mejora el desempeño en términos de detección y características operacionales del receptor comparado con algoritmos similares en el estado del arte [6-9]. Para realizar la operación de muestreo, se propone una matriz uniforme en el dominio disperso; posteriormente se realiza la detección de energía por sub-banda con base en la estimación de la señal recibida en el dominio disperso mediante el algoritmo *Singular Value Thresholding* (SVT) [10], luego se toman las decisiones locales de ocupación de espectro por parte de cada CRD y son transmitidas al FC, el cual mediante la aplicación de regla OR a las decisiones locales toma la decisión final de ocupación espectral.

En (Cohen et al. 2015) se presenta un algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo, el cual se basa en dos algoritmos de recuperación del soporte conjunto de la señal multibanda, a partir de las matrices de sensado y de mediciones de cada CRD; esto implica una gran carga de información en los enlaces de comunicación entre los CRD y el FC. En [7] se propone un algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo basado en el algoritmo de Maximización de la Expectativa (EM) propuesto en [11], para realizar la estimación y detección conjunta de la ocupación espectral en la multibanda, el algoritmo propuesto opera a una tasa de muestreo igual o superior a la tasa de Nyquist, lo cual implica que los CRD deban procesar una gran cantidad de muestras, incrementando los tiempos de sensado y la potencia consumida. En [8] se propone un algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo basado en muestreo sub-Nyquist multitasa, para el cual se analiza su desempeño en términos de los límites teóricos. En [9] se propone un algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo basado en CS de dos etapas, en la primera se efectúa la reconstrucción de la señal multibanda a partir de las mediciones de cada CRD y en la segunda se realiza la eliminación de ruido, para posteriormente tomar la decisión de ocupación espectral; esto implica una gran carga de información en los enlaces de comunicación entre los CRD y el FC.

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: En la sección II se plantea el modelo del Sistema, en la sección III se describe el método propuesto para realizar el sensado de espectro cooperativo de banda ancha basado en muestreo sub-Nyquist, en la sección IV se presenta la evaluación del desempeño del método propuesto contrastando las métricas de evaluación contra las obtenidas por los métodos de sensado de espectro cooperativo en el estado del arte, y finalmente, en la sección V se presentan las conclusiones del estudio realizado.

2. Modelo del sistema

Considerando un conjunto de $\boldsymbol{q}$ dispositivos de CR que operan sobre una multibanda (licenciada) con un ancho de banda total de $\boldsymbol{B\ Hz}$, el cual se encuentra dividido en $\boldsymbol{k}$ sub-bandas no traslapadas de igual ancho de banda $\boldsymbol{b}$, equivalente a $\boldsymbol{B/k\ Hz}$ por canal como se muestra en la Fig. 1.

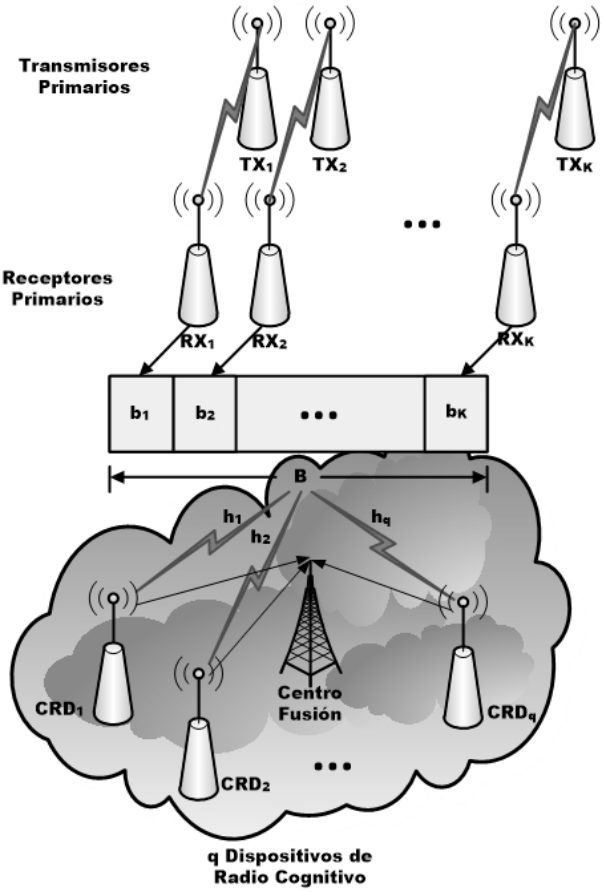


Figura 1. Escenario Sensado de Espectro de Banda Ancha Cooperativo. Fuente: Los autores

Asumiendo que las muestras de la señal multibanda $\boldsymbol{x}_{i,j}(n)$ son variables aleatorias independientes que siguen una distribución normal de media cero y varianza σ_s ($\mathcal{N}(0,\sigma_s)$), presunción que es válida para cualquier señal multibanda en la cual cada portadora se modula independientemente por flujos de datos; y asumiendo que las muestras de ruido $\boldsymbol{w}_{i,j}(n)$ en cada CRD son variables aleatorias normalmente distribuidas, independientes, de media cero y varianza σ_n, ($\mathcal{N}(0,\sigma_n)$), la señal recibida por el i-ésimo CRD en la j-ésima sub-banda con $j = 1,2,..,k$ puede expresarse como se indica en la ec.(1).

$$\boldsymbol{x}_{i,j}(n) = h_{i,j}\boldsymbol{s}_i(n) + \boldsymbol{w}_{i,j}(n) \quad (1)$$

donde $\boldsymbol{x}_{i,j}(n)$ es la n-ésima componente de la señal recibida por el i-ésimo CRD con $i = 1,2,..,q$, en la j-ésima sub-banda con $j = 1,2,..,k$, $h_{i,j}$ representa la respuesta del canal para el i-ésimo CRD en la j-ésima sub-banda, $\boldsymbol{s}_i(n)$ es la n-ésima componente de la señal transmitida por el j-ésimo PU sobre la j-ésima sub-banda y recibida por el i-ésimo CRD y $\boldsymbol{w}_{i,j}(n)$ es la n-ésima componente del ruido en la j-ésima sub-banda percibido por el i-ésimo CRD.

El problema de sensado de espectro en la j-ésima sub-banda, puede formularse como un problema de comprobación de hipótesis estadística, en el cual, se debe escoger entre la hipótesis $\mathcal{H}_{0,j}$ la cual indica que la j-ésima sub-banda se encuentra disponible, y la hipótesis $\mathcal{H}_{1,j}$ la cual indica que la j-ésima sub-banda se encuentra ocupada, lo anterior puede expresarse de acuerdo a la ec.(2).

$$\begin{cases} \mathcal{H}_{0,j}: \boldsymbol{x}_j = \boldsymbol{w}_j \\ \mathcal{H}_{1,j}: \boldsymbol{x}_j = h_j\boldsymbol{s}_j^* + \boldsymbol{w}_j \end{cases} \quad (2)$$

donde $\boldsymbol{x}_j \in \mathbb{R}^p$ es el vector de la señal recibida por el i-ésimo CRD en la j-ésima sub-banda, con p igual a la cantidad de muestras tomadas por sub-banda, $\boldsymbol{w}_j \in \mathbb{R}^p$ es el vector que representa las componentes de ruido blanco presente en la j-ésima sub-banda, $h_j \in \mathbb{R}$ es el vector que representa la respuesta del canal en la j-ésima sub-banda, finalmente $\boldsymbol{s}_j^* \in \mathbb{R}^p$ es el vector que representa la señal transmitida por el j-ésimo PU sobre la j-ésima sub-banda, donde el superíndice * denota transpuesto.

3. Método propuesto de sensado de espectro cooperativo de banda ancha

El método de sensado de espectro cooperativo de banda ancha propuesto se ilustra en la Fig. 2. Inicialmente la señal multibanda $\boldsymbol{x}(t)$ es recibida por cada uno de los CRD, la versión en cada CRD se denota por $\boldsymbol{x_i}(t)$ con $i = 1,2,..,q$, posteriormente la señal captada por cada CRD se muestrea con la matriz de muestreo uniforme en el dominio disperso descrita en el literal *A* de esta sección, donde la operación de muestreo se implementa a través de la matriz de muestreo $\boldsymbol{A} \in \mathbb{R}^{m\times n}$, donde $m < n$ con n que representa la cantidad de muestras de la señal cuando se realiza el muestreo a la tasa de Nyquist y m representa la cantidad de muestras Sub-Nyquist tomadas, obteniendo el vector de muestras $\boldsymbol{y_i} \in \mathbb{R}^m$, donde $\boldsymbol{y_i} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x_i}$. Posteriormente, el bloque de extracción de características realiza la estimación de la aproximación dispersa del vector $\boldsymbol{x_i}(t)$ que se representa como $\boldsymbol{x_i}[n] \in \mathbb{R}^n$, así mismo efectúa el cálculo de la energía por sub-banda de la señal estimada. Luego, en el bloque de clasificación y detección se realiza la detección de WS en la multibanda basado en la energía en cada sub-banda de cada vector de señal estimado en cada CRD $\boldsymbol{x_i}[n] \in \mathbb{R}^n$, finalmente, se transmiten las decisiones locales de cada CRD al FC, el cual toma la decisión de ocupación final en la multibanda mediante la aplicación de la regla OR entre las decisiones parciales obtenidas en el paso anterior e informa la decisión final a los CRD a través del canal de control, el cual se asume libre de errores.

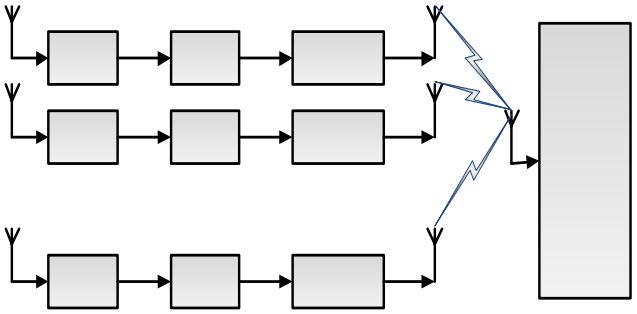


Figura 2. Diagrama en Bloques CRDs y Centro Fusión – Método Cooperativo Propuesto.
Fuente: Los autores

$$\begin{bmatrix} e^{i\frac{\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{3\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{5\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{7\pi}{10}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{6\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{12\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{18\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{24\pi}{10}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{i\frac{5\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{15\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{25\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{35\pi}{10}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{14\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{28\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{42\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{56\pi}{10}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura. 3. Matriz de Muestreo Uniforme en el Dominio Disperso Propuesta. Para $n = 10$ y Factor de Sub-muestreo 4.
Fuente: Los autores

A continuación se describen las funciones realizadas por los bloques ilustrados en la Fig.2.

3.1. Muestreo

El muestreo de la señal multibanda $x_i(t)$, se realiza mediante la matriz de muestreo A definida como se ilustra en la Fig. 3.

La cual cumple con el teorema 1.1 propuesto en [12]. Del proceso de muestreo sub-Nyquist, se obtienen muestras de la forma ilustrada por la ec.(3).

$$\boldsymbol{y_i} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x_i} \quad (3)$$

Donde $\boldsymbol{A}$ es la matriz de sensado de tamaño $m \times n$, $\boldsymbol{y_i} \in \mathbb{R}^m$ es el vector de mediciones y $\boldsymbol{x_i} \in \mathbb{R}^n$ es el vector que representa la señal multibanda $k-$dispersa [4], por lo tanto, las entradas de $\boldsymbol{y_i}$ son las muestras sub-Nyquist de $\boldsymbol{x_i}$.

3.2. Extracción de características

La característica de la señal que se utiliza para realizar la operación de sensado de espectro es la energía por sub-banda, razón por la cual, el enfoque utilizado se basa en la estimación de la señal dispersa presente en la multibanda sensada. Abordando problema de encontrar la solución dispersa de $\boldsymbol{y_i} = \boldsymbol{A x_i}$, utilizando compleción de matrices se debe resolver el problema de optimización planteado en la ec. (4)

$$\min_{\boldsymbol{x_i}} \|\boldsymbol{x_i}\|_* \quad sujeto\ a\ y_{i,j} = x_{i,j} \qquad (4)$$

Donde $\|\boldsymbol{x_i}\|_*$ representa la norma nuclear de $\boldsymbol{x_i}$, $y_{i,j}$ representa la j-ésima entrada del vector de muestras del i-ésimo CRD y $x_{i,j}$ representa la j-ésima entrada del vector de la señal multibanda del i-ésimo CRD. Para resolver el problema planteado en la ec. (4) se utiliza el algoritmo SVT propuesto en [10], obteniendo de esta manera la estimación $\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}$ de la señal presente en el canal a partir de las muestras $\boldsymbol{y_i}$.

3.3. Clasificación y detección

Para realizar la detección de energía para cada sub-banda y para cada CRD, se compara la energía de la señal recibida con un umbral de detección, decidiendo de esta forma la ocupación de una sub-banda. Por lo tanto la energía presente en cada sub-banda puede calcularse de acuerdo a la ec. (5).

$$\mathcal{E}_{i,j}(f) = |h_i|^2 \sum_{Sb_{i,j}} |\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}[f]|^{\boldsymbol{2}} \qquad (5)$$

Donde $\mathcal{E}_{i,j}$ representa la energía en la sub-banda j-ésima del i-ésimo CRD sobre una secuencia de N muestras, $Sb_{i,j}$ representa la sub-banda j-ésima del i-ésimo CRD, h_i representa la respuesta del canal del i-ésimo CRD y $\widehat{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}[f]$ representa la señal estimada en el canal del i-ésimo CRD. Luego, si la energía en la sub-banda j-ésima del i-ésimo CRD es mayor al umbral de decisión $\mathcal{T}_{h_{i,j}}$ ($\mathcal{E}_{i,j} > \mathcal{T}_{h_{i,j}}$) la decisión tomada es $\mathcal{H}_{1,j}$ (sub-banda ocupada) en caso contrario se decide $\mathcal{H}_{0,j}$ (sub-banda libre - WS).

Las probabilidades de detección P_{d_j}, omisión de detección P_{md_j} y falsa alarma P_{f_j} en la sub-banda j-ésima se definen como se indica en las ecs. (6), (7) y (8).

$$P_{d_j} = P\left(\mathcal{H}_{1,j} \middle| \mathcal{H}_{1,j}\right) \qquad (6)$$

$$P_{md_j} = P\left(\mathcal{H}_{0,j} \middle| \mathcal{H}_{1,j}\right) = 1 - P_{d_j} \qquad (7)$$

$$P_{f_j} = P\left(\mathcal{H}_{1,j} \middle| \mathcal{H}_{0,j}\right) \qquad (8)$$

Entendiendo como probabilidad de detección a aquella probabilidad de detección correcta de ocupación de una sub-banda o de presencia de señal de un PU en una sub-banda (decidir $\mathcal{H}_{1,j}$ cuando $\mathcal{H}_{1,j}$ es verdadero), por probabilidad de falsa alarma se entiende la probabilidad asociada a detectar señal de un PU cuando en una sub-banda realmente hay un espacio en blanco (decidir $\mathcal{H}_{1,j}$ cuando $\mathcal{H}_{0,j}$ es verdadero) y por probabilidad de omisión de detección se entiende aquella probabilidad asociada a detectar un espacio en blanco cuando en una sub-banda hay presencia de señal de un PU (decidir $\mathcal{H}_{0,j}$ cuando $\mathcal{H}_{1,j}$ es verdadero).

De acuerdo al teorema del límite central [13], si el número de muestras es lo suficientemente grande (≥ 30 en la práctica), las estadísticas (media y varianza) de $\mathcal{E}_{i,j}$ asociadas a las hipótesis $\mathcal{H}_{0,j}$ y $\mathcal{H}_{1,j}$ son normalmente distribuidas asintóticamente y dadas por las ecs. (9) y (10).

$$E\left(\mathcal{E}_{i,j}\right) = \begin{cases} 2N\sigma_{n_{i,j}}^2 & : \mathcal{H}_{0,j} \\ (SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^2 & : \mathcal{H}_{1,j} \end{cases} \qquad (9)$$

$$Var\left(\mathcal{E}_{i,j}\right) = \begin{cases} 2N\sigma_{n_{i,j}}^4 & : \mathcal{H}_{0,j} \\ 2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^4 & : \mathcal{H}_{1,j} \end{cases} \qquad (10)$$

Con $\sigma_{n_{i,j}}^2$ que denota la energía del ruido en el i-ésimo CRD y j-ésima sub-banda y $SNR_{i,j}$ denota la relación señal a ruido del i-ésimo CRD en la j-ésima sub-banda.

Luego, las probabilidades de detección y falsa alarma del i-ésimo CRD en la j-ésima sub-banda pueden expresarse como se indica en las ecs. (11) y (12).

$$P_{d_{i,j}} = Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - E\left(\mathcal{E}_{i,j} \middle| \mathcal{H}_{1,j}\right)}{\sqrt[2]{Var\left(\mathcal{E}_{i,j} \middle| \mathcal{H}_{1,j}\right)}}\right] = Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt[2]{2(2SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^4}}\right] \qquad (11)$$

$$P_{f_{i,j}} = Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - E\left(\mathcal{E}_{i,j} \middle| \mathcal{H}_{0,j}\right)}{\sqrt[2]{Var\left(\mathcal{E}_{i,j} \middle| \mathcal{H}_{0,j}\right)}}\right] = Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - 2N\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt[2]{2N\sigma_{n_{i,j}}^4}}\right] \qquad (12)$$

Donde

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \qquad (13)$$

Por lo tanto, el umbral de decisión $\mathcal{T}_{h_{i,j}}$ para un valor específico de $P_{f_{i,j}}$ está dado por (14).

$$\mathcal{T}_{h_{i,j}} = Q^{-1}\left(P_{f_{i,j}}\right) \sqrt[2]{2N\sigma_{n_{i,j}}^4} + 2N\sigma_{n_{i,j}}^2 \qquad (14)$$

3.4. Decisión cooperativa

Posteriormente, se procede a decidir de forma conjunta la ocupación por sub-banda mediante regla OR entre las decisiones preliminares de cada CRD. De acuerdo a la regla de decisión OR, cuando al menos en una de las q versiones de la sub-banda (una versión por CRD) se detecta ocupación, la decisión final es que la sub-banda se encuentra ocupada. Por lo tanto las probabilidades de detección y falsa alarma por sub-banda finales se expresan de acuerdo a las ecs. (15) y (16).

$$P_{d\,j} = 1 - \prod_{i=1}^{q}\left(1 - P_{d\,i,j}\right) \quad (15)$$

$$P_{f\,j} = 1 - \prod_{i=1}^{q}\left(1 - P_{f\,i,j}\right) \quad (16)$$

Luego, las probabilidades de detección $P_{d\,j}$, omisión de detección $P_{md\,j}$ y falsa alarma $P_{f\,j}$ en la sub-banda j-ésima se definen de acuerdo a las ecs. (17), (18) y (19).

$$P_{d\,j} = 1 - \prod_{i=1}^{q}\left(1 - Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt[2]{2(2SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^4}}\right]\right) \quad (17)$$

$$P_{md\,j} = \prod_{i=1}^{q}\left(1 - Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt[2]{2(2SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^4}}\right]\right) \quad (18)$$

$$P_{f\,j} = 1 - \prod_{i=1}^{q}\left(1 - Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - 2N\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt[2]{2N\sigma_{n_{i,j}}^4}}\right]\right) \quad (19)$$

Finalmente, se propone calcular las probabilidades de las probabilidades de detección P_d, omisión de detección P_{md} y falsa alarma P_f de la multibanda de acuerdo a las ecs. (20), (21) y (22).

$$P_d = \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K}\left\{1 - \prod_{i=1}^{q}\left(1 - Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt[2]{2(2SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^4}}\right]\right)\right\} \quad (20)$$

$$P_{md} = \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K}\left\{\prod_{i=1}^{q}\left(1 - Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt[2]{2(2SNR_{i,j}+N)\sigma_{n_{i,j}}^4}}\right]\right)\right\} \quad (21)$$

$$P_f = \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K}\left\{1 - \prod_{i=1}^{q}\left(1 - Q\left[\frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - 2N\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt[2]{2N\sigma_{n_{i,j}}^4}}\right]\right)\right\} \quad (22)$$

3.1. Algoritmo propuesto

Para implementar el sensado de espectro de acuerdo al proceso descrito en los literales A, B, C y D, se propone el algoritmo que se ilustra en la Fig. 4, donde los parámetros de entrada del algoritmo son: el conjunto de entradas observadas $\boldsymbol{Om}$ de acuerdo a la matriz de sensado $\boldsymbol{A}$, el vector de muestras del canal por cada CRD $\boldsymbol{y_i}$, el ancho de banda total de la multibanda B, el ancho de banda de cada sub-banda b, el tamaño del vector de muestras m y el tamaño del vector señal n , parámetro de objetivo funcional tau definido en

	Algoritmo: CWBSS
1	Input: $\boldsymbol{Om}, \boldsymbol{y_i}, n, B, b, tau, delta$
2	Output: $\boldsymbol{ch}$
3	Var: $\boldsymbol{Psb_i}$ % Potencia por Sub-banda
4	Inicio
5	$Cont1 = 0$
6	$Cont2 = 1$
7	$k = B/b$
8	$K = \left(\frac{m}{n}\right)k$
9	Para $i = 1$ hasta q
10	$\boldsymbol{x_i} \leftarrow SVT(n, \boldsymbol{Om}, \boldsymbol{y_i}, tau, delta, K)$
11	$Cont2 = Cont2 + 1$
12	Para j= 1 hasta k
13	$\boldsymbol{Psb_i}(j,(Cont1+1)) \leftarrow suma(\,(Cont1+1), \boldsymbol{x_i}\left(Cont1 * \frac{n}{k}\right)\ hasta\ \boldsymbol{x_i}((Cont1+1),(Cont1+1)*n/k))$
14	Si $\boldsymbol{Psb_i}(j,(Cont1+1))$>0 luego
15	$\boldsymbol{ch_sb_i}(j,(Cont1+1)) \leftarrow 1$
16	Sino
17	$\boldsymbol{ch_sb_i}(j,(Cont1+1)) \leftarrow 0$
18	Fin Si
19	$Cont1 = Cont1 + 1$
20	Fin Para
21	Fin Para
22	Para $l = 1$ hasta k
23	$\boldsymbol{ch}(l) = \boldsymbol{ch_sb_i}(l,1)\ or\ \boldsymbol{ch_sb_i}(l,2)\ or\ \ldots\ or\ \boldsymbol{ch_sb_i}(l,q)$
24	Fin para
25	Retorna $\boldsymbol{ch}$

Figura 4. Algoritmo de Sensado de Espectro de Banda Ancha Cooperativo CWBSS.
Fuente: Los autores

[10] y tamaño del paso definido en [10] (línea 1); el algoritmo propuesto retorna el vector de sub-bandas ocupadas y disponibles en la multibanda $\boldsymbol{ch}$ por cada CRD (línea 2); se utiliza la variable auxiliar $\boldsymbol{Psb}$ para almacenar la potencia por sub-banda de la multibanda detectada por cada CRD (línea 3). El proceso de sensado de espectro inicia calculando el número de sub-bandas en la multibanda (línea 7) y el número de componentes significativas de la multibanda (línea 8), posteriormente, se estima la señal recibida por cada CRD mediante la función *SVT* utilizando el algoritmo de compleción de matrices SVT propuesto en [10] (línea 10), posteriormente, se calcula la potencia estimada por sub-banda en cada CRD (líneas 13 a 21), finalmente se estima la presencia o no de señal en cada sub-banda utilizando la regla OR (líneas 22 a 24).

4. Resultados

En esta sección se analiza el desempeño del algoritmo propuesto en un escenario en el cual se presenta una señal multibanda compuesta por seis canales de 3.3MHz cada uno, los cuales aleatoriamente presentan ocupación, el objetivo es evaluar las condiciones bajo las cuales el algoritmo propuesto presenta un desempeño adecuado para el sensado de espectro, en comparación con el rendimiento de los algoritmos propuestos en [6-9].

Tabla 1.
Parámetros de Simulación.

Parámetro	Valor
Generación Señal Multibanda	
Ancho de Banda Señal Multibanda, BW	20MHz
Ancho de Banda por Canal, B	3.3MHz
Modulación Señal en Canal	16QAM
Tasa de Símbolos, Rs	2Msps
Factor de Roll Off Filtro Transmisión, ρ	0.5
Tasa Muestreo Nyquist, fs	40MHz
Número Muestras Señal Multibanda (Nyquist), n	2000
Frecuencias de Portadora, fc	3MHz, 6MHz, 9MHz, 12MHz, 15MHz y 18MHz
Muestreador Sub_Nyquist	
Número Muestras Señal Entrada, n	2000
Número Muestras Señal Entrada, m	100
Algoritmo de Sensado CWBSS	
Número de Usuarios Cooperativos, q	2

Fuente: Los autores

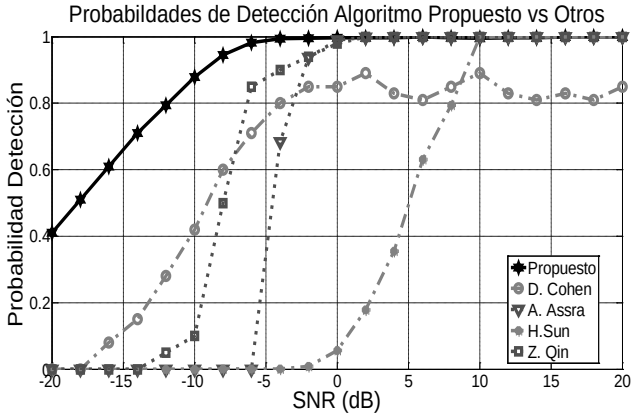


Figura 5. Desempeño Algoritmo Cooperativo Propuesto vs Otros Algoritmos de Sensado Cooperativo en Función de SNR.
Fuente: Los autores

4.1. Escenario y parámetros de simulación

En la implementación de la simulación del algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo propuesto, se genera una señal multibanda de acuerdo con los parámetros de simulación que se muestran en la Tabla 1.

4.2. Resultados de simulación, métricas, caracterización y comparación

Para evaluar el desempeño del algoritmo de sensado de espectro propuesto, se utilizan como métricas la probabilidad de detección, analizadas en función de la relación señal a ruido de la multibanda generada y la curva de operación del receptor (ROC), comparadas con las métricas obtenidas de los algoritmos propuestos en [6-9]; los resultados obtenidos se muestran en las Figs. 5 y 6.

En la Fig. 5 se observa el desempeño del algoritmo propuesto contra el desempeño de los algoritmos de sensado de espectro cooperativo de banda ancha propuestos en [6-9];

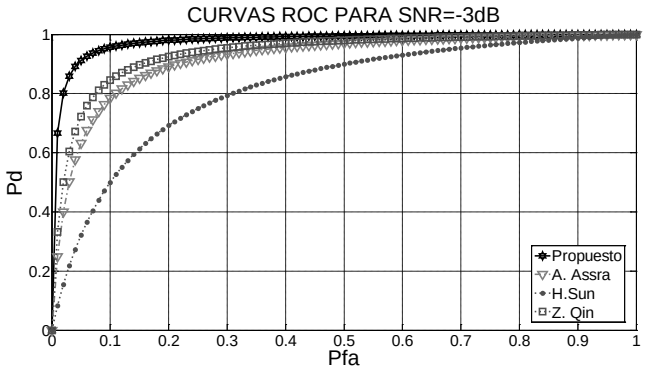


Figura 6. Curvas ROC para SNR = -3dB.
Fuente: Los autores

en la figura se puede apreciar que el desempeño de los algoritmos en [6-9] es inferior al alcanzado por el algoritmo propuesto, en función de la probabilidad de detección, de la misma forma se aprecia la probabilidad de detección para el algoritmo propuesto es aproximadamente igual a 1 para valores de SNR superiores a -5dB.

En la Fig. 6 puede observarse que el mejor desempeño en términos de las curvas de ROC es el correspondiente al algoritmo propuesto, esto debido a que el área bajo la curva del algoritmo propuesto es la mayor, lo cual indica la capacidad del algoritmo de propuesto de identificar acertadamente los WS.

Como se aprecia de igual manera en la Fig. 6, el algoritmo con peor desempeño es el propuesto por Sun en [8] , ya que la curva ROC cubre una menor área que la correspondiente a los demás algoritmos. Considerando que los resultados ilustrados en la Fig. 6 corresponden a las curvas ROC de los algoritmos contrastados a una SNR de -3dB, se evidencia de nuevo que el algoritmo propuesto mejora significativamente el desempeño de los otros algoritmos en condiciones de baja SNR.

En la Fig. 7 se ilustra el desempeño del algoritmo propuesto en función de la probabilidad de detección contra la SNR de acuerdo al número de CRDs que cooperan. Aquí puede apreciarse que en la medida que la cantidad de CRDs que cooperan es mayor, la SNR a la cual se alcanza una probabilidad de detección aproximadamente igual a uno disminuye, alcanzándose el desempeño objetivo en CR para el estándar 802.22 con una cantidad aproximada de 20 CRDs cooperantes.

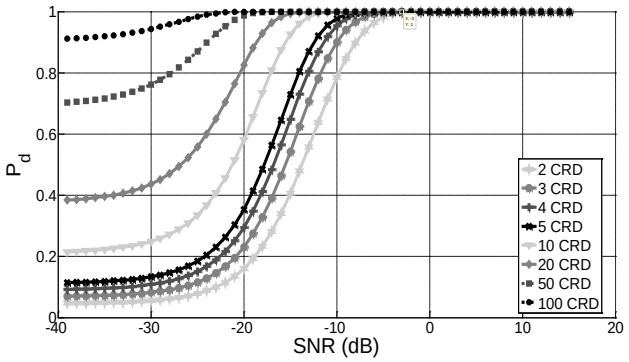


Figura 7. Probabilidad de Detección Contra SNR en Función del Número de CRDs Cooperantes (Sub-bandas=6, Sub-muestreo=10).
Fuente: Los autores

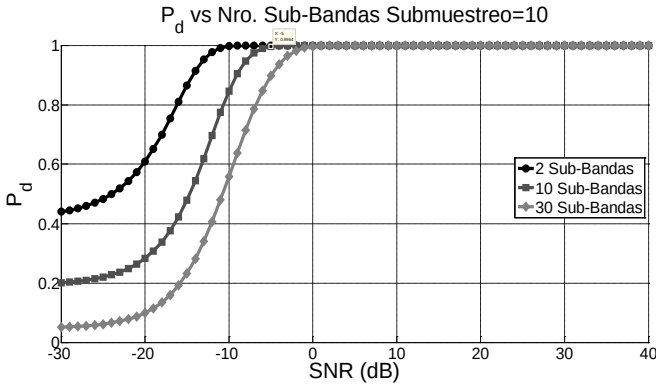


Figura 8. Probabilidad de Detección Contra SNR en Función del Número de Sub-Bandas en la Multibanda (CRDs Cooperantes =3, Sub-muestreo=10).
Fuente: Los autores

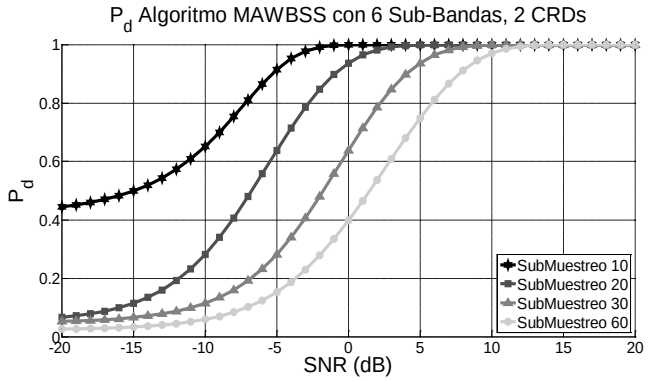


Figura 9. Probabilidad de Detección Contra SNR en Función del Factor de Sub-Muestreo (Sub-bandas=6, CRDs Cooperantes =2).
Fuente: Los autores

En la Fig. 8 se muestra el desempeño del algoritmo propuesto en función de la probabilidad de detección contra la SNR de acuerdo al número de sub-bandas definidas en la multibanda sensada. En esta, es posible evidenciar que en la medida que existe una mayor cantidad de sub-bandas en la multibanda, disminuye el desempeño del algoritmo.

En la Fig. 9 se puede evidenciar el impacto que tiene el factor de sub-muestreo en el desempeño del algoritmo. En esta figura se puede apreciar que a menor factor de sub-muestreo, mejor es el desempeño del algoritmo propuesto; alcanzándose una probabilidad de detección aproximadamente igual a 1 para una SNR de -3dB con un factor de sub-muestreo igual a 10, en un escenario donde la multibanda está conformada por 12 sub-bandas y 2 CRDs cooperantes.

5. Conclusiones

En este artículo se propone un novedoso algoritmo de sensado de espectro cooperativo de banda ancha en dispositivos de CR basado en compleción de matrices, demostrándose que mediante el algoritmo propuesto es posible realizar la función de sensado de espectro de banda ancha utilizando una cantidad de muestras menor a las obtenidas a la tasa de Nyquist, alcanzando un desempeño superior a otros algoritmos de sensado de espectro cooperativo propuestos en el estado del arte. Así mismo permite realizar la función de sensado de espectro de banda ancha de forma eficiente y cumpliendo con los requerimientos de CR respecto a detección confiable en condiciones de baja SNR.

Referencias

[1] Mitola III, J., Cognitive radio an integrated agent architecture for software defined radio, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2000.

[2] Mishali, M., Eldar, Y.C., Dounaevsky, O. and Shoshan, E., Xampling: analog to digital at sub-nyquist rates. IET Circuits Devices & Systems, 5(1), pp. 8-20, 2011. DOI:10.1049/iet-cds.2010.0147.

[3] Baraniuk, R.G., Compressive sensing. IEEE Signal Processing Magazine, 24(4): pp. 118-121, 2007.

[4] Astaiza, E., Bermudez, H.F. and Campo, W.Y., Efficient wideband spectrum sensing based on compressive sensing and multiband signal covariance. IEEE Latin America Transactions, 15(3), pp. 393-399, 2017. DOI: 10.1109/TLA.2017.7867167.

[5] IEEE P802.22b/D5, April 2015. IEEE Draft standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems wireless regional area networks (WRAN)–Specific requirements Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands Amendment: Enhancement for Broadband Services and Monitoring Applications, pp. 1-312, may 2015.

[6] Cohen, D., Akiva, A., Avraham, B. and Eldar, Y.C., Centralized cooperative spectrum sensing from sub-nyquist samples for cognitive radios. IEEE, pp. 7486-7491. 2015. DOI: 10.1109/ICC.2015.7249523.

[7] Assra, A., Yang, J. and Champagne, B., An EM Approach for cooperative spectrum sensing in multiantenna CR networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(3), pp. 1229-1243. DOI: 10.1109/TVT.2015.2408369.

[8] Sun, H., Nallanathan, A., Cui, S. and Wang, C.-X., Cooperative wideband spectrum sensing over fading channels. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(3), pp. 1382-1394, 2016. DOI: 10.1109/TVT.2015.2407700.

[9] Qin, Z., Gao, Y., Plumbley, M.D. and Parini, C.G., Wideband spectrum sensing on real-time signals at sub-nyquist sampling rates in single and cooperative multiple nodes. IEEE Transactions on Signal Processing, 64(12), pp. 3106-3117, 2016. DOI: 10.1109/TSP.2015.2512562.

[10] Cai, J.-F., Candés, E.J. and Shen, Z., A singular value thresholding algorithm for matrix completion. SIAM Journal on Optimization, 20(4), pp. 1956-1982, 2010. DOI: 10.1137/080738970.

[11] Guo, Q. and Huang, D., EM-Based joint channel estimation and detection for frequency selective channels using gaussian message passing. IEEE Transactions on Signal Processing, 59(8), pp. 4030-4035, 2011. DOI: 10.1109/TSP.2011.2153201.

[12] Recht, B., A simpler approach to matrix completion. The Journal of Machine Learning Research, 12, pp. 3413-3430, 2011.

[13] Gnedenko, B.V. and Kolmogorov, A.N., Limit distributions for sums of independent random variables. Reading, Mass, Addison-Wesley, 1954.

E. Astaiza-Hoyos, es MSc. en Ingeniería, área de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia (2008), Ing. en Electrónica de la Universidad del Cauca, Colombia (1998). Actualmente candidato a Dr. en ciencias de la Electrónica. Profesor asociado en la Universidad del Quindío, Colombia, programa de Ingeniería Electrónica, Investigador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad del Quindío – GITUQ. Áreas de interés: Comunicaciones inalámbricas, sensado de espectro.
ORCID: 0000-0003-2706-0962.

H.F. Bermúdez-Orozco, es MSc. en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia (2010), Ing. en Electrónica de la Universidad del Cauca, Colombia (2000). Actualmente candidato a Dr. en Ingeniería Telemática. Profesor asociado en la Universidad del Quindío, Colombia, programa de Ingeniería Electrónica, Coordinador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad del Quindío – GITUQ. Áreas de interés: Comunicaciones inalámbricas, sistemas radiantes y propagación, modelado de tráfico de servicios telemáticos.
ORCID: 0000-0002-8101-3764

W.Y. Campo-Muñoz, es Ph.D. en Ingeniería Telemática de la Universidad del Cauca, Colombia, (2014), MSc. en Ingeniería, Área Telemática, Universidad del Cauca (2009), Ing. en Electrónica de la Universidad del Cauca, Colombia, (1998). Profesor asistente en la Universidad del Quindío, Colombia, programa de Ingeniería Electrónica, Investigador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad del Quindío – GITUQ. Áreas de interés: Telemática, IPTV, modelado de tráfico de servicios telemáticos y comunicaciones inalámbricas.
ORCID: 0000-0001- 8585-706X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

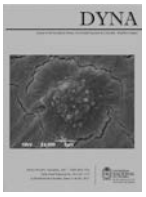
Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 64

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Assessment of evaporative cooling efficiency in greenhouses equiped with wetted porous plates

Flávio Alves-Damasceno [a], Luciano Barreto-Mendes [b], Tadayuki Yanagi Junior [a], Jofran Luiz-de Oliveira[c] & Jairo Alexander Osorio-Saraz [d]

[a] *Departamento de Ingeniería, Universidad Federal de Lavras, Lavras, Brasil. flavio.damasceno@deg.ufla.br, yanagi@deg.ufla.br*
[b] *INRA - Institut National de la Recherche Agronomique, Saint-Genès-Champanelle, France. luciano.mendes@inra.fr*
[c] *Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, Brasil. joframluiz@gmail.com*
[d] *Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. aosorio@unal.edu.co*

Received: August 12th, 2016. Received in revised form: July 14th, 2017. Accepted: September 25th, 2017.

Abstract
The main objective of this study was to experimentally validate a mechanistic model for predicting the cooling efficiency (η) of wetted porous plates built with expanded clay. The expanded clay material was physically characterized by specific mass, surface area, and volume. The model was validated with dry bulb temperature (T_{db}, °C) and air relative humidity (RH, %) data, which were continuously monitored in two different points, upstream and downstream the direction of the air passing through the porous plate. Data collection was carried out consecutively for a period of 10 days, between 11:00 a.m. and 4:00 p.m. Average values for η, simulated and observed, were 74.8 ± 7.4% and 68.3 ± 8.3%, respectively. Based on the developed model, it was observed that η was higher than 40% for T_{db} > 30 °C and constant RH at 45%. The simulation for predictions indicates that the increase in the air temperature greater than 20 °C may affect negatively the production in greenhouses from states located in tropical and subtropical countries as Minas Gerais, Brazil, if some design criteria in the evaporative cooling system are not revised.

Keywords: Greenhouse; mathematical modeling; simulation; heat and mass transfer.

Evaluación de la eficiencia de equipos de enfriamiento evaporativo usando placas porosas en invernaderos

Resumen
El objetivo principal de este estudio fue validar experimentalmente un modelo mecánistico para predecir la eficacia de enfriamiento (η) de placas porosas construidas con arcilla expandida. El material de arcilla expandida fue físicamente caracterizado encontrando su masa específica, área superficial y volumen. El modelo fue validado con datos de temperatura de bulbo seco (T_{db}, ° C) y humedad relativa del aire (humedad relativa,%) que fueron continuamente monitoreados en dos puntos diferentes, en contra y a favor de la dirección del aire que pasa a través de la placa porosa. La recolección de datos se llevó a cabo de forma consecutiva durante un período de 10 días entre las 11:00 y 4:00 p.m. Los valores medios de η, simulados y observados, fueron 74,8 ± 7,4% y 68,3 ± 8,3%, respectivamente. Basado en el modelo desarrollado, se observó que η fue mayor del 40% para T_{db}> 30 ° C y HR constante en 45%. La simulación indicó que el aumento de la temperatura del aire puede afectar negativamente la producción en invernaderos en Estados como Minas Gerais, Brazil, si no se revisan algunos criterios de diseño en el sistema de enfriamiento por evaporación.

Palabras clave: Invernadero; modelo matemático; simulación; transferencia de calor y masa.

1. Introduction

Climate change is no longer considered a questionable scientific hypothesis, but an inevitable paradigm [1]. One of its consequences is that some regions of the globe are being exposed to extreme (high or low) temperatures. Specifically, tropical regions are facing abnormally warm summers, impacting both natural ecosystems and human intervened environments. In the latter, agriculture may be the sector of society that is mostly sensitive to extreme temperatures.

How to cite: Alves-Damasceno, F., Barreto-Mendes, L., Yanagi Junior, T., Luiz-de Oliveira, J. and Osorio-Saraz, J.A., Assesment of evaporative cooling efficiency in greenhouses equiped with wetted porous plates DYNA, 84(203), pp. 118-125, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

Production efficiency in greenhouse systems are inherently dependent on external factors such as climatic agents (dry bulb temperature - T_{db}, relative humidity - RH, solar radiation, etc.), and design factors such as the roofing and walls materials and the presence of insect protection screens [2,3]. Climate control mechanisms, such as the ventilation and evaporative cooling systems [4], are essential for allowing optimum convective transfer of water vapor, gases and heat, keeping the internal environment at healthy levels.

Typical forms of evaporative cooling systems for protected environments consist of misting systems (low and high pressure), or forced passage of air through wetted porous plates by means of a ventilation system. According to [5], depending on the climatic conditions of the region where the evaporative cooling system is developed, T_{db} may be reduced up to 11°C. In tropical regions such as in Brazil, the average temperature drop is about 6°C.

The operating principle of evaporative cooling systems involves processes induced by heat and mass transfer, where water (either in its liquid or vapor state) and air are the working fluids. This process consists in evaporating water induced by the passage of an airflow, thus decreasing the T_{db} [6-8].

In order to evaluate and compare different evaporative cooling systems, various research studies have been conducted in the field [9-11]. However, limitations such as insufficient number of greenhouses with similar systems at the same location, and the high costs for conducting experimental research, have hampered the conduction of field studies covering a significant number of variables and factors.

A possible solution to this problem can be the use of models and computer simulations, followed by field validations. Subsequently, such validated models may be used to indicate the most relevant factors or variables, which, ultimately, are to be tested experimentally. Currently, a number of modeling techniques have been applied to simulate evaporative cooling systems in greenhouses [12,13]. These modeling approaches are still labor-intensive and require the acquisition of expensive specific commercial packages.

The development or adaptation of a mechanistic model for evaporative cooling systems that is relatively simpler but still able to accurately represent reality needs to be further evaluated. Evaporative coolers have been widely used for crop production in greenhouses due to their relatively good cost/benefit ratio. In these systems, the quantification of the efficiency (η) is of great importance.

The aim of the present work was: a) to describe and validate a mechanistic model developed to predict the evaporative cooling efficiency (η) of a wetted porous plate (PAD) system applied to a greenhouse, and b) present some experimental results in future scenarios of climate change.

2. Material and methods

2.1. Model description

The evaporative cooling efficiency (η) is calculated from the variables dry bulb temperature (T_{db}) and wet bulb temperature (T_{wb}) of the air, measured both upstream and downstream the pads, according to Eq.1 [14].

$$\eta = \left[T_{db,i} - T_{db,o} \right] / \left[T_{db,i} - T_{wb,i} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Where: η - evaporative cooling efficiency (%); $T_{db,i}$ and $T_{db,o}$ – dry bulb temperature of the air upstream and downstream the pad cooling system, respectively (°C); and $T_{wb,i}$ - wet bulb temperature of the air upstream the pad cooling system, (°C).

Fig. 1 can be observed the schematic representation of an evaporative cooling system of the wetted porous material type, where: a) Variable of air upstream the PAD cooling system: $T_{db,i}$ - dry bulb temperature (°C), $\omega_{a,i}$ - mixing ratio gradient (kg kg^{-1}); P_{atm} - Atmospheric pressure (kPa), $\dot{m}_a$ - flow of water passing through the cooling plate (kg s^{-1}); b) Variable of water: $T_{water,i}$ - water temperature used to wet the cooling plate (° C) and $\dot{m}_w$ - water flow through the cooling plate (kg s^{-1}); c) Variable of PAD cooling: W - cooling plate width (m); H - cooling plate height (m) and L - thickness of the cooling plate (m); d) Variable of air downstream the PAD cooling system: $T_{db,o}$ - dry bulb temperature of the air upstream (° C) and $\omega_{a,o}$ - air mixture ratio after going through the cooling plate (kg kg^{-1}).

Hence, a mathematical model for predicting η in pad cooling systems was developed, based on the heat and mass transfer equations proposed by [15]. The transfer of sensible heat between the air and the existing water film of the porous material can be expressed by Eq. 2, which, after integration (Eq. 3), resulted in Eq. 4, that predicts the temperature of the air after crossing the cooler ($T_{bs,o}$).

$$dq_{a,s} = \dot{m}_a \cdot c_{p,a} \cdot dT_{db} = h \cdot \left(T_{water} - T_{db} \right) \cdot dA \quad (2)$$

Where: $dq_{a,s}$ - sensible heat gradient (W); m_a - mass flow of air across the cooling plate (kg s^{-1}); $c_{p,a}$ - specific heat of air (kJ kg^{-1} K^{-1}); dT_{bs} – dry bulb air temperature gradient (°C); h – convective heat transfer coefficient (W m^{-2} K^{-1}); T_{water} –

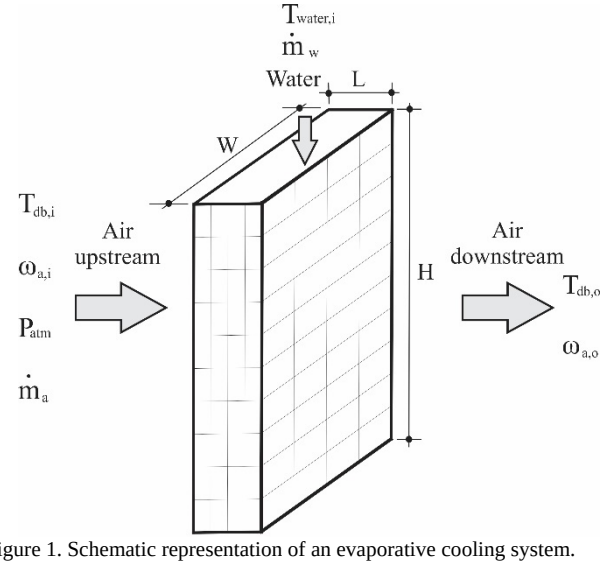


Figure 1. Schematic representation of an evaporative cooling system. Source: The authors.

temperature of the water used in the cooling plate wetting (ºC); and dA - area gradient (m2).

$$\int_{T_{db,i}}^{T_{db,o}} \frac{1}{(T_{water} - T_{db})}\, dT_{db} = \frac{h}{m_a \cdot c_{p,a}} \cdot \alpha \cdot W \cdot H \cdot \int_0^L dx \quad (3)$$

Where: α - surface area of wetted porous plate, per unit volume ($m^2\ m^{-3}$); W - cooling plate width (m); H - cooling plate height (m); L - thickness of the cooling plate (m); and dx – infinitesimal variation of the cooling plate thickness (m).

$$T_{db,o} = T_{water} + \left(T_{db,i} - T_{water}\right) \cdot e^{-\left(\frac{h}{m_a \cdot c_{p,a}}\right) \cdot \alpha \cdot W \cdot H \cdot L} \quad (4)$$

Where: $T_{db,o}$ - air temperature before crossing the plate (ºC).

Similar to the heat balance performed in equations 1 through 4, a mass balance was performed for water vapor (Eq. 5), which, after substitutions and subsequent incorporation into (Eq. 6) resulted in Eq. 7, used for the prediction of air mixing ratio after crossing the plate ($\omega_{a,o}$).

$$\dot{m} \cdot d\omega_a = k_d \cdot \left[\omega_{A,s} \cdot T_{water} - \omega_A\right] \cdot dA \quad (5)$$

Where: $d\omega_a$ - mixing ratio gradient (kg kg^{-1}); k_d - mass transfer coefficient based on the use of the mixing ratio (kg $m^{-2}\ s^{-1}$); $\omega_{A,s}$. (T_w) - mixing ratio to saturation conditions, depending on water temperature (kg kg^{-1}); and ω_A - mixing ratio in saturation conditions, depending on the water temperature (kg kg^{-1}).

$$\int_{\omega_{a,i}}^{\omega_{a,o}} \frac{1}{\omega_{a,s} \cdot T_{water} - \omega_a}\, d\omega_A = \frac{h_m \cdot \rho_a}{\dot{m}_a} \cdot \alpha \cdot W \cdot H \cdot \int_0^L dx \quad (6)$$

Where: $\omega_{a,i}$ - air mixture ratio that passes through the cooling plate (kg kg^{-1}); $\omega_{a,o}$ - air mixture ratio after going through the cooling plate (kg kg^{-1}); h_m - mass transfer coefficient (m s^{-1}); and ρ_a - air density (kg m^{-3}).

$$\omega_{a,o} = \omega_{a,s} \cdot T_{water} - \left(\omega_{a,s} \cdot T_{water} - \omega_{a,i}\right) \cdot e^{-\left(\frac{h_m \cdot \rho_a}{m_a}\right) \cdot \alpha \cdot W \cdot H \cdot L} \quad (7)$$

For the calculation of the mass transfer coefficient (h_m), Eq. 8 was used, and the Colburn factor j_h was calculated by Eq. 9, as proposed by [16]. Eq. 9 is valid for the Prandtl number of about 0.7 and a Reynolds number between 90 and 4000.

$$h_m = 0.929 \cdot j_h \cdot \upsilon \quad (8)$$

Where: j_h - J factor of Colburn (dimensionless); and υ - mass flow of air across the cooling plate (kg s^{-1}).

$$j_h = \frac{2.06 \cdot Re_D^{-0.575}}{\varepsilon} \quad (9)$$

Where: Re_D - Reynolds number defined according to the diameter of the spheres (dimensionless); and ε - porosity of the cooling plate filling material (decimal).

Based on temperature and relative humidity inputs before crossing the wet porous plate ($T_{db,i}$ and $RH_{,i}$ respectively), wet bulb temperature was calculated ($T_{wb,i}$). With the values of $T_{db,i}$ and $T_{wb,i}$ associated with $T_{db,o}$, obtained by Eq. 4, the $\eta_{simulated}$ was obtained with Eq. 10. For the calculation of these and other psychometric properties, the methodology proposed by [17] was used.

$$\eta_{simulated} = \frac{\left[T_{db,i} - T_{water} + \left(T_{db,i} - T_{water}\right) \cdot e^{-\left(\frac{h}{m_a \cdot c_{p,a}}\right) \cdot \alpha \cdot W \cdot H \cdot L}\right]}{\left[T_{db,i} - T_{wb,i}\right]} \cdot 100 \quad (10)$$

The equations demonstrated above were implemented into MS Excel®, where all calculations and simulations of this study were performed.

2.2. Characterization of the porous material

It was used expanded clay pebbles as the porous material in this experiment. It was physically characterized by determining the bulk density, porosity, average diameter, average volume and surface area. Each sample consisted of 50 expanded clay pebbles collected randomly from the porous plate. The density of the porous material, Eq. 11, was determined using the methodology of volume complementation, similar to that adopted for determining the bulk density of grain [18].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (11)$$

Where: ρ - density of the porous material (g cm^{-3}); m - mass of porous material (g); and V - volume of the porous material (cm^3).

The porosity, Eq. 12, was determined indirectly, by filling the pores of the expanded clay sample with a fluid until saturation, and from the measured volume of the liquid and the sample, determining the total porosity [19].

$$P = \frac{V}{V_{total}} \cdot 100 \quad (12)$$

Where: P - total porosity of clays (%); V - porous volume (cm^3); and V_{total} - total volume of the container (cm^3).

The average diameter, volume and the surface area of the samples were obtained by taking photographs of 50 expanded clay with a digital camera (4.0 Mega-pixels) at different angles. These images were processed via Autocad program® 2012 (Autodesk). The results were used to calibrate the equations in order to characterize the modeled porous material as expanded clay.

2.3. Experimental setup and data collection for model validation

In order to check whether or not the model was able to realistically represent the cooling process of porous plates

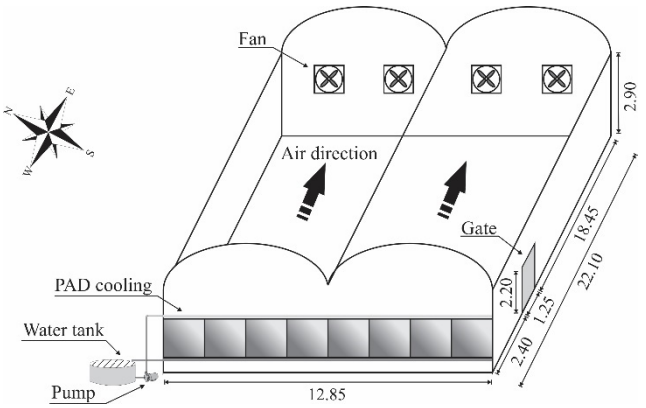


Figure 2. Schematic representation of the greenhouse performed in this study. Unit: meters (m).
Source: The authors.

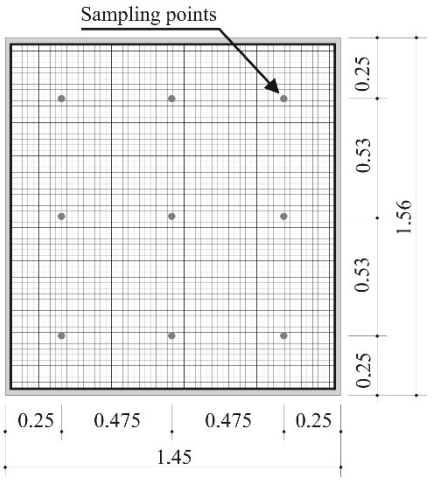


Figure 3. Schematic representation of equidistant points used to collect air velocity in wetted porous plate. Unit: meters (m).
Source: The authors.

made of expanded clay, field measurements were performed at a greenhouse equipped with such a cooling system. The greenhouse was located in the Department of Plant Pathology, Federal University of Lavras (UFLA), in Lavras, Minas Gerais state, Brazil. Local geographical coordinates were 21° 14' south latitude, 45° 00' latitude west of Greenwich and 918 m above sea level. Measurements took place for ten consecutive days, between 11:00 a.m. and 4:00 p.m.

The greenhouse had dimensions of 22.1 m Length × 12.8 m Width × 2.9 m Heigth, covered with two arches of transparent plastic, east-west orientated, with four hoods. It was equipped with negative pressure tunnel ventilation system, and a series of 8 wetted porous pads measuring in total 12.8 m Length × 1.6 m Heigth × 0.1 m Depth, made of expanded clay. Fig. 2 shows the representation of the greenhouse studied.

Portable recorders were installed and pre-programmed to collect T_{bs} and relative humidity (RH) (Hobo®, mod. U12-012, resolution: temperature of 0.03°C and RH of 0.03%) next to the two sides of the wetted porous plate at two-second intervals. In order to assure accuracy of measurements, the sensors were calibrated using a weather station following the manufacturer's instructions.

The variable T_{water} was monitored at the water reservoir with a digital thermometer (Instrutherm®, mod. TH-060, resolution of ± 0.1ºC and precision of 0.1%), at intervals of 30 minutes.

In order to determine the airflow rate through the wetted porous plate, one of the plates (dimensions 1.6 m Height × 1.5 m Length) was randomly selected and divided into nine equidistant sampling points according to the scheme of Fig. 3. Air velocity measurements were made via a digital propeller anemometer (Kestrel®, mod. 4000, precision of ± 3%), at 12 locations. The airflow values used in the simulations was obtained by the product of measured air velocity and area of the plate.

2.4. Prediction of evaporative cooling efficiency for future scenarios

The composition of the future scenarios was developed in accordance to the forecast reported from [1], adding to the air temperature 2.0°C and 2.5ºC to the scenario B2 (more optimistic) in 2050 and 2100, respectively. For the composition of the scenario A2 (less optimistic) it was added 3.0°C e 8.0ºC for the years of 2050 and 2100 respectively.

The simulations were performed considering the dimensions of the cooling pad used for validation. The relative humidity, average temperature, maximum temperature and maximum atmospheric pressure were obtained from official climatologic maps for Minas Gerais state, in the period of 1961-1990 [20]. The simulations via mathematical model were performed using the empirical equations adjusted in this experiment in order to estimate the efficiency of the pad cooling.

Table 1.
Physical properties of the cooling pads (mean ± standard error).

Volume (cm^3)	1.74 ± 0.88
Superficial area (cm^2)	7.14 ± 2.39
Diameter (cm)	1.43 ± 0.23
Density (g cm^{-3})	0.36 ± 0.03
Pososity (%)	68 ± 0.7
Surface area of the wetted porous plate (m^2)	12,8
Water temperature at top of plate (ºC)	16.8 ± 0.5
Water temperature at bottom of plate (ºC)	16.4 ± 0.5
Mean flow rate per linear meter (L s^{-1} m^{-1})	0.050 ± 0.03

Source: The authors.

3. Results and discussion

3.1. Summary of experimental data

Table 1 shows the average values of the main physical properties of the porous materials (volume, surface area, mean diameter, density and porosity), and variables form the cooling pads.

The diameter of the porous material was found to be (1.43 ± 0.23) cm, a result inferior to that described by [21], who found an average diameter of 2.7 cm for expanded clay. When evaluating different materials in wetted porous plates [22] found the best cooling efficiency with expanded clay

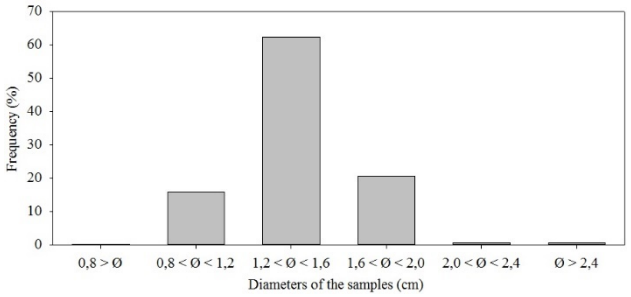


Figure 4. Values of relative frequencies for the diameters (Ø, cm) of the samples.
Source: The authors.

average diameter of 2.4 cm. In Fig. 4, it is observed the values of the histogram for the diameter of the sampled expanded clay pebbles, with the largest occurrence lying between the diameters of 1.2 and 1.6 cm.

The density of expanded clay characterized in this study showed the average calculated value of 0.36 ± 0.03 g cm^{-3}, which was lower than that found by [23], of 0.45 g cm^{-3}. In addition, the found value for porosity of (68 ± 0.7) %, did not coincide with the value of 50% found by [23].

To the extent that the thickness of the porous material increases, resistance to airflow usually increases and therefore the air contact time with the moist porous material increases. If, for a given thickness, porosity and capillary action of the porous material is increased, the water distribution will be more uniform; however, a larger volume of water is necessary, thereby increasing the resistance to the ventilation of the air [24].

The measured water flow rates of (0.05 ± 0.03) L s^{-1} m^{-1} was much lower value than that described by [21], 0.14 L s^{-1} m^{-1} adopted for cellulose plates 10 and 15 cm thick. According to [21], the flow of water passing through the plate should be high enough to clean the dirt and mineral salts, without allowing their accumulation. Relatively lower flow value could cause clogging of pipes and holes due to algae growth as observed in their system. These algae can also grow within the porous material, thereby increasing resistance to airflow and decreasing the cooling efficiency.

The average air speed of (0.9 ± 0.31) ms^{-1} was similar to that found by [22], which varied between 0.74 to 1.09 ms^{-1} for expanded clay plates with 120 mm thick. According to [22], the evaporative cooling efficiency is greater for any air velocity between 0.44 and 1.28 ms^{-1}.

The mean airflow rate calculated by the product of average speed and area of the porous plate was 2.04 m^3s^{-1}, which was higher than that found by [23] which ranged between 0.85 and 1.25 m3 s-1.

3.2. Heat transfer coefficient and evaporative cooling efficiency

The heat transfer coefficient by convection (h) is corrected (h') in Eq. 13 as a function of a set factor (F1) which is the difference between the simulated and observed values of h as a function of the air temperature as shown in Eq. (14), $r^2 = 0.8005$.

This correction was required because the original equation used to calculate the convective heat transfer coefficient was

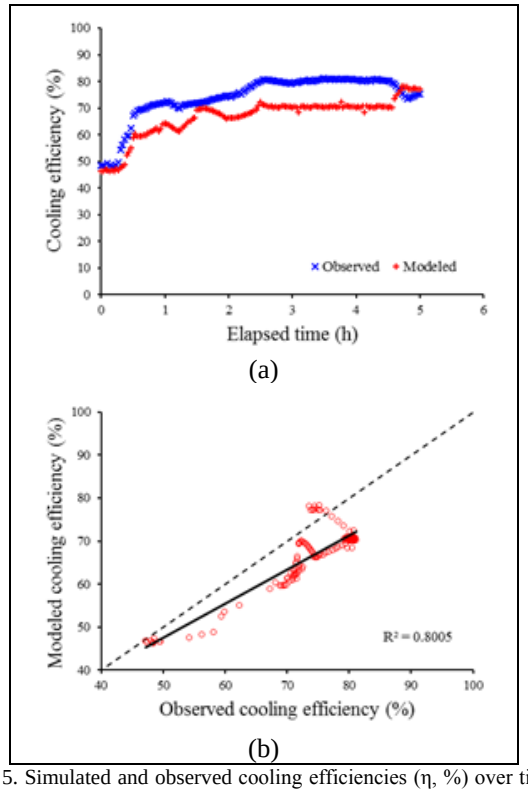


Figure 5. Simulated and observed cooling efficiencies (η, %) over time (a) and (b) plotted against one another as compared to a 45º slope line.
Source: The authors.

set to porous plates with spherical materials and expanded clay has an irregular shape approaching spherical, and has a roughened, porous surface.

$$h' = F_1 + h \quad (13)$$

$$F_1 = -2627.14 + 171.05 \cdot T_{db,i} - 2.75 \cdot T_{db,i}^2 \quad (14)$$

To determine the independent variable that most influenced the F1 values, we proceeded to the regression analysis based on the maximum coefficient of determination (r2) using the PROC REG of SAS® [24].

After applying the correction factor in heat and mass transfer coefficient, cooling efficiency results improved, whose mean values, observed and simulated, were 74.8 ± 7.4% and 68.3 ± 8.3%, respectively. Fig. 5 shows the behavior of the observed efficiency as a function of time, and it is further observed that in general the simulated values underestimated the real efficiency.

In Fig. 5a, it is observed graphically the behavior of the average of air temperature before crossing the plate and cooling efficiency observed and simulated throughout the day. Little variation was observed in the efficiencies values, more variation occurring at the start of data collection, during which the evaporative cooling system is on and off frequently, staying on for approximately 1-3 minutes, not therefore reaching state balance (Fig. 5b). In turn, the next 16 hours, the system was kept engaged for longer periods, 30 to 120 minutes, providing better equilibrium conditions.

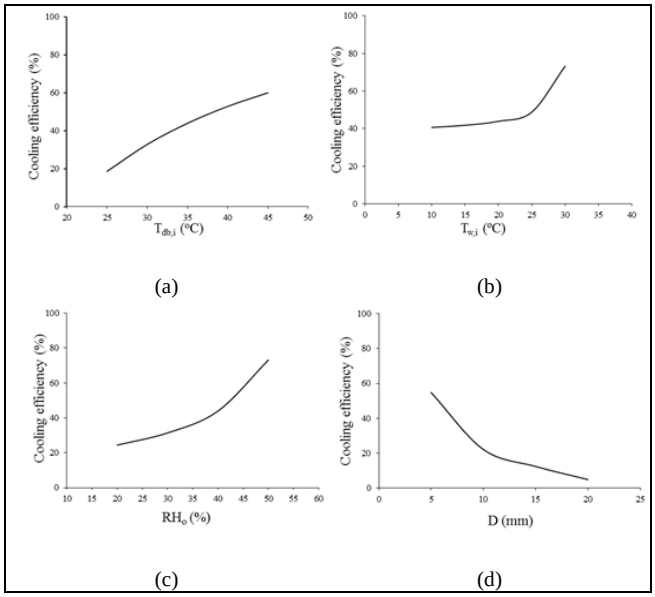


Figure 6. Sensitivity of cooling efficiency (η, ºC) to inlet dry bulb temperature ($T_{db,i}$, ºC, A), inlet water temperature ($T_{w,i}$, ºC, B), inlet air relative humidity (RH_i, %, C) and expanded clay average diameter (D, mm). Source: The authors.

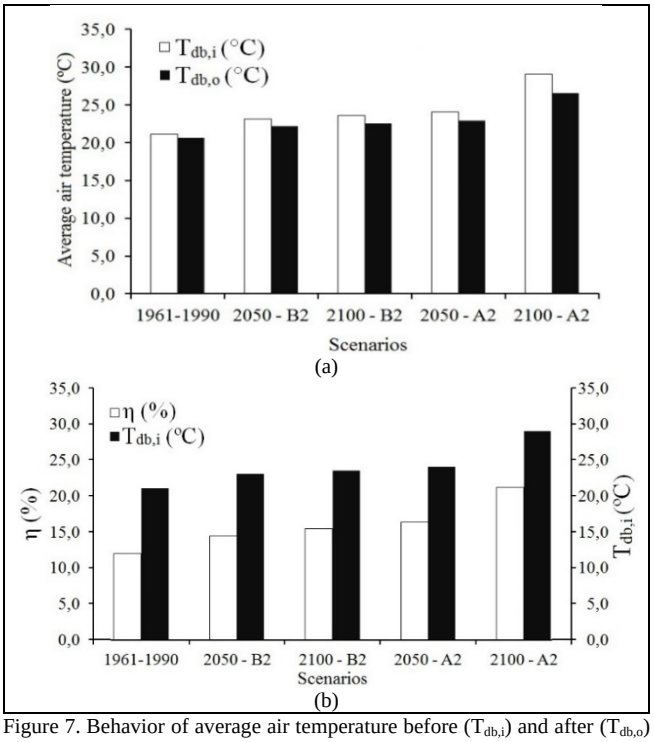


Figure 7. Behavior of average air temperature before ($T_{db,i}$) and after ($T_{db,o}$) crossing the wetted porous plate (a) and evaporative cooling efficiency (η) due to the variation of the air temperature ($T_{db,i}$) before crossing the wetted porous plate (b) according to the estimated average air temperature for the period of 1961-1990 and according to the B2 and A2 scenarios (IPCC, 2013), for the years 2050 and 2100.
Source: The authors.

3.3. Model sensitivity

Simulations were performed for prediction of the behavior of $T_{db,o}$, $RH_{,o}$ and η in function of air temperature before crossing the pad ($T_{db,i}$ of 25 °C to 45°C), as can been seen in Fig. 6. The dimensions of the evaporative cooling plate were considered to be 11.70 m x 2.00 m x 0.075 m, diameter of the material used to fill the evaporative cooling plate (D) of 10 mm, external relative humidity ($RH_{,i}$) 45%, atmospheric pressure (Patm) 101.32 kPa, mean air velocity inside the shed (V) 1.2 m s^{-1}, mass flow of air across the pad (m_a) 41 kg s^{-1}, water temperature applied to the porous plate (T_{water}) of 20 °C and the relationship between surface area and volume of the porous material (α) of 170 m^2 m^{-3}.

From Fig. 6 the capacity for reducing temperature and variation of $RH_{,o}$ can be seen as $T_{db,i}$ increases causing the increase in η. Later, adopting $T_{db,i}$ equal to 35 °C, D = 5, 10, 15 and 20 mm, corresponding to values of 157.08 m^2 m^{-3}, 78.54 m^2 m^{-3}, 52.36 m^2 m^{-3} and 23.56 m^2 m^{-3} respectively, and assuming the values of the other variables described above, the behavior of $T_{db,o}$, $RH_{,o}$ and η were simulated.

As it can be seen in Fig. 6, as the D increases it reduces the cooling capacity of the air $RH_{,o}$ and η (Fig. 6c and 6d). The calculated evaporative cooling efficiency was 54%. This value is in accordance to [25], who found η values of from 43% to 55% for plates with 5 cm thick and velocity ranging from 1.0 to 1.3 m s^{-1}.

3.4. Prediction of evaporative cooling efficiency for future scenarios

It can be observed in Fig. 7, the behavior of the average air temperature (Tdb,i) and (Tdb,o), and the evaporative cooling system efficiency (η) according to average temperature of the period 1961-1990 and the scenarios B2 and A2 for the years of 2050 and 2100.

The simulation results for ($T_{db,i}$) and ($T_{db,o}$) are shown in Fig. 7a, which indicates the gradual increase of $T_{db,o}$ in time into the greenhouse. The simulations indicate the need of dimensioning the evaporative cooling systems in order to adequate the internal environment of the greenhouse to the plants needs. The simulations results present general tendencies that might be important in the definition of strategies for ventilation projects.

Evaluating predictions of climate changes, it could be observed negative impacts in the agriculture production (Fig. 7b) [26-28]. If no precaution is taken, there might occur the migration of plant production to regions in order to achieve better thermal environment [29]. It can be harmful to the Brazilian economy, once Brazil is one of the countries most susceptible to the impacts of climate changes [30].

4. Conclusions

1. The mathematical model developed is suitable to simulate the PAD cooling systems, allowing the simulation of different system configurations, and may thus be used as a tool in the decision making process during the phase of design and dimensioning of evaporative cooling systems of the wetted porous plate type built with expanded clay;
2. With the variation of the diameter of the expanded clay filler used in the evaporative cooling plate, it was detected reduction of the capacity and efficiency of air cooling; and
3. The increase in the air temperature predicted in future

scenarios can affect negatively the plant production in greenhouses from Minas Gerais state, especially during the warmest period in the year.

Acknowledgements

The authors thank the CAPES, CNPq and FAPEMIG for their financial support of the project.

References

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, Climate Change 2013: The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T.F. Stocker et al., Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

[2] Soni, P., Salokhe, V.M. and Tantau, H.J., Effect of screen mesh size on vertical temperature distribution in naturally ventilated greenhouses tropical. Biosystems Engineering, 92(4), pp.469-482, 2005. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.08.005

[3] Duarte, L.A., Schoffel, E.R., Mendez, M.E. and Schallenberger, E., Changes in temperature of the air through the screens on the sides planted with tomato greenhouses. Journal of Agricultural and Environmental Engineering, 15(2), pp.148-153, 2011.

[4] Voltan, D.S., Barbosa, R.Z. and Martins, J., Spatial variability of relative humidity inside a greenhouse in tropical climate. Journal of Agricultural Sciences, 9(2), pp.251-257, 2014.

[5] Tinôco, I.F.F., Effect of different environment conditioning systems, and metabolizable energy levels in the diet on performance of broiler headquarters in summer and autumn conditions, PhD Thesis, Department of Agricultural Engineer, Universidade Federal de Minas Geris, Belo Horizonte, Brazil,1996.

[6] Camargo, J.R., Ebinuma, C,D. and Cardoso, S.A., Mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system. Thermal Engineering, 2(2), pp.30-34, 2003. DOI: 10.5380/ret.v2i2.3473

[7] Justino, E., Nääs, I.A., Carvalho, T.M.R. and Salgado, D.A., Efeito do resfriamento evaporativo e do balanço eletrolítico sobre a lactação de porcas em condições de verão tropical. Arq. Bras. Med. Vet. Zootec. 67(2), pp.455-464, 2015.

[8] Medeiros, J.M., Lopes, B.S.O., Freire, J.M.S., Silva, J.P.L., Viana, F.C.A., Silva, M.G. and Braga, A.H.G., Analysis of a prototype of adsorptive evaporative air conditioner for hot and humid weather. Scientific Journal Principia-Disclosure and Technological, 1(26), pp. 27-41, 2015.

[9] Ahmed, I.N., Abaas, O., Ahmed, M. and Ismail, M.R., Performance evaluation of three different types of location evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan. Saudi Journal of Biological Sciences, 18(1), pp.45-51, 2011. DOI: 10.1016/j.sjbs.2010.09.005

[10] Kouchakzadeh, A. and Brati, A., The evaluation of the bulk charcoal greenhouse evaporative cooling pad. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 15(2), pp. 188-193, 2013.

[11] Chen, J., Cai, Y., Xu, F., Hu, H. and Oh, Q., Analysis and optimization of the fan-pad evaporative cooling system for greenhouse based on CFD. Advances in Mechanical Engineering, 1(8), pp. 1-8, 2014. DOI: 10.1155/2014/712740

[12] Franco, A., Valera, D.L., Pena, A. and Pérez, A.M., Aerodynamic analysis and CFD simulation of evaporative cooling pads several cellulose used in Mediterranean greenhouses. Computers and Electronics in Agriculture, 76(2), pp.218-230, 2011. DOI: 10.1016/j.compag.2011.01.019

[13] Montazeria, H., Blockena, B. and Hensena, J.L.M., Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. Building and Environment, 83(1), pp. 129-141, 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.022

[14] ASHRAE. Evaporative air cooling. Chapter 19. In: HVAC Systems and Equipment Handdbook. Atlanta, Ga: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1992.

[15] Yanagi Jr, T., Carvalho, V.C., Yanagi, S.N.M. and Damasceno, F.A, Cooling efficiency of evaporative Modeling in wetted porous plates systems. Proceedings of XXXV Brazilian Congress Agricultural Engineering, 2006. pp. 1-9.

[16] Wilhelm, L.R., Numerical calculation of psychrometric properties in SI units. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 19(2), pp. 318-321, 1976.

[17] Moreira, S.M.C., Chaves, M.A. and Oliveira, L.M., Net efficiency of comparison in the determination of the bulk density of agricultural grains. Journal of Storage, 9(1), pp. 22-24, 1985.

[18] Araujo, A.G., Estimation and classification of soil compaction due to agricultural machine traffic through the nebula modeling. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, Sao Paulo, Brazil, 2004.

[19] Brasil. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Departamento Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas (1961-1990). Brasília: SPI/EMBRAPA, 1992.

[20] Silva, C.E., Comparison of evaporative panels of expanded clay and cellulose for adiabatic cooling systems of air in poultry houses with negative pressure in tunnel model. MSc. Thesis, Universidade Federal de Viçosa, Brazil, 2002.

[21] Rosa, J.F.V., Tinôco, I.F.F., Fernandes, C.M. and Zolnier, S., Dimensionamento de painéis porosos para condicionamento do ar em ambientes climatizados. Engenharia na agricultura, 20(5), pp. 404-411, 2012.

[22] Peixoto, R.A.F., Tinôco, I.F.F., Gates, R.S., Moura, S.A.L. and Souza, C.F., Performance of different types of applied materials to coverings of facilities for animal production - Simulation. Proceedings of ASAE International Meeting, 2003. pp. 1-9.

[23] Wiersma, F. and Short, T.H., Evaporative cooling. Proceedings of ASAE International Meeting, Ventilation of agricultural structures. 1983.

[24] SAS. User's guide (Realese 8.2) Cary, NC, Statistical Analysis Institute Inc, 2001.

[25] Borges, G., Yanagi Junior, T., Carvalho, L.G., Damasceno, F.A. and Yanagi, S.N.M., Climate changes influence on inside thermal environment of broiler houses. Proceedings of International Conference of Agricultural Engineering. 2008. pp. 1-37.

[26] Nääs, I.A., Romanini, C.E.B., Salgado, D.A., Lima, K.A.O., Vale, M.M., Labigalini, M.R., Souza, S.R.L., Menezes, A.G. and Moura, D.J., Impact of global warming on beef cattle production cost in Brazil. Scientia Agricola, 67(1), pp.1-8, 2010. DOI: 10.1590/S0103-90162010000100001

[27] Silva, T.G.F., Moura, M.S.B., Sá, I.I.S., Zolnier, S., Turco, S.H.N. and Souza, L.S.B., Cenários de mudanças climáticas e seus impactos na produção leiteira em estados nordestinos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14(8), pp.863-870, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000800011.

[28] Gomes, R.C.C., Yanagi Junior, T., Lima, R.R, Yanagi, S. de N.M., Carvalho, V.F. and Damasceno, F.A., Predição do índice de temperatura do globo negro e umidade e do impacto das variações climáticas em galpões avícolas climatizados. Ciência Rural, 41(9), pp. 1645-1651, 2011.

[29] Ghini, R., Hamada, E. and Bettiol, W., Impacto das mudanças climaticas sobre as doencas de importantes culturas no Brasil [em Línea], Embrapa Meio Ambiente, Jaguariuna, 2011 [Consulta, 2/3 de agosto de 2016]. Available at: http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/impactos-das-mudan%C3%A7as-climaticas-doen%C3%A7as-importantes-culturas-brasil/id/55558063.html

[30] Fearnside, P.M., Tropical forests of amazonia in schneider. Climate Changes Science and Politicy: Island Press, 2009.

F.A. Damasceno, is djunct professor at the Universidade Federal de Lavras (UFLA), Brazil. PhD in Environment Control from the Federal University of Viçosa (UFV), Brazil, with training in Biosystems and Agricultural Engineering from the University of Kentucky, as a visiting researcher. Master of Environment Control from the UFLA (2008), Management Specialist and Environmental Management in Agribusiness from UFLA (2008), and graduate in Agricultural Engineering from UFLA (2006). He has publication scientific papers in conferences and national and international journals.
ORCID: 0000-0002-8284-7496

L. Barreto-Mendes, is professor at the Institute National de la Recherche Agronomique (INRA, France). PhD in Rural and Ambience Constructions, MSc. of Systems Engineering. He has experience in Agricultural Engineering with an emphasis on Rural Construction Engineering, working mainly in the areas of construction and ambience, Bioclimatology, Animal Welfare, Evaluation and Building Systems Modeling and Ambience.
ORCID: 0000-0003-3358-2273

T. Yanagi Junior, has a BSc. degree in Agricultural Engineering (1992) and is a professor at the Federal University of Lavras, Brazil. His MSc. degree is in Agricultural Engineering from Federal University of Lavras, Brasil, (1995) and PhD in Agricultural Engineering from the Federal University of Viçosa (2002). He has experience in Agricultural Engineering, and focuses on Agricultural Constructions and Environment.
ORCID: 0000-0001-9653-205X

J.L.de Oliveira, has a BSc. degree in Agricultural Engineering (2010) from the Federal University of Viçosa, Minas Gerais state, Brazil. Since 2010 he has worked as a professor at the Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT),BrazIl, teaching and advising in the following areas: thermal comfort in livestock facilities and materials technologies for thermal control improvement. He is member of AMBIAGRO (Center for Research in Agro-Industrial Ambience and Engineering Systems) at the Department of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa and ECOAGRI (Engineering and Sustainability in Agriculture) at UFMT.
ORCID: 0000-0002-9093-3773

J.A. Osorio-Saraz, has a BSc. degree in Agricultural Engineering (1998), a post graduate degree in Environmental Legislation (2001) and a MSc. in Materials Engineering (2006), all from the Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. In 2011 he gained a Dr. degree in Rural Constructions from the Federal University of Viçosa, Minas Gerais state, Brazil. Since 2003 he has worked as a professor at the UNAL, teaching and advising in the following areas: design of livestock housing, materials technology for livestock housing, air quality and animal welfare, thermal comfort for animals, use of the CFD tool to predict air motion patterns in agro industry facilities. He is member of AMBIAGRO (Center for Research in Agro-Industrial Ambience and Engineering Systems) at the Department of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa and of the research group in agricultural engineering (A1 in Colciencias Colombia) at the UNAL. He is currently the Dean of the Faculty of Agricultural Sciences at UNAL Medellin, and has been since 2012.
ORCID: 0000-0002-4358-3600

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

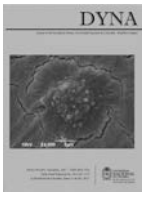
Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Identification of resilience factors, variables and indicators for sustainable management of urban drainage systems

Sergio Andrés Blanco-Londoño[a], Patricia Torres-Lozada[a] & Alberto Galvis-Castaño[b]

[a] *EIDENAR, Faculty of Engineering, Universidad del Valle, Cali, Colombia. sergio.blanco@correounivalle.edu.co, patricia.torres@correounivalle.edu.co*
[b] *CINARA Institute, Faculty of Engineering, Universidad del Valle, Cali, Colombia. alberto.galvis@correounivalle.edu.co*

Received: June 14th, 2016. Received in revised form: July 19th, 2017. Accepted: September 30th, 2017

Abstract
Water management systems in general and urban drainage systems (UDS) in particular should be designed to ensure not only the provision of public service but also their sustainability and resilience. This paper performed an analysis and assessment to identify the factors, variables and indicators of resilience for sustainable UDS management by using an information management tool for scientific subjects. As a result of this analysis, four water resource resilience factors were identified: *i.* Flexibility; *ii.* Resourcefulness; *iii.* Redundancy; and *iv.* Robustness. In addition, six UDS resilience variables were identified: *i.* Recovery capacity; *ii.* Response capacity; *iii.* Amplitude; *iv.* Absorption capacity; *v.* Resistance capacity; and *vi.* Response curve. Corresponding indicators were proposed to quantify these variables. The identified elements contribute to the development of integrated frameworks to assess UDS resilience.

Keywords: urban drainage; management; resilience; sustainability.

Identificación de factores, variables e indicadores de resiliencia para la gestión sostenible de sistemas de drenaje urbano

Resumen
La gestión del agua en general y de los sistemas de drenaje urbano (SDU) en particular, debe ser concebida no solo para asegurar la prestación de un servicio público, sino también para garantizar su sostenibilidad y resiliencia. En el presente artículo se presenta un análisis y reflexión que permitió identificar los factores, variables e indicadores de resiliencia para la gestión sostenible de SDU, usando herramientas de gestión de información de temas científicos. Como resultado de este análisis, se identificaron cuatro factores de resiliencia de recursos hídricos: *i.* Flexibilidad; *ii.* Recursividad; *iii.* Redundancia; y *iv.* Robustez y seis variables de resiliencia de SDU: *i.* Capacidad de recuperación; *ii.* Capacidad de respuesta; *iii.* Amplitud; *iv.* Capacidad de absorción; *v.* Capacidad de resistencia; y *vi*. Curva de respuesta. Para cuantificar estas variables, se proponen sus correspondientes indicadores. Los elementos identificados contribuyen al desarrollo de modelos integrales de evaluación de la resiliencia en SDU.

Palabras clave: drenaje urbano; gestión; resiliencia; sostenibilidad.

1. Introduction

Cities must be able to face 21st century threats such as rapid urbanization, population growth, climate change and variability, energy restrictions and increased environmental regulation [1]. Novotny [2] noted that urban water management becomes unsustainable in the face of extreme events such as floods or droughts, which are expected to increase in frequency as a result of global warming.

Accordingly, there is a need to consider resilience in the planning, design and construction of urban infrastructure as embodied in the Sustainable Development Goals (SDGs) formulated by the UN for 2016-2030 [3].

Urban infrastructure elements such as urban drainage systems (UDS) are vulnerable to these aforementioned threats; therefore, design and operational processes must account for system weaknesses, operational failures, and the incorrect interpretation and use of information to ensure

How to cite: Blanco-Londoño, S.A., Torres-Lozada, P. and Galvis-Castaño, A., Identification of resilience factors, variables and indicators for sustainable management of urban drainage systems DYNA, 84(203), pp. 126-133, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

sustainability [4].

Thus, the concept of resilience comes to the fore when seeking to improve the sustainability of urban infrastructure in the future.

Given the importance of this concept in UDS management, we will discuss the evolution of resilience, going from the narrowest sense of the word to a broader interpretation, while examining how it has been addressed as it relates to UDS management.

1.1. Evolution of the concept of resilience

The concept of resilience arose from the field of ecology in the 1960s through studies of predator-prey population interactions and their functional responses as they relate to the theory of ecological stability.

Holling [5] proposed that "*resilience determines the persistence of relationships within a system and is a measure of the capacity of these systems to absorb changes in variables of state, variables of conduction and parameters, and being able to persist"*. Many years later, Holling [6] classified resilience into "*engineering resilience*" and "*ecological resilience*" to emphasize the differences between efficiency, stability and predictability on the one hand and persistence, change and unpredictability on the other.

Engineering resilience is characterized by analysing return periods and efficiency by focusing on the recovery capacity of a system in the context of a stable equilibrium. Ecological resilience, in turn, emphasizes the instability that can "move" a system to another regimen of behaviour (also known as the "basin of attraction").

Based on these concepts, Holling [6] defined resilience as "*the magnitude of the disturbance that can be absorbed before the system redefines its functional structure, changing the variables and processes that control behaviour*". Resilience is characterized as the capacity to absorb changes, resist disturbances and maintain functions while focusing on the persistence and robustness of a system in the context of global stability.

Because these different interpretations of resilience were causing confusion, and by arguing that the resilience of a system must be considered in terms of the attributes that control the dynamics of a system. Walker *et al.* [7] added a third category: socio-ecological resilience, defined as "*the potential of a system to tolerate disturbances without collapsing towards a qualitatively different state, maintaining its structure and function, which involves its capacity to reorganize itself, following the changes driven by disturbances*".

Socio-ecological resilience is characterized by analysing the interactions between disturbances, reorganization, sustainability and development in a system and focusing on the capacity to adapt, transform, learn and innovate in a context of unstable equilibrium.

This concept modified existing views that considered systems to be stable by introducing a new perspective that considered the capacity of systems to adapt and change, thus increasing the probability of sustainable development in changing environments where the future is unpredictable.

Table 1.
Characteristics, perspectives and context of different resilience concepts.

Concept	Characteristics	Perspective	Context
Engineering resilience	Return period, efficiency	Recovery, stability	Surroundings of a stable equilibrium
Ecological or social resilience	Capacity to absorb, resist shocks, maintain functions	Persistence, robustness	Multiple equilibriums, stability landscapes
Socio-ecological resilience	Perturbation and reorganization, sustainability and development	Capacity to adapt, transform, learn, innovate	Integrated feedback of the system, dynamic interactions between scales

Source: Adapted from [11]

This broad category integrates resilience with socio-ecologic systems (SES), which integrate social and ecological systems, by focusing not only on the components of both systems but also on their interactions [7].

The SES concept incorporates ideas from fields related to adaptation, robustness and vulnerability by concerning itself with the dynamics and attributes involved in each of these terms, thus becoming broader in scope than any of these individual fields [8,9].

Within the domain of a social system lie subsystems such as culture, politics, the economy, and social organization (society itself); an ecological system domain hosts subsystems such as nature (a setting not created by man) and the environment (a setting created by man) [10].

Folke [11] defined socio-ecological resilience as "*an approach or way of thinking that presents a perspective to guide and organize thinking from a broader perspective, providing a valuable framework for the analysis of SES*". This places this field under exploratory research and rapid development, with political implications for sustainable development.

Table 1 synthesizes the major characteristics, perspectives and context of the three concepts of resilience we have identified.

1.2. Resilience for sustainable management of UDS

Different methodologies have been formulated to quantify the concept of resilience; Hosseini *et al.* [12] classified the procedure for evaluating resilience into qualitative and quantitative methodologies.

The qualitative methodologies include conceptual frameworks (they provide a notion of resilience but do not provide a quantitative value) and semi-quantitative indices (they involve the opinion of experts in their estimation), and the quantitative methodologies include general resilience metrics (they evaluate resilience in the performance of a system) and structural-based models (they evaluate resilience by components).

Based on this classification, Table 2 shows several studies that use the different methodologies to evaluate resilience.

Table 2.
Classification of different methodologies used to evaluate resilience.

Source	Qualitative		Quantitative		Field of Study
	Conceptual frameworks	Semi-quantitative	General metrics	Structural based-models	
[13]	✓				Socio-Ecological
[14]	✓				Socio-Ecological
[15]	✓				Urban water
[16]	✓				Urban water
[17]	✓				Urban drainage
[18]		✓			Water resources
[19]		✓			Socio-Ecological
[20]		✓			Water supply
[21]		✓			Water resources
[22]		✓			Water resources
[23]			✓		Water resources
[24]			✓		Water resources
[25]			✓		Water resources
[26]			✓		Water resources
[27]			✓		Water resources
[28]			✓		Water resources
[29]			✓		Water resources
[30]			✓		Water supply
[31]			✓		Water supply
[32]			✓		Urban drainage
[33]			✓		Urban drainage
[34]				✓	Urban drainage

Source: Created by author

Although different methodologies have been proposed to evaluate resilience, there are few studies that have focused on developing the appropriate methodologies to evaluate resilience in UDS [35,36], which makes the study of resilience in this field a novel topic of research for developing quantifiable indicators of resilience that can evaluate all the aspects involved in this concept [16].

To analyse resilience in UDS, conceptual frameworks [17], general resilience metrics [32,33] and structural-based models [34] have been proposed, the majority of which evaluate flood risk in UDS; only one addresses the problem of dragging pollutants [32].

Based on the conceptual perspective of resilience, these frameworks are primarily framed within the concept of engineering resilience. This provides an opportunity to develop new approaches that can evaluate resilience as it applies to UDS and ideally involve an SES from the point of view of socio-ecological resilience; this topic has not been previously addressed, even though there is a wide field of research to be developed.

As a result, this article presents an analysis and related impressions of applying the concept of resilience to the sustainable management of UDS by identifying the various factors, variables and indicators.

2. Methodology

The methodology for the management of scientific information proposed by Gómez *et al.* [37] was used to identify the variables and indicators of resilience for the sustainable management of UDS.

This methodology consists of four phases: *i. Definition of the problem; ii. Search for information; iii. Organization of the information;* and *iv. Analysis of the information*.

To define the problem, we began with the key concepts of sustainability, resilience and SES and their relationship with the sustainable management of UDS. The *Scopus* database was used to search for information by using keywords such as "sustainability", "resilience", "socio-ecological systems" and "urban drainage", in addition to keywords referring to important problems related to UDS such as "climate change", "flood risk" and "diffuse pollution". The period of observation extended from 1979 (when the concept of resilience initially appeared in engineering) until February of 2016.

The following search equations were used: *"Resilience AND Socio-Ecological Systems", "Resilience AND Sustainability OR Urban Drainage", "Resilience AND Urban Drainage", "Resilience AND Sustainability AND Climate Change", "Resilience AND Flood Risk", "Socio-Ecological Systems AND Sustainability", "Socio-Ecological Systems AND Climate Change", "Sustainability AND Urban Drainage", "Sustainability AND Climate Change OR Urban Drainage", "Sustainability AND Diffuse Pollution", "Sustainability AND Flood Risk", "Urban Drainage AND Climate Change", "Urban Drainage AND Diffuse Pollution"* and *"Urban Drainage AND Flood Risk"*.

The data mining program *RefViz* [38] was used to organize the information and select the most relevant articles; the program uses mathematical algorithms to group articles by topic based on the keywords. The results were used to create a concept map denominated as a galaxy in which each topic was grouped based on the frequency of the keywords. The organized information yielded 596 articles of interest forming 24 topic groups.

Once the information was organized, we selected documents and authors for review. After reading the abstracts and conclusions of those articles, an analysis was performed of the articles with the most important ideas and the most relevant aspects for the topic of this study. Once this was completed, were selected four of the 24 groups formed in the information search stage that were of most interest (groups G16, G17, G19 and G21); these included 122 articles. To make this articles selection, it was taken into account that resilience was a main keyword of the document.

The filtered documents were studied in more detail (i.e. it was made a scanning reading of each document) to select those that were relevant for this research (i.e. documents that include all or some factors for the evaluation of resilience in water resources). A total of 19 articles were used to carry out the analysis and comparison of the application of the resilience concept and to identify the common and relevant elements of resilience and the factors, variables and indicators for the sustainable management of UDS.

Fig. 1 shows the groups of interest regarding the topics consulted based on the previously described methodology.

3. Results and discussion

3.1. Resilience factors in water resource management

It was determined that resilience was impacted by four factors: *i.* Flexibility (capacity to change); *ii.* Resourcefulness

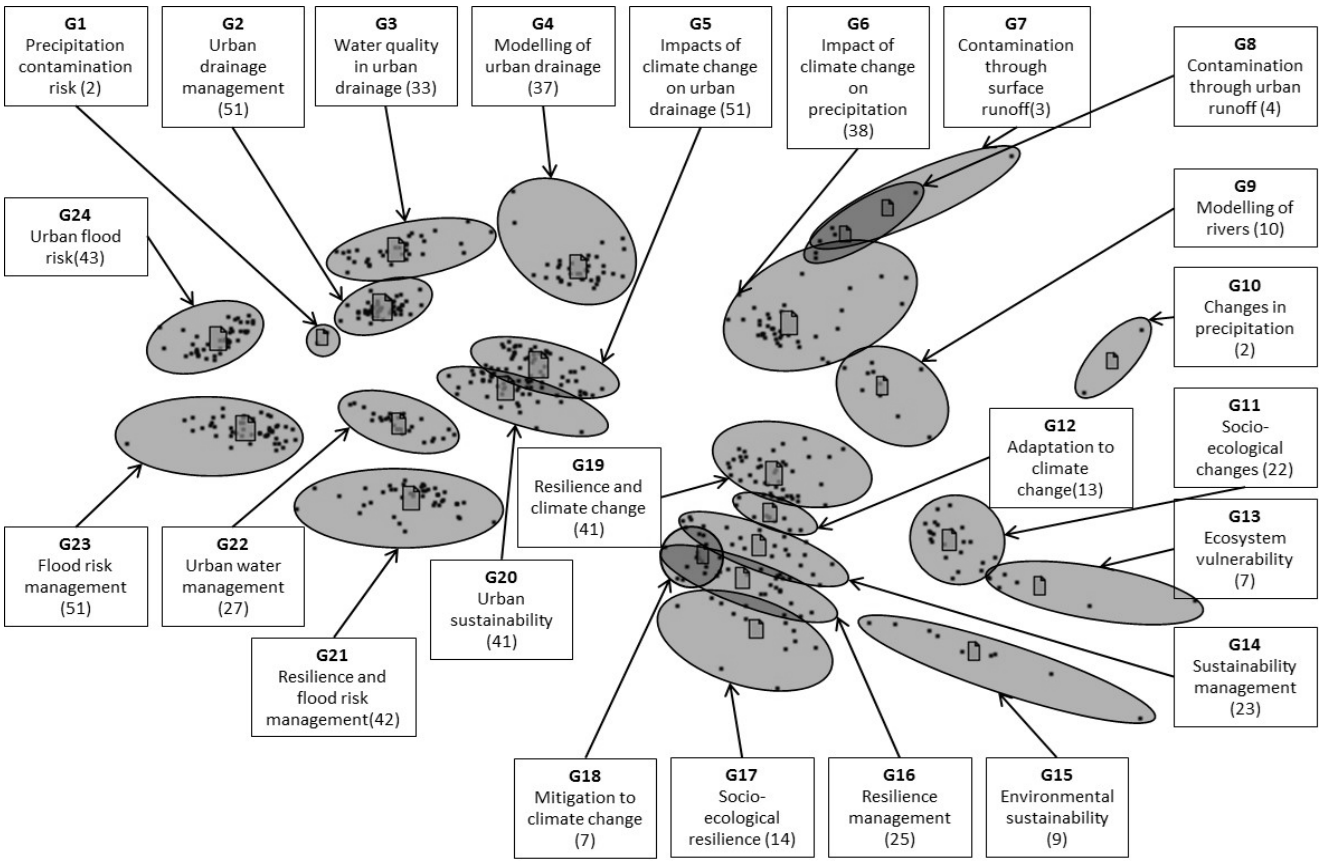


Figure 1. Interest groups in the consulted topics. Period 1979 – February 2016.
Source: Created by author

Table 3.
Characteristics of factors considered to evaluate resilience in the management of water resources.

Factor	Description	Adaptation strategies
Flexibility	Capacity to change, evolve and adopt alternative strategies (in the short or long term) in response to changing conditions; implies recognizing when it is not possible to return to the previous condition and searching for new solutions and strategies (evolution) [15,39].	Flexibility could be increased through the use of spatially distributed systems (decentralized) or modular systems or by providing storage capacity [16,41].
Resourcefulness	Capacity to visualize and act to identify problems, establish priorities and mobilize resources when faced by conditions that threaten to change an element of the system [15,40].	Resourcefulness can be increased by mobilizing human resources and assets (financial, physical, social, environmental and technological resources and information), supporting priorities and establishing goals [15,28].
Redundancy	Availability of elements or systems that can be substituted or activated when interruptions occur due to disturbances, allowing vital functions of a system to continue while the redundant elements assume new functions [33,40].	Redundancy could be improved through the addition of multiple elements or components that provide similar functions to minimize the propagation of failures through the system or operations that make it possible to divert exceptional load conditions to alternative parts of the system [41].
Robustness	Capacity of systems to resist a particular level of stress without suffering unacceptable degradation or loss of functions [40].	Robustness requires the exploration of the response and recovery of the system over a range of disturbance magnitudes; it also includes analysis of uncertainty caused by the variability of data and randomness of system parameters [42].

Source: Created by author

(capacity to mobilize resources); *iii.* Redundancy (presence of options); and *iv.* Robustness (capacity to resist) [15,39,40].

Table 3 summarizes the description of each of these factors and their adaptation strategies, whereas Table 4 shows how they have been considered in different areas of water resource management.

Flexibility is the most studied factor because this factor is directly associated with the concept of resilience, which has been changing with the incorporation of additional factors. This factor evaluates the capacity to recover and is associated with the time of failure, reliability and recovery speed of a system from the perspective of risk management. Flexibility

Table 4.
Factors considered for the evaluation of resilience in different areas of water resource management.

Source	Factors				Area of study
	Flexibility	Resourcefulness	Redundancy	Robustness	
[14]		✓			Socio-Ecological
[17]	✓	✓		✓	Urban drainage
[18]	✓				Water resources
[19]		✓		✓	Socio-Ecological
[20]	✓	✓			Water supply
[21]				✓	Water resources
[22]		✓			Water resources
[23]	✓				Water resources
[24]	✓				Water resources
[25]	✓				Water resources
[26]	✓				Water resources
[27]	✓				Water resources
[28]	✓				Water resources
[29]	✓				Water resources
[30]	✓				Water supply
[31]	✓		✓	✓	Water supply
[32]	✓				Urban drainage
[33]	✓		✓		Urban drainage
[34]	✓	✓			Urban drainage
Factors/Total	15/19	6/19	2/19	4/19	
(%)	79	32	10	21	

Source: Created by author

has been quantified through semi-quantitative indices that measure the capacity to provide a service [20], mathematical functions that quantify the probability of system failure [23-27,29,32], system reliability [30,31] and indicators based on performance curves of a system that provide information on its behaviour before and after a disturbance [17,18,28,33,34].

Resourcefulness evaluates the availability of economic and social resources and is associated with the capacity to mobilize these resources in adverse conditions. This factor has been quantified through economic variables based on the estimation of damage caused to people and infrastructure [17,18,34], as well as social variables based on economic development, demographic trends, political stability, government policies, market incentives, media organization [14], resource diversity, community and institutional learning, system self-organization [19], governance [20], communication, risk perception, interaction between institutions and risk management policies and tools [22].

Redundancy evaluates the multiplicity of elements that allow the vital functions of a system to continue and is associated with the availability of redundant elements that carry out these functions. This factor has been quantified through metrics such as grouping and meshing coefficients [31], along with an index that combines the magnitude and duration of system failures where redundancy is evaluated by comparing how an existing system functions with and without redundant elements until failure occurs [33]. Of the four identified factors, this is the least considered because of its recent incorporation, which is primarily related to the evaluation of resilience in urban water systems [16,41].

Table 5.
Variables and indicators used to evaluate the resilience of UDS.

Factors	Variables	Indicators	Source
Flexibility	Capacity to recover	Index of failure	[23-27,29]
		Gradualness	[17,18]
		Duration of recovery	[17]
		Recovery rate	[18]
		Loss of recovery	[28]
		Environmental load capacity	[32]
		Recovery indicator	[33,34]
Resourcefulness	Response capacity	Response indicator	[34]
	Amplitude	Damage expected per year	[17,18]
		Expected number of affected individuals per year	[18]
Redundancy	Capacity of absorption	Severity	[33]
Robustness	Resistance capacity	Overload of the system	[17]
		Resistance threshold	[21]
	Response curve	Severity of the response	[21]
		Proportionality of the response	[21]
		Point of no recovery	[21]

Source: Created by author

Robustness evaluates the resistance of a system when faced with extreme or unexpected events and is associated with systems that function well, even under uncertain conditions. This factor has been quantified by analysing the resistance capacity of a system by estimating an overload [17] through a variable that addresses change and uncertainty [19]. This is based on a graph that describes the level at which one can establish how a system responds to different levels of disturbance [21] and through metrics such as the central dominance point, the density of articulation points, the density of joints, the spectral void and algebraic connectivity [31].

3.2. Variables and indicators of resilience for sustainable management of UDS

Based on the analysis of these factors, a group of variables and indicators was identified to evaluate the resilience of UDS; these are summarized in Table 5.

Flexibility is associated with the variable of recovery capacity, which evaluates the possibility of a drainage system to return to a normal or stable state after a disturbance; this variable includes several indicators and is the variable most studied by researchers.

The indicators proposed for this variable are the failure index, which quantifies the probability of system failure [23-27,29]; the gradualness, which measures the change in the response of a system with respect to the change of magnitude in a flood surge [17,18]; the recovery duration, which quantifies the time it takes for a system to recover from an unsatisfactory condition [17]; the recovery rate, which measures the recovery rate of the system after a flood [18]; the recovery loss, which quantifies the loss of quality in a

system [28]; the environmental load capacity, which quantifies the amount of pollutant emissions that a system can endure [32]; and the recovery indicator, which measures the recovery time from a flood at each node of the system [33,34].

Resourcefulness is associated with two variables. One variable is the response capacity, which evaluates how the components of a drainage system respond to disturbances through a response indicator that allows for estimating the response magnitude in the area surrounding a flooded node [34]. The other variable is the amplitude [35], which evaluates the severity of damage expected in a drainage system after a disturbance through a yearly damage indicator that measures the average damage costs [17,18] and the expected number of affected individuals in a given year [18].

Redundancy is associated with the variable of absorption capacity [43], which evaluates the alternatives that can be offered by a drainage system after the failure of one or more of its component; the key indicator is severity, which measures the magnitude and duration of the maximum failure [33].

Robustness is associated with two variables. One variable is the resistance capacity, which evaluates the magnitude of the damage that a drainage system can endure through a system overload indicator that measures the greatest precipitation intensity that a system can endure [17]. The other variable is the response curve [21], which represents the aspects of robustness applicable to a UDS. The curve shows how a system responds to different disturbance levels through indicators such as the resistance threshold (which measures the point at which the response becomes greater than zero), the severity of the response (which corresponds to the point at which a system is no longer in a normal situation), the proportionality of the response (which relates the response change to the magnitude of the disturbance) and the point of no recovery (which is the point at which a system changes its identity into a new configuration).

Although this study identified resilience factors, variables and indicators in the sustainable management of UDS, continued research exploring other information sources (e.g., other databases besides *Scopus*, theses, government documents, etc.) is necessary to identify additional elements.

In addition, it will also be necessary to develop more comprehensive conceptual frameworks that can consider all of these factors, variables and indicators and validate them through case studies. However, combination of these factors and what could be the result of this combination is a pending work to be done. The elements identified in this study can serve as a first step in the development of these comprehensive frameworks.

4. Conclusions

The concept of resilience has evolved over the past 40 years, with a diversity of concepts arising from a narrow perspective with specific applications (engineering resilience) to a broader perspective that encompasses a more integral application context (socio-ecological resilience).

The concept of resilience has been scarcely studied as it pertains to UDS management, and the primary application has been in the study of flood risk. Therefore, much remains to be developed in this key field of research.

This study identified four key factors for the evaluation of resilience in water resources: flexibility, resourcefulness, redundancy and robustness. These factors evaluate the capacity to change, the mobilization of resources, the presence of options and the resistance capacity, respectively.

The following variables were identified to analyse resilience in UDS: recovery capacity, response capacity, amplitude, absorption capacity, resistance capacity and response curve. Associated indicators include the index of failure, gradualness, duration of recovery, rate of recovery, loss of recovery, environmental load capacity, recovery indicator, response indicator, expected damage per year, expected number of affected individuals per year, severity, system overload, resistance threshold, response severity, proportionality of response and point of no recovery.

Acknowledgments

The authors wish to express their gratitude for the financial support provided by the Universidad del Valle and Colciencias through Program 617 of 2013 for the financing of National Doctorate Studies granted to the first author and Program 745 of 2016 for the financing of Science, Technology and Innovation Projects and their contribution to the challenges faced by the country.

References

[1] Seeliger, L. and Turok, I., Towards sustainable cities: Extending resilience with insights from vulnerability and transition theory. Sustainability, 5(5), pp. 2108-2128, 2013. DOI:10.3390/su5052108

[2] Novotny, E., A new paradigm of sustainable urban drainage and water management, in Oxford Roundtable Workshop on Sustainability, Paper presented at the Oxford Roundtable Workshop on Sustainability - Oxford University, 2008. pp. 1-27.

[3] ONU. Sustainable development goals. 2015. [on line]. [date of reference March 15th 2016]; Available from: http://sustainabledevelopment.un.org/sdgs

[4] Blackmore, J. and Plant, R., Risk and resilience to enhance sustainability with application to urban water systems. Journal of Water Resources Planning and Management [Online]. 134(3), 2008. [date of reference March 2016]. Available at: http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=163932

[5] Holling, C., Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics, 4, pp. 1-23, 1973. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245

[6] Holling, C., Engineering resilience versus ecological resilience [Online], Washington D. C., Peter Schulze – Editor, National Academy of Engineering, 1996 [date of reference March 2016], cap. 4, Engineering within ecological constraints. Available at: http://www.nap.edu/read/4919/chapter/4

[7] Walker, B., Holling, C., Carpenter, S. and Kinzig, A., Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. Ecology and Society [Online], 9(2), 2004. [date of reference March 2016], Available at: http://www.uu.nl/sites/default/files/resilience-adaptability-and-transformability.pdf

[8] Cumming, G., Spatial resilience in social-ecological system. Cape Town: Springer, 2011.

[9] Lejano, R. and Stokols, D., Social ecology, sustainability, and economics. Ecological Economics, 89, pp. 1-6, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.01.011

[10] Salas, W, Ríos, L. y Álvarez, J., Bases conceptuales para una clasificación de los sitemas socioecológicos de la investigación en sostenibilidad. Revista Lasallista de Investigación [Online]. 8(2), pp.

136-142, 2011. [date of reference March 2016]. Available at: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492011000200015

[11] Folke, C. Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. Global Environmental Change, 16(3), pp. 253-267, 2006. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002

[12] Hosseini, S., Barker, K. and Ramirez-Marquez, J., A review of definitions and measures of system resilience. Reliability Engineering & System Safety, 145, pp. 47-61, 2016. DOI: 10.1016/j.ress.2015.08.006

[13] Walker, B., Carpenter, S., Anderies, J., Abel, N., Cumming, G., Janssen, M., Lebel, L., Norberg, J., Peterson, G., Pritchard, R., Resilience management in social-ecological systems: A working hypothesis for a parcipatory approach. Conservation Ecology [Online]. 6(1), 2002. [date of reference March 2016], Available at: http://www.ecologyandsociety.org/vol6/iss1/art14/print.pdf

[14] Ostrom, E., A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 325(5939), pp. 419-422, 2009. DOI: 10.1126/science.1172133

[15] da Silva, J., Kernaghan, S. and Luque, A., A systems approach to meeting the challenges of urban climate change. International Journal of Urban Sustainable Development, 4(2), pp. 125-145, 2012. DOI: 10.1080/19463138.2012.718279

[16] Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K. and Astaraie-Imani, M., A new approach to urban water management: Safe and Sure. Procedia Engineering, 89, pp. 347-354, 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.198

[17] Tahmasebi-Birgani, Y. and Yazdandoost, F., A framework for evaluating the persistence of urban drainage risk management systems. Journal of Hydro-environment Research, 8(4), pp. 330-342, 2014.

[18] de Bruijn, K., Resilience indicators for flood risk management systems of lowland rivers. International Journal of River Basin Management, 2(3), pp. 199-210, 2004. DOI:10.1080/15715124.2004.9635232

[19] Asah, S., Empirical social-ecological system analysis: from theoretical framework to latent variable structural equation model. Environmental Management, 42(6), pp. 1077-1090, 2008. DOI:10.1007/s00267-008-9172-9

[20] Milman, A. and Short, A., Incorporating resilience into sustainability indicators: An example for the urban water sector. Global Environmental Change, 18, pp. 758-767, 2008. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2008.08.002

[21] Mens, M., Klijn, F., Bruijn, K. and van Beek, E., The meaning of system robustness for flood risk management. Environmental Science & Policy, 14(8), pp. 1121-1131, 2011. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.08.003

[22] Schelfaut, K., Pannemans, B., van der Craats, I., Krywkow, J., Mysiak, J. and Cools, J., Bringing flood resilience into practice: The FREEMAN project. Environmental Science and Policy, 14(7), pp. 825-833, 2011. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.02.009

[23] Hashimoto, T., Stedinger, J. and Loucks, D., Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research, 18(1), pp. 14-20, 1982. DOI: 10.1029/WR018i001p00014

[24] Moy, W., Cohon, J. and ReVelle, C., A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. Water Resources Research, 22(4): pp. 489-498, 1986. DOI: 10.1029/WR022i004p00489

[25] Maier, H., Lence, B., Tolson, B. and Foschi, R., First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience. Water Resources Research, 37(3), pp. 779-790, 2001. DOI: 10.1029/2000WR900329

[26] Kjeldsen, T. and Rosbjerg, D., Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. Hydrological Sciences Journal, 49(5), pp. 755-767, 2004. DOI: 10.1623/hysj.49.5.755.55136

[27] Li, Y. and Lence, B., Estimating resilience for water resources systems. Water Resources Research, 43(7), 2007. DOI: 10.1029/2006WR005636

[28] Wang, C. and Blackmore, J., Resilience concepts for water resource systems. Journal of Water Resources Planning and Management, 135(6), pp. 528-536, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:6(528)

[29] Liu, D., Chen, X. and Nakato, T., Resilience assessment of water resources system. Water Resources Management, 26(13), pp. 3743-3755, 2012. DOI: 10.1007/s11269-012-0100-7

[30] Todini, E., Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban Water, 2(2), pp. 115-122, 2000. DOI: 10.1016/S1462-0758(00)00049-2

[31] Yazdani, A., Otoo, R. and Jeffrey, P., Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. Environmental Modelling & Software, 26(12), pp. 1574-1582, 2011. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.07.016

[32] Ning, X., Liu, Y., Chen, J., Dong, X., li, W. and Liang, B., Sustainability of urban drainage management: a perspective on infrastructure resilience and thresholds. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 7(5), pp. 658-668, 2013. DOI: 10.1007/s11783-013-0546-8

[33] Mugume, S., Gomez, D., Fu, G., Farmani, R. and Butler, D., A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. Water Research, 81, pp. 15-26, 2015. DOI: 10.1016/j.watres.2015.05.030

[34] Birgani, Y. and Yazdandoost, F., Resilience in urban drainage risk management systems, Proceedings of the ICE - Water Management, 2015. pp. 1-13.

[35] de Bruijn, K., Resilience and flood risk management. Water Policy [Online]. 6(1), 2004. [date of reference March 2016]. Available at: http://wp.iwaponline.com/content/6/1/53

[36] Mugume, S., Goméz, D. and Butler, D., Quantifying the resilience of urban drainage systems using a hydraulic performance assessment approach, 13th International Conference on Urban Drainage, 2014. pp. 1-9.

[37] Gómez-Luna, E., Navas, D., Aponte-Mayor, G. y Betancourt-Buitrago, L., Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. DYNA [Online]. 81(184), 2014. [date of reference March 2016]. Available at: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49630405022

[38] Agrawal, A., Using RefViz© with EndNote [Online]. Springer Science + Business Media, 2006 [date of reference March 2016], cap. 12, Endnote 1-2-3 Easy!: Reference Management for the Professional. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-0-387-95901-6_12

[39] Bruneau, M. and Reinhorn, A., Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. Earthquake Spectra, 23(1), pp. 41-62, 2007. DOI: 10.1193/1.2431396

[40] Pandit, A., Resilience of urban water systems: An 'Infrastructure Ecology' approach to Sustainable and Resilient (SuRe) planning and design, Ph.D. Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2014.

[41] Mugume, S., Diao, K., Astaraie-Imani, M., Fu, G., Farmani, R. and Butler, D., Enhancing resilience in urban water systems for future cities. Water Science and Technology: Water Supply, 15(6), pp. 1343-1352, 2015. DOI: 10.2166/ws.2015.098

[42] Anderies, J., Folke, C., Walker, B. and Ostrom, E., Aligning key concepts for global change policy: Robustness, resilience, and sustainability. Ecology and Society, 18(2), 8, 2013. DOI: 10.5751/ES-05178-180208

[43] Balsells, M., Barroca, B., Amdal, J., Diab, Y., Becue V. and Serre, D., Analysing urban resilience through alternative stormwater management options: Application of the conceptual Spatial Decision Support System model at the neighbourhood scale. Water Science & Technology, 68(11), pp. 2448-2457, 2013. DOI: 10.2166/wst.2013.527

S.A. Blanco-Londoño, received the BSc. Eng in Civil Engineering in 2008, and the MSc degree in Water Resources in 2014. He is currently a PhD student in Sanitary and Environmental Engineering at the Universidad del Valle - Cali, Colombia. His research interests include hydraulic and hydrological modelling, water sanitation, sustainability and resilience.
ORCID: 0000-0002-2048-268X

P. Torres-Lozada, received the BSc. Eng in Sanitary Engineering in 1988, the MSc. degree in Civil Engineering: Hydraulics and Sanitation in 1992, and the PhD degree in Civil Engineering: Hydraulics and Sanitation in 2001. She is currently a titular professor of the Faculty of Engineering of the Universidad del Valle - Cali, Colombia and a senior researcher in call for COLCIENCIAS-2016. Her research interests include water quality and treatment, treatment of wastewater, solid waste and soil.
ORCID: 0000-0001-9323-6677

A. Galvis-Castaño, received the BSc. Eng in Sanitary Engineering in 1979, and MSc. degree in Industrial and Systems Engineering in 1998. He is currently a titular professor of the Faculty of Engineering of the Universidad del Valle - Cali, Colombia. His research interests include technology selection in water and sanitation and mathematical modelling applied to the planning and management of water resources.
ORCID: 0000-0002-4158-1919

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

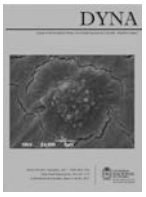
Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Manufacturing and evaluation of Chitosan, PVA and Aloe Vera hydrogels for skin applications

Diana Marcela Escobar-Sierra [a] & Yuli Paola Perea-Mesa [b]

[a] *Biomaterials Research Group, Engineering Faculty, University of Antioquia - UdeA, Medellin, Colombia. marcela.escobar@udea.edu.co.*
[b] *Bioengineering, Engineering Faculty, University of Antioquia - UdeA, Medellin, Clombia. yuli.perea@gmail.com*

Received: February 17th, 2017. Received in revised form: September 13th, 2017. Accepted: October 03rd, 2017.

Abstract
The aim of this research was to develop membranes of polyvinyl alcohol (PVA) and chitosan (CH), capable of absorbing an Aloe Vera solution and gradually releasing to accelerate wound healing. The methodology involved varying the membrane's composition using Chitosan and Polyvinyl Alcohol at 5 and 10% w/v, and implementing different PVA/CH relations of 30/70, 50/50 and 70/30 (v/v) and embed them in a 2% (v/v) Aloe Vera solution to create hydrogels. Once hydrogels were obtained, they were characterized by Infrared Spectroscopy and Scanning Electronic Microscopy, and evaluated by mechanical and absorption tests as well as bactericide activity assays. The crosslinking degree between PVA/CH allowed obtaining a matrix with high absorption capacity and with gradual release of Aloe Vera, with mechanical properties and dimensional stability even after rehydration. Bactericide assays showed chitosan and Aloe Vera protective activity, which indicates this compound may be suitable for applications that help in wound healing.

Keywords: Aloe Vera; Chitosan; Hydrogel; Mechanical Strength; Polyvinyl Alcohol.

Fabricación y evaluación de hidrogeles de Quitosano, PVA y Aloe Vera para aplicaciones cutáneas

Resumen
El objetivo fue desarrollar membranas de Polivinil Alcohol (PVA) y Quitosano (Qo), capaces de absorber solución de Aloe Vera y luego liberarla gradualmente para acelerar la cicatrización de la herida. La metodología empleada consistió en variar la composición de las membranas usando quitosano y Polivinil Alcohol al 5 y 10% p/v, e implementar diferentes relaciones de PVA/Qo de 30/70, 50/50 y 70/30 (v/v), para posteriormente embeberlas en solución de Aloe Vera al 2% (v/v) y formar hidrogeles. Una vez obtenidos, éstos fueron caracterizados por Espectroscopía de Infrarrojo y Microscopía Electrónica de Barrido, y evaluadas por pruebas mecánicas, pruebas de absorción, y ensayos de actividad bactericida.
El grado de entrecruzamiento entre el PVA y el Quitosano permitió obtener una matriz con alta capacidad de absorción y liberación controlada de Aloe Vera, con propiedades mecánicas y estabilidad dimensional aún después de rehidratadas. Las pruebas bactericidas mostraron actividad protectora del quitosano y del Aloe Vera, lo cual hace que este compuesto sea adecuado para aplicaciones que ayudan en la curación de heridas.

Palabras clave: Aloe Vera; Quitosano; Hidrogel; Resistencia Mecánica; Alcohol PoliVinilico

1. Introduction

Chitosan is a completely deacetylated *β-(l-4)-2-amino-2-desoxi-D-glucopiranose*, obtained by deacetylation of chitin through treatment in alkaline conditions. Is a non-toxic, biocompatible, and biodegradable polymer, which has attracted interest to a wide range of biomedical and pharmaceutical applications, cosmetics, and tissue engineering [1]. The use of biodegradable polymeric systems as implantable drug delivery systems is desirable, since the devices are degraded and eliminated from the body.

Biodegradable hydrogels would be ideal for the

How to cite: Escobar-Sierra, D.M. and Perea-Mesa, Y.P., Manufacturing and evaluation of Chitosan, PVA and Aloe Vera hydrogels for skin applications DYNA, 84(203), pp. 134-142, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

improvement of the existing dose form and the development of a new and better drug delivery system.

The incorporation of drugs in polymeric membranes forming hydrogels for the treatment and prevention of skin infections has been a common clinical practice due to the fact that hydrogels are a cross-linked network obtained from a macro- molecular hydrophilic polymer. It is stable upon swelling in water and capable of absorbing a large amount of water, which has caused great interest for several applications as drug delivery or wound protectors.

Thanks to its biocompatibility, hydrogels may be put in direct contact with wounds as they help hydrating the dead tissue, providing not-reactive materials that do not cause irritation and cooling the surface of the wound, help reducing pain and increasing patient's acceptance [1-3].

Hydrogels based on chitosan have shown very good properties when combined with drugs, as they are biocompatible and present swelling properties in aqueous mediums, among other features of interest. In addition to natural polymers, synthetic polymers also come to play an important role in the preparation of hydrogels helping to improve mechanical properties. Polyvinyl alcohol (PVA), polyacrylamide (PA) or polymethyl methacrylate (PMMA) polymer, strengthen the network by way of a crosslinking agent to confer to these improvements in mechanical properties, depending on the links are achieved and radical form entering the network [4-6].

The main objective of this research was to evaluate the effects of crosslinking on the mechanical properties of Aloe Vera embedded membranes so they can be used as hydrogels in medical applications by strengthening the network of chitosan adding polyvinyl alcohol to 5 and 10% as crosslinking agent [7-9].

2. Experimental

2.1. Preparation of CH/PVA membranes

A 1% (w/v) chitosan (CH) solution (Sigma Aldrich percentage deacetylation >75%) was solubilized in 1% (v/v) acetic acid (Merck) by magnetic stirring during 3 hours at room temperature until completing homogenization. Parallelly, 5% and 10% of Polyvinyl Alcohol (PVA) (Sigma Aldrich, 98% hydrolyzed) solutions were prepared varying the concentration for 5 and 10% (w/v), dissolving PVA in distilled water under constant stirring for 2 hours at 70°C.

To prepare membranes, solutions of Polyvinyl Alcohol and Chitosan were mixed for each concentration of PVA with magnetic stirrer during 30 min, to which relations 30/70, 50/50 and 70/30 v/v PVA/CH were varied; then the mixtures were molded to 60x15mm forms and isolated in the aeration chamber at room temperature for 24 hours to remove bubbles formed during the process. Upon completion, the mixtures were taken to the oven for 8 days at 40°C. Finally, dried membranes are removed from Petri dishes and labeled. All membranes were made in triplicate for each ratio of PVA/CH used.

2.2. Characterization of PVA/CH membranes

Obtained membranes were characterized by Fourier Transform Infra-Red (FTIR) on a Perkin Elmer Spectrum One model with a DTGS detector, with a wavelength range between 4000 and 400 cm^{-1} to observe the composition of present functional groups and to identify the corresponding bands of PVA/CH composite both membranes and hydrogels.

Morphological characterization of the membrane structure was carried out with Scanning Electron Microscopy (SEM) using a JEOL JSM 6490 LV microscope. Samples were fixed in a graphite tape, underwent a thin gold coating using vapor deposition techniques on a Denton Vacuum Desk IV computer and were analyzed under high vacuum mode. The surface was then scanned using 2000X and 5000X magnification in order to evaluate surface morphology and porosity of hydrogels before and after being embedded in a 2% Aloe Vera solution.

2.3. Mechanical tests

Specimens were prepared in tape form with dimensions of 114mm x 29mm of each PVA/CH (30/70, 50/50 and 70/30) sample with 5% and 10% PVA (as specified by the ASTM D882-09 [10] to polymers with thickness below 1mm), and brought to the Universal Testing Machine (DIGIMESS) using a 500 N load distribution and a 5 mm/min tension strain rate, to assess the mechanical properties of the crosslinked membranes. The ultimate strain and stress (from the point of failure), the modulus (from the slope of the linear region), and the Yield Strength were calculated from pattern and specimens prepared with various PVA percentages.

2.4. Aloe Vera absorption test

For this assay, a membrane with 22mm x 21mm dimensions was extracted, and it in turn was divided into three 22mm x 7mm fractions in order to carry out each test in triplicate. Each of the fractions was soaked in a 2% Aloe Vera solution (Cristaloe®) for 48 hours. Weight change measurements were performed in an electronic balance during two hours in order to achieve stability.

2.5. Antibacterial activity test

Antibacterial activity of PVA/CH hydrogels was carried out in the presence of two bacterial species: *Staphylococcus Aureus (S. Aureus) and Escherichia Coli (E.Coli),* placing hydrogels on 5mm diameter discs which were previously sterilized with ethylene oxide. Discs were embedded in a 2% Aloe Vera solution, seeded in agars inoculated with the bacterial strains in nutritive agar, and underwent incubation for 24 hours at 37°C. Hydrogel antibacterial inhibition was determined by measuring the diameter of each clear zone around the gel in millimeters, using a ruler. All of the operation procedures were carried out under aseptic conditions.

3. Results and Discussion

3.1. Appearance of PVA/CH membranes

Fig. 1 shows the appearance of PVA/CH membranes for several concentrations of PVA. As shown in Fig. 1, obtained

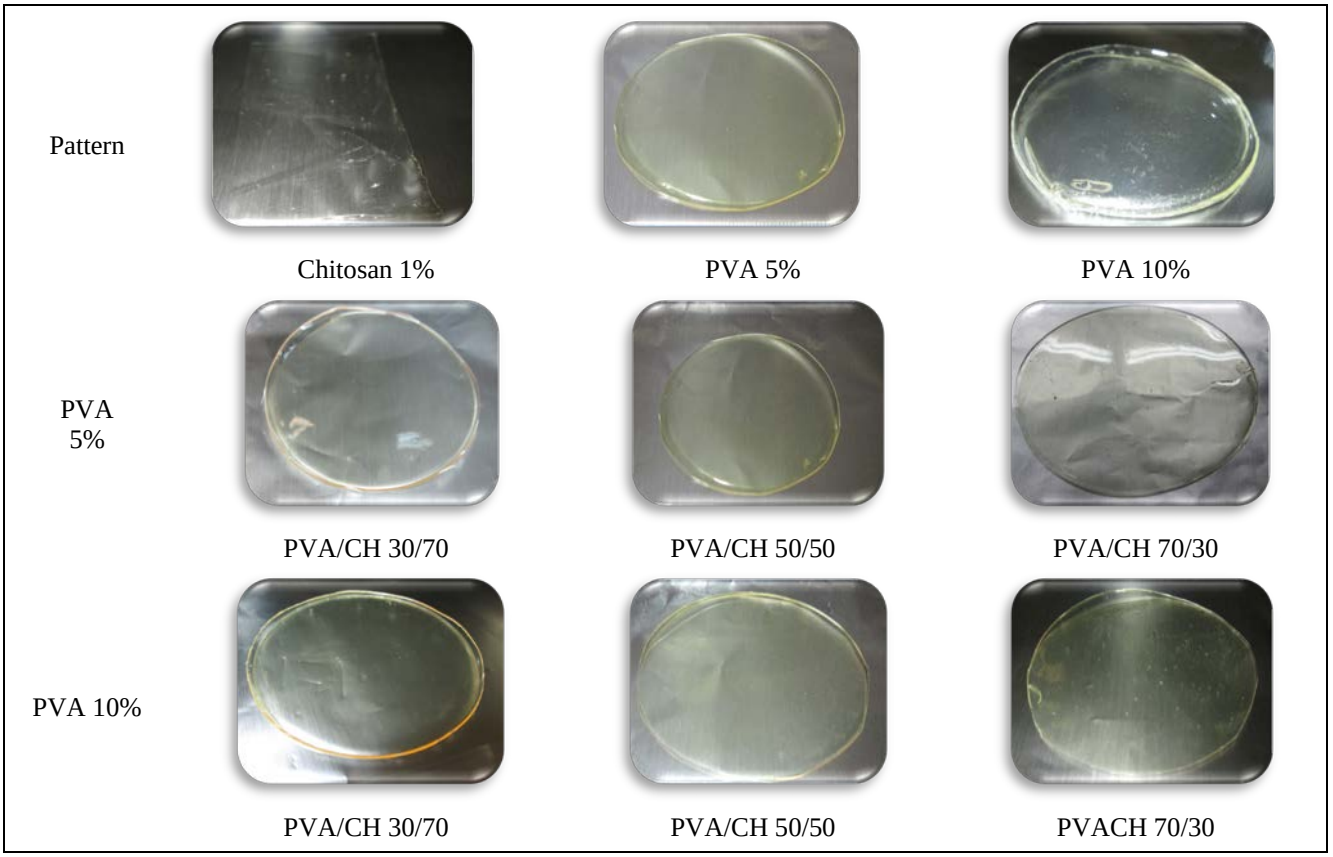


Figure 1. Photographs of PVA/CH membranes and pattern
Source: The Authors.

membranes are transparent, homogeneous and inflexible, have good consistency and their thickness is fairly uniform. After visual and tactile inspection, it is possible to determine that membranes with the lower PVA proportion are less rigid than the membranes with a higher PVA proportion. The conditions reported in the obtained membranes are similar to those reported by Zhao, [11] and León [12].

3.2. Characterization of PVA/CH membranes and pattern

Infrared spectra of the pattern and PVA/CH dry membranes (before imbibition in a 2% Aloe Vera solution) can be seen in Fig. 2.

Membranes made with pattern materials present typical bands and the pure PVA has a band between 3600 and 3100 cm^{-1} associated with the stretching of OH^- groups due to the strong hydrogen bonds, whereas the band located between 2950 and 2850 cm^{-1} refers to alkyl group (CH). In the chitosan spectrum, the band between 3600 and 3200 cm^{-1} is attributed to the extent of OH^- and NH, and the band at 1655 cm^{-1} corresponds to stretching in the amide I (C=O) NH_2 for 1580 cm^{-1}, and the band 1313 cm^{-1} corresponds to the amide III. All these correspond to what has been reported in the literature for both polymers [13].

PVA/CH membranes present increase in the bands between 3200 and 3600 cm^{-1} of the OH and NH_2 groups (with increasing percentage of chitosan and PVA) and bands between 2930 and 2850 cm^{-1} can be observed. However, in terms of chitosan amine NH_2, the displacement of the absorption band at 1580 cm^{-1} indicates that the amine interacts with the OH- groups of PVA

Interaction among amine groups (~ 800 cm^{-1}) and chitosan anomeric groups is evident, There are also bonds between double chains belonging to both molecules, which is evidenced by marked changes in transmittance, which shows a marked cross-linking of the molecules in these areas.

Pattern and PVA/CH hydrogels FTIR after imbibition in a 2% Aloe Vera solution can be seen in Fig. 3.

Fig. 3 shows how the band of OH^- of PVA in 3300 cm^{-1} lose definition for overlap with the C-H bonds of chitosan; a decrease in transmittance showing the formation of molecular bonds (crosslinking) is also evidenced. Thus, the PVA/CH 30/70 -10% PVA sample is above the PVA/CH 30/70 -5% PVA sample and in turn, the sample lies above the PVA/CH 50/50 -10% PVA. This could be attributed to the amount of water in the Aloe Vera solution, which reacted with the PVA and CH and incorporated itself into the interstitial spaces created by the polymeric network.

An increase is observed in the transmittance of the bonds between 2800 and 3000 cm^{-1}, denoting the formation of new peaks with greater transmittance, showing that these links were lost in the neo molecule formed of PVA/CH-Aloe Vera in lower proportion to PVA/CH 30/70 -10% PVA and increased in PVA/CH 50/50 -10% PVA and PVA/CH 30/70 -5% PVA samples.

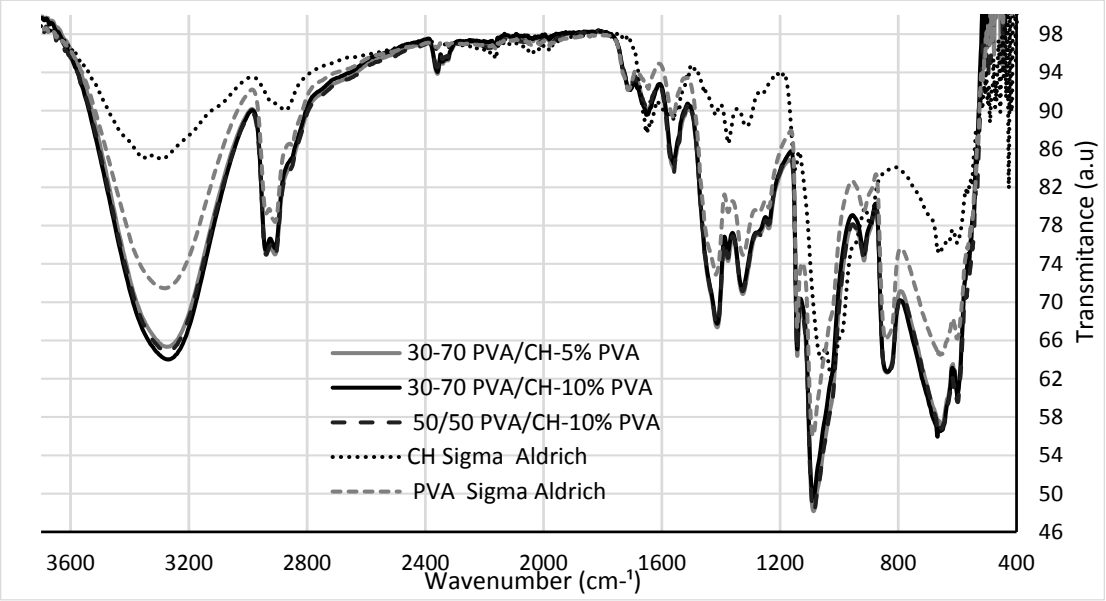


Figure 2. FTIR spectra of the standard membrane and crosslinking membranes
Source: The Authors

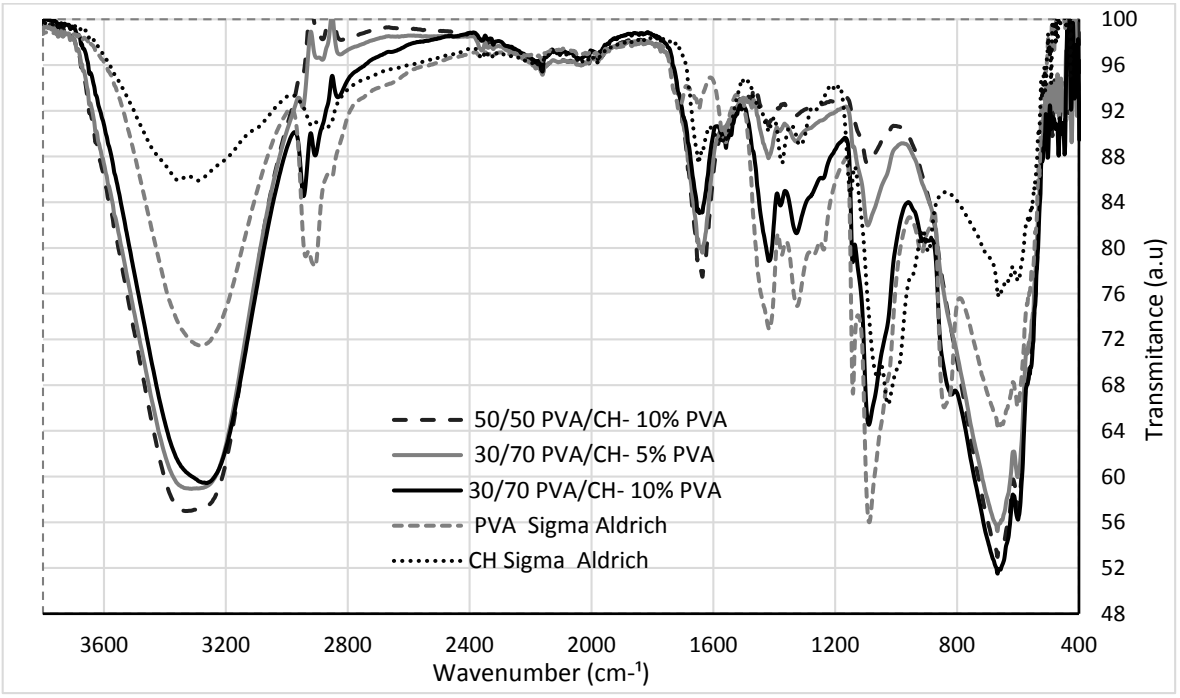


Figure 3. FTIR spectra of the standards and crosslinking samples embedded at 2% Aloe Vera
Source: The Authors.

Similarly, the formation of a carboxylic bond in the region of 1600 cm^{-1} is possibly due to the fact that Aloe Vera's aromatic groups reacted with PVA and Chitosan, decreasing transmittance in this area, showing a molecular bond, higher for PVA/CH 50/50 -10% PVA hydrogel, followed by PVA/CH 30/70 -5% PVA and finally PVA/CH 30/70 -10% PVA.

Changes were seen in PVA C-O-C bonds in 1000-1300 cm^{-1} and chitosan amide bond III (1250-1360 cm^{-1}). It can be seen that PVA/CH 30/70 -10% PVA hydrogel retains the defined shape of these peaks similarly to PVA, although transmittance increases, but in smaller amounts for the other two, showing a molecular link between the C-O-C and the chitosan amide bond.

Fig. 4 shows images obtained with Scanning Electronic Microscopy of membranes prepared varying PVA/CH with different percentages of PVA.

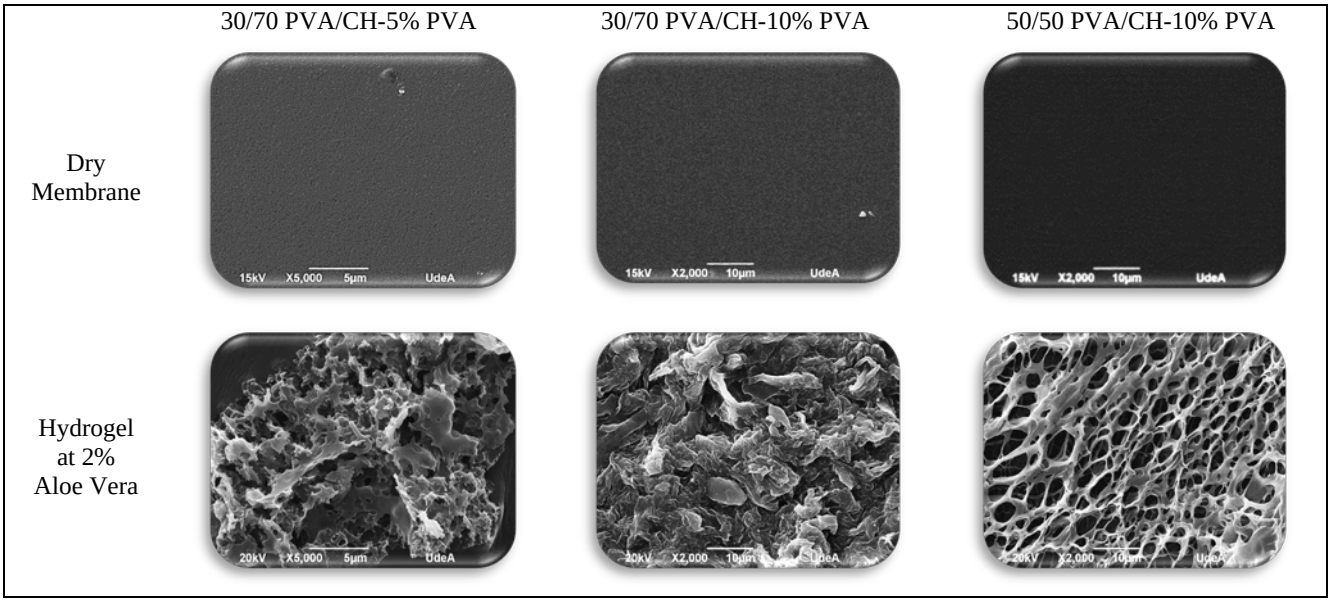


Figure 4. SEM images of PVA/CH membranes before and after imbibed at A*loe Vera*
Source: The Authors.

Before imbibing them in a 2% Aloe Vera solution (above), the texture of PVA/CH membranes is highly uniform and homogeneous, very similar in appearance, a fact that demonstrates the high reproducibility of the process. Apparent roughness or porous structures cannot be noticed, in accordance with the structure of the samples reported by Nagahama [14].

Fig. 4 show the action of Aloe Vera in the cross-linked network (down), which changes completely their morphology and appearance when compared to microscopy obtained in trials with the membranes (above images). Hydrogels imbibed in a 2% Aloe Vera solution show a highly porous morphology in the 50/50 PVA/CH -10% PVA hydrogel. Pores show different sizes, ovoid shapes and interconnections among them, which presumably means this hydrogel has good features to promote cell growth.

The 30/70 PVA/CH -5% PVA hydrogel shows flake-type morphology, and it is more widespread in the whole sample of the material; it also shows that the hydrogel can promote cell growth due to its morphology. It can be seen that 30/70 PVA/CH -10% PVA hydrogel also has a porous morphology, although this is not homogeneously distributed throughout the material. If compared to that observed before immersion, the change observed in the internal structure of these hydrogels is significant, because when entering the Aloe Vera solution on the network of each hydrogel, its porosity and morphology are not so flat and homogenous, and shows the structure formed by the PVA/CH.

All this indicates that, although the variation is small, the PVA/CH relation used can cause morphological changes. In addition, the structure obtained in these hydrogels enables cell growth, thanks to its porosity, as is described by De la Torre [4] and Sanchez [15]. When crosslink of PVA/CH increases; the porosity of hydrogel and the water diffusion into hydrogel also increases in agreement with Wikanta [16].

3.3. Mechanical tests

Different changes in chitosan's crosslinking degree have been used to achieve desired mechanical properties in the membranes. Increasing the system's crosslinking degree will result in stronger membranes. However, a higher crosslinking degree produces a more brittle structure. Hence, there is an optimum crosslinking degree to achieve relatively strong and elastic hydrogels [17]. Mechanical tests of chitosan membranes are showed in Fig. 5 and their properties in Table 1, both comparing pure chitosan and cross-linked membranes.

PVA/CH membranes for 5 and 10% PVA exhibited lower tensile strength, compared to pure chitosan, which can be attributed to the three-dimensional porous structure of the membrane for obtained crosslinking, in accordance with Zhao [11].

Similarly, to other tensile properties, it was found that the modulus generally increased with the increasing of chitosan percentage. Samples prepared at 5% PVA showed a higher Young modulus for 30/70 PVA/CH and 70/30 PVA/CH membranes, followed by 50/50 PVA/CH; this can be attributed to a less efficient crosslinking rate between PVA and chitosan. This means that as the chitosan network increases, the mechanical properties increase becoming most rigid the membrane, which is consistent with results reported by Cabrera [18] and De Souza [19].

In agreement with Drury [20], PVA/CH stress–strain curves were highly dependent on the strain rate, which is indicative of a viscoelastic material, which exhibits a nonlinear behavior, generally observed in tensile tests of synthetic fibers, tendons, and ligaments.

It is relevant to compare the mechanical properties of chitosan membranes and cross-linked membranes with the mechanical properties of tissues. The absolute values for the

Table 1.
Mechanical properties of PVA/CH membranes

Sample	*Yield Strength (Mpa)*	*Tensile Strength (Mpa)*	*Young's Modulus (Mpa)*
PVA 5%	8,81	11,30	7,88
PVA 10%	14,07	18,37	11,60
CH 1%	28,98	30,55	98,90
30/70 PVA/CH -5% PVA	9,84	12,30	18,70
50/50 PVA/CH -5% PVA	10,60	13,76	14,35
70/30 PVA/CH -5% PVA	18,16	25,83	18,14
30/70 PVA/CH -10% PVA	14,51	15,78	67,00
50/50 PVA/CH -10% PVA	10,45	19,72	11,50
70/30 PVA/CH -10% PVA	15,41	26,46	13,36

Source: The Authors.

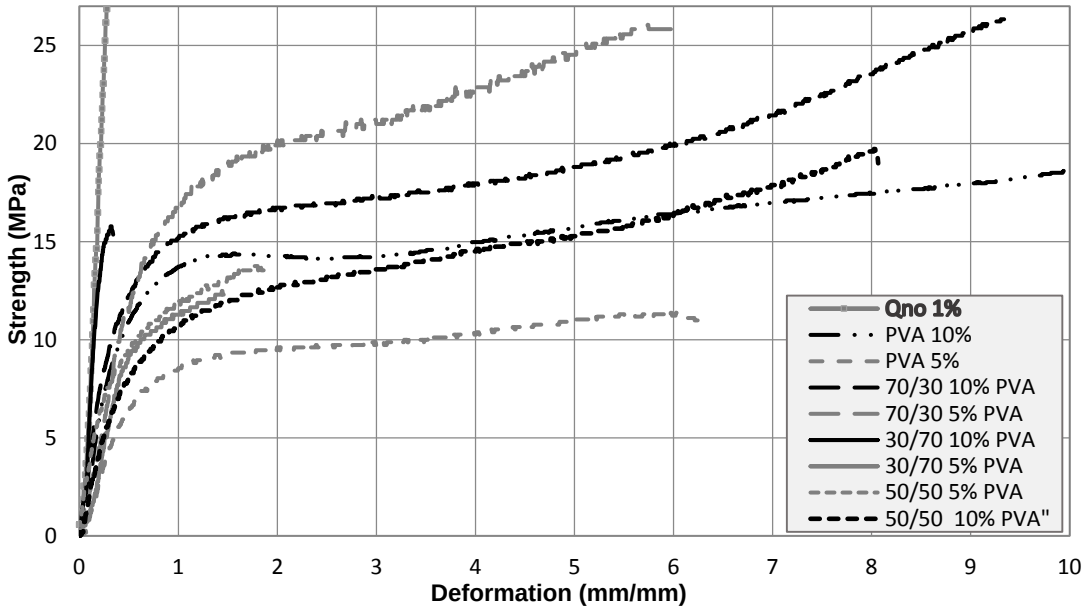


Figure 5. Stress-strain curve of PVA/CH membranes
Source: The Authors.

ultimate stress and modulus of cross-linked membranes are several orders of magnitude smaller than non-mineralized tissues, as skin or muscle (KPa versus MPa) [21]. This suggests that chitosan is mechanically too weak to be used as a replacement for tissues, so it can be improved with PVA addition.

The results of the tensile test show that the CH membranes are more rigid, have higher Young's modulus, yield strength and Tensile Strength compared to pure PVA samples. While for PVA/CH membranes, values of yield strength and Tensile Strength are lower, but when the PVA/CH relation increases, tensile strength increases according as PVA concentration increases. Samples with PVA/CH -10% PVA showed a yield rate similar to the pattern of 10% PVA, as shown in the Table 1.

3.4. Aloe Vera absorption

Fig. 6 shows the absorption capacity of evaluated membranes. According to swelling experiments, membranes absorbed water very quickly, reaching a swelling equilibrium during the first 3 hours, with an increase in volume appreciably noticed by visual inspection of the samples, in agreement with Tang [22].

Water absorption of hydrogels may be supported by hydroxyl groups of PVA and amino groups of chitosan, which interact with water molecules through hydrogen bond, and by the presence of a porous network in the hydrogel. Chitosan's absorbing rate is highly improved by the presence of PVA, and its value is not dependent of the PVA/CH ratio, in agreement with Borzacchiello [23].

Fig. 6a shows that the CH sample absorbs more water in its network (almost 8 times its weight). PVA patterns showed an increase in absorption of approximately 50%, the 10% PVA hydrogel was more stable through time.

The CH hydrogel showed a tendency to continue absorbing, and the 5% PVA hydrogel showed a tendency towards desorption, with lower absorption values at 48 hours. This water absorption may be supported by hydroxyl groups of PVA and amino groups of CH which interacted with water molecules through hydrogen bond, and by the presence of a porous network in the hydrogel.

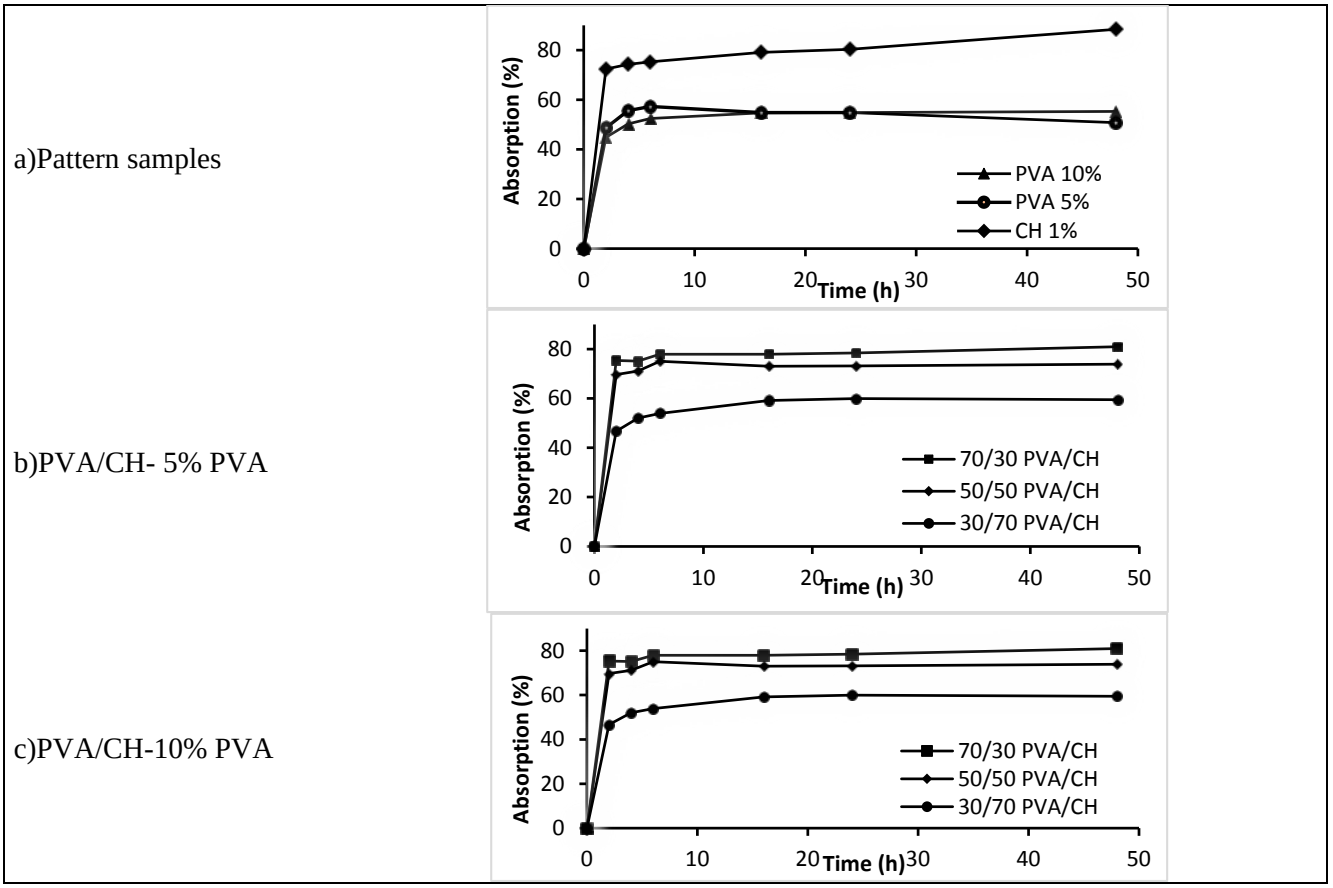


Figure 6. Absorption percentage of hydrogels at 2% Aloe Vera through time
Source: The Authors.

Cross-linked hydrogels (Fig. 6b and 6c) show greater absorption capacity when the PVA is at higher concentrations, indicating a suitable cross-linking among molecules, in agreement with Wikanta [16]. Fig. 6b for 5% PVA hydrogels shows that the 30/70 PVA/CH hydrogel is the worst of the three hydrogels with other PVA/CH relationships, as the other two fractured in 6 hours after starting absorption, while 70/30 and 50/50 PVA/CH -5% achieving a 75% water gain, with an appropriate texture and transparency suitable for medical use.

Fig. 6c shows the good performance of 50/50 PVA/CH and 70/30 PVA/CH at 10% PVA hydrogels. The absorption curve of the 70/30 PVA/CH hydrogel achieves high absorption values near 80%, but shows a tendency to continue absorbing; despite having achieved a 60% absorption, the 30/70 PVA/CH hydrogel is stable after 48 hours, reaching stability value at 16 hours.

While 50/50 PVA/CH hydrogel showed a good performance and stability at 48 hours, its texture is less rigid than the 70/30 PVA/CH, and takes a whitish, translucent and is not restored once with the solution of Aloe Vera, a situation that is not considered feasible for the observation of the wound during treatment, enforcement is sought with this study.

The comparison between chitosan membrane and PVA/CH crosslinked membranes has shown a water percentage decrease in the total mass of wet membrane. An average of 80% for chitosan membrane versus 50% for crosslinked PVA/CH membrane could be observed. This result confirms how water absorption is drastically changed by the PVA percentage incorporated, in agreement with that reported by Beppu [24].

3.5. Antibacterial activity

Fig 7 shows Inoculation of PVA/CH discs in bacterial cultures: Left: E. Coli, right: S. Aureus for 24 hours.

The clear zones diameter formed represent PVA/CH hydrogel the inhibition activity tested. Samples were analyzed in order to reveal the antibacterial activity of 30/70 PVA/CH for PVA 5 and 10%, and 50/50 PVA/CH-10% PVA embedded in a 2% Aloe Vera solution. After incubation, it was only possible to see bacteriostatic activity for *S. Aureus*, for a period of 8 hours in lower content PVA (30/70 PVA/CH -5%), as can be seen in Fig. 7c.

After this period, *S. Aureus* proliferates normally. After 24 hours, all samples showed no bacterial growth inhibitory halo, or bacteriostatic, both for *S. Aureus* and *E. Coli*, according to that reported by Wikanta [16], also pattern culture medium solution Aloe Vera showed a slight bacterial growth could be due to environmental pollution, despite all the media were sterilized and previously worked in older aseptically.

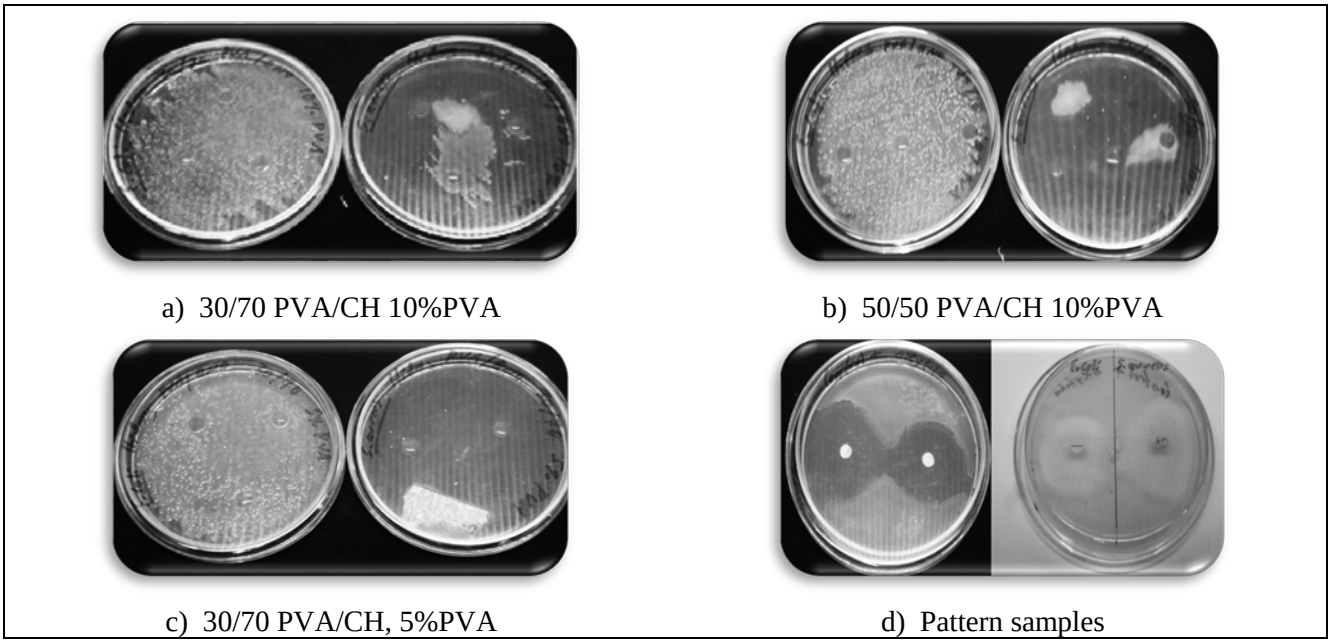


Figure 7. Inoculation of PVA/CH discs in bacterial cultures: Left: *E. Coli*, right: *S. Aureus*
Source: The Authors.

Those results differ from findings reported by Leon [12], in which other zones of inhibition of bacterial growth of S. Aureus in PVA/CH hydrogels with Dragon's blood solution were presented, and these films only exhibited activity against S. Aureus, while in this study no bacteriostatic or bactericidal activity was not presented to E. Coli.

The positive and negative patterns behaved as expected; there was growth in negative pattern and showed the halo of inhibition in the positive pattern for S. Aureus and E. Coli.

Results showed that all hydrogels containing PVA/CH inhibited the growth of the bacteria tested with bigger inhibition zone than pattern hydrogel. The antibacterial properties of hydrogel containing chitosan are due to a positive charge of the amino groups in chitosan, and to its ability to bind to a negative charge in bacteria, and its effectiveness did not depend solely on the chitosan formulation but also on the type of fungus [25,26].

4. Conclusions

It was possible to obtain a hydrogel suitable to be used in tissue engineering (30/70 PVA/CH -10% PVA) with appropriate crosslinking degree, good mechanical properties, absorption capacity, morphological, and that managed to retain bacterial growth during 8 hours, thanks to the incorporation of Aloe Vera in the network.

The hydrogels obtained with PVA/CH mixtures have properties that are different to pure PVA hydrogel mechanical. The latter is very flexible and has low absorbency. Instead, mixtures hydrogels have good flexibility and good absorption capacity.

The study of these polymeric media for the controlled release of active ingredients, it marks for the development of new biocompatible devices. This study generated a hydrogel which has good features allowing it to be implemented in the future as a releasing medium and chitosan Aloe Vera, however, should kinetic release studies should be performed soon, in vivo studies and improve the bactericidal properties of the device for cutaneous applications.

Acknowledgment

The authors wish to thank to CODI of University of Antioquia for the financial support given to the project, and Biomaterials Research Group BIOMAT of University of Antioquia.

References

[1] Tapan, K, Amrita, T, Amit, A., Ajazuddin, H. and Krishna, T., Modified chitosan hydrogels as drug delivery and tissue engineering systems: Present status and applications. Acta Pharmaceutica Sinica B. 2(5), pp. 439-449, 2012. DOI: 10.1016/j.apsb.2012.07.004

[2] Arredondo, P. y Londoño, M., Hidrogeles potenciales biomateriales para la liberación controlada de medicamentos. Revista Ingeniería Biomédica. [online]. 3(5), pp. 83-94, 2009. Available at: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-97622009000100013&lng=es&nrm=iso

[3] Arredondo, A, Patiño, J, Londoño, M. y Echeverri, C., Matriz a partir de un hidrogel de alcohol polivinílico combinada con sulfadiazina de plata con potencial aplicación en el manejo y control de la sepsis en heridas dérmicas. Revista Iberoamericana de Polímeros. [online]. 12(4), pp. 178-187, 2011. Availabel at: http://www.reviberpol.iibcaudo.com.ve/pdf/AGO11/arredondo.pdf

[4] De la Torre, M., Hidrogeles poliónicos de chitosán y ácido poliacrílico como sistema de liberación de amoxicilina para el tratamiento de h. pylori. Tesis Doctoral, Facultad de Farmacia. Universidad Complutense, Madrid, España. 2003, 310 P. Disponible en: http://biblioteca.ucm.es/tesis/far/ucm-t26645.pdf

[5] Katime, I., Katime, O. y Katime, D., Materiales inteligentes: Hidrogeles macromoleculares, algunas aplicaciones biomédicas. Anales de la Real Sociedad Española de Química, [en línea]. pp. 35-50, 2005. Disponible en: http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1354681

[6] Madhumathi, K., Shalumon, K., Divya-Rani, V., Tamura, H., Furuike, T. and Selvamurugan, N., Wet chemical synthesis of chitosan hydrogel–hydroxyapatite composite membranes for tissue engineering applications. International Journal of Biological Macromolecules. 45, pp. 12-15, 2009. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2009.03.011

[7] Echeverri, C., Vallejo, C. y Londoño, M., Síntesis y caracterización de hidrogeles de Polivinil Alcohol por la técnica congelamiento/descongelamiento para aplicaciones médicas. Revista EIA, [en línea]. 12, pp. 59-66, 2009. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372009000200005

[8] Escobar, J., Katime, I. y Zaldivar, D., Hidrogeles principales características en el diseño de sistemas de liberación controlada de fármaco. Revista Iberoamericana de Polímeros, [en línea]. 3(3), pp. 1-25. 2002. Disponible en: http://www.reviberpol.iibcaudo.com.ve/pdf/publicados/escobar2.pdf

[9] Bustamante B,J.E. y Carrascal, L.M., Estandarización de la tecnica espectrofotométrica (UV-VIS) para la cuantificación de antraquinonas presentes en productos a base de Aloe Vera. Trabajo de Grado, Escuela de Química, Programa de Tecnologia Química. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. [en línea]. 2010, 68 P. Disponible en: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1800/54308520218B982.pdf?sequence=1

[10] ASTM International. ASTM D88212 Standard Test Method for Tensile Properties of thin Plastic Sheeting. ASTM. International, [online]. 2012. Available at: https://www.astm.org/Standards/D882.htm

[11] Zhao, S., Ji, Q., Xing, K., Li, X., Liu, C. and Chen, X., Preparation and characteristics of novel porous hydrogel films based on chitosan and glycerophosphate. Carbohydrate polymers, 76, pp. 410-416, 2009. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.11.020

[12] Leon, K. y Santiago, J., Propiedades antimicrobianas de películas de quitosano/PVA embebidas en extracto de sangre de grado. Revista Sociedad Química de Perú. [en línea]. 73, pp. 158-165, 2007. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2007000300005

[13] Dos Santos, B, Da Silva, R. y Farias, I., Morfologia e propriedades térmicas de blendas de poli(álcool vinílico)/quitosano. Revista Iberoamericana de Polímeros. [en línea]. 17(3), pp. 139-144, 2016. Disponible en: http://www.reviberpol.iibcaudo.com.ve/pdf/MAY16/santos.pdf

[14] Nagahama, H., Maeda, H., Kashiki, T., Jayakumar, R. and Tamura, H., Preparation and characterizacion of novel chitosan/gelatin membranes using chitosan hydrogel. Carbohydrate polymers, 76, pp. 255-260, 2009. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.10.015

[15] Sánchez, B., Sibaja, B., Vega, J. y Madrigal, C., Síntesis y caracterización de hidrogeles de quitosano obtenido a partir del camarón langostino (Pleuroncodes Planipes) con potenciales aplicaciones biomédicas. Revista Iberoamericana de Polímeros, [en línea]. 8(4), pp. 241-267, 2007. Disponible en: http://www.reviberpol.iibcaudo.com.ve/pdf/SEP07/sanchez.pdf

[16] Wikanta, T, Erizal, Tjahyono and Sugiyono, Synthesis of polyvinyl alcohol-chitosan hydrogel and study of its swelling and antibacterial properties Squalen, [online]. 7(1), pp. 1-10, 2012. Available at: http://www.bbp4b.litbang.kkp.go.id/squalen-bulletin/index.php/squalen/article/download/10/8

[17] Peppas, N, Buresa, P, Leobandung, W. and Ichikawa, H., Hydrogels in pharmaceutical formulations. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 50, pp. 27-46, 2000. DOI: 10.1016/S0939-6411(00)00090-4

[18] Cabrera, J, Paredes, C. y, Urday, E., Preparación y caracterización de películas de Polivinil Alcohol conteniendo nanoparticulas de TiO2. Revista Iberoamericana de Polímeros, [en línea]. 8, pp. 323-333, 2007. Disponible en: http://www.reviberpol.iibcaudo.com.ve/pdf/SEP07/cabrera.pdf

[19] De Souza, E. and Sander, H., Preparação e caracterização de blendas de quitosana/PVA reticuladas quimicamente com glutaraldeído para aplicação em engenharia de tecido. Quimica Nova, 31(6), pp. 1460-1466, 2008. DOI: 10.1590/S0100-40422008000600034

[20] Drury, J., Dennis, R. and Mooney, D., The tensile properties of alginate hydrogels. Biomaterials. 25, pp. 3187-3199, 2004. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2003.10.002

[21] Park, J.B. and Lakes, R.S., Chapter 9: Structure-property relationships of biological materials. In: Biomaterials: An introduction, 2ª ed. New York: Plenum Press; pp: 185-222, 2001. DOI: 10.1007/978-0-387-37880-0_9

[22] Tang, Y., Du, Y., Li, Y. and Wang, X., A thermosensitive chitosan/polyvinyl alcohol hydrogel containing hydroxyapatite for protein delivery. Journal of Biomedical Materials Research (A) pp. 953-963, 2008. DOI: 10.1002/jbm.a.32240.

[23] Borzacchiello, A., Ambrosio, L., Netti, P., Peniche, C., Gallardo, A. and San Román, J., Chitosan based hydrogels: Synthesis and characterization. Journal of Materials Science: Materials in Medicine. [online]. 12, pp: 861-864, 2001. Available at: https://link.springer.com/article/10.1023/A:1012851402759

[24] Beppu, M., Vieira, R., Aimoli, C. and Santana, C., Crosslinking of chitosan membranes using glutaraldehyde: Effect on ion permeability and water absorption. Journal of Membrane Science, 301, pp. 126-130, 2007. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.06.015

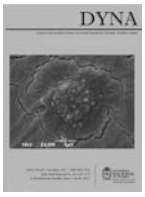
[25] Ing, L., Zin, N., Sarwar, A. and Katas. H., Antifungal activity of chitosan nanoparticles and correlation with their physical properties. International Journal of Biomaterials, 2012, pp. 1-9, 2012. DOI: 10.1155/2012/632698

[26] Tikhonov, V., Stepnova, E., Babak, V., Yamskov, I., Palma, J., Jansson, H. and Salinas, J., Bactericidal and antifungal activities of a low molecular weight chitosan and its N-/2(3)-(dodec-2-enyl)succinoyl/-derivatives. Carbohydrate Polymers. 64, pp. 66-72, 2006. DOI: 10.1016/j.carbpol.2005.10.021

D.M. Escobar-Sierra, received the BSc. Eng in Metallurgical Engineering in 1996, the PhD. degree in Chemical Sciences in 2003, all of them from the University of Antioquia, Medellin, Colombia. From 1996 to 2003, she worked for Corrosion Group of the University of Antioquia. Currently, she is a titular professor in the Bioengineering Program, Faculty of Engineering, University of Antioquia. Founder and director of Biomaterials Research Group – BIOMAT. Her research interests include: biomaterials, characterization of biomaterials, electrochemical, corrosion, bioceramics and biopolymer for medical applications.
ORCID: 0000-0002-6013-7039

Y.P. Perea-Mesa, received the BSc. Eng in Bioengineering in 2015, she worked in groups and projects of the Bioengineered area, with emphasis on biomaterials, biomechanical and engineered clinical and since 2011 to 2015 was in the investigation group BIOMAT of the University of Antioquia, where performed the project of investigation Manufacturing and evaluation of Chitosan, PVA and Aloe Vera hydrogels for skin applications, as a degree work, which was financed by the committee for the development of research CODI of the University of Antioquia, Colombia.
ORCID: 0000-0002-8114-4166

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

A new mathematical model for coal flotation kinetics

Juan Sebastián Guerrero-Pérez & Juan Manuel Barraza-Burgos

Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías, Universidad del Valle, Cali, Colombia. juan.guerrero.perez@correounivalle.edu.co, juan.barraza@correounivalle.edu.co

Received: February 11th, de 2017. Received in revised form: September 12th, 2017. Accepted: October 4th, 2017

Abstract
This study describes the development and formulation of a novel mathematical model for coal flotation kinetic. The flotation rate was considered as a function of chemical, operating and petrographic parameters for a global flotation order n. The equation for flotation rate was obtained by dimensional analysis using the Rayleigh method. It shows the dependency of flotation kinetic on operating parameters, such as air velocity and particle size; chemical parameters, such as reagents dosage and solids content; and mineral and maceral composition of coal. The flotation rate equation integrates the kinetic coefficient and the intrinsic characteristics of coal with dimensional consistency, and it is expressed by three dimensionless numbers which have physical chemical meaning. The model also exhibits similarities with traditional transport phenomena models represented by dimensionless numbers and predicts the flotation kinetic constant of a Colombian coal sample showing a good correlation between experimental and calculated values.

Keywords: coal flotation; flotation rate; kinetic model.

Un nuevo modelo matemático para la cinética de flotación de carbones

Resumen
Este estudio describe el desarrollo y formulación de un nuevo modelo matemático para la cinética de flotación de carbón. La velocidad de flotación se considera una función de parámetros químicos, operacionales y petrográficos para la flotación global de orden n. La ecuación de velocidad de flotación se obtuvo por análisis dimensional usando el método de Rayleigh. Este método muestra la dependencia de la cinética de flotación sobre los parámetros de operación tales como velocidad del aire y tamaño de partícula; parámetros químicos tales como dosis de reactivos y contenidos de sólidos; y composición mineral y maceral del carbón. La ecuación de velocidad de flotación integra el coeficiente cinético y las características intrínsecas del carbón con consistencia dimensional, y se expresa por tres números adimensionales que tienen significado químico físico. El modelo también muestra similitudes con los modelos tradicionales de fenómenos de transporte representados por números adimensionales y predice la constante cinética de flotación de un carbón Colombiano mostrando buena correlación entre los valores experimentales y calculados.

Palabras clave: flotación de carbón; tasa de flotación; modelo cinético.

1. Introduction

The flotation rate constant is necessary to scale-up flotation units on an industrial scale from results obtained in laboratory. This constant also offers a way to evaluate and predict the performance of flotation equipment and determine the effect of operating parameters on flotation efficiency. As a result of this, many years of research have tried describing the flotation process with mathematical models involving the flotation rate constant and coefficients with physical, chemical and/or statistical meaning. These efforts have shown that the adjustment grade of each model to experimental results is sensitive to many factors and depend on the mineral type, the equipment and the operating parameters. For that reason, there is no predominantly acceptable model in the research area [1]. Each model may be applied to the flotation of a material on specific conditions and this leads to many kinetic expressions with restricted applications on the flotation of different minerals [2].

Some sources [3-5] state that the classic first-order

How to cite: Guerrero-Pérez, J.S. and Barraza-Burgos, J.M., A new mathematical model for coal flotation kinetics DYNA, 84(203), pp. 143-149, December, 2017.
© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

flotation model is the most widely accepted approach and the model most widely used to optimize the design of a flotation circuit. Although there are numerous mathematical models, most of them are derived from the statement that the flotation follows a first-order kinetic, and some of these models are modified versions of the classic model including other parameters or functions (e.g. the flotation rate distribution). Kelsall's kinetic model [3], for example, incorporates two rate terms instead of one rate constant, but still considers the flotation as a first-order process. Even studies of different approaches as multi-phase second-order kinetic models [2], concluded that the best fit of the experimental data was observed in first-order kinetic models.

The classic flotation model, which relates the kinetics of a chemical reaction to the flotation kinetic, is one of the most applied models [3-5] and still constitutes the research base of recent mineral flotation studies published in 2015 – 2017 [6-12]. This model assumes that flotation occurs as a chemical reaction (A + B → C) where the bubble establishes a bond with a solid particle to produce the bubble-particle attachment, as shown in Fig. 1.

As a chemical reaction in a constant-volume batch reactor, the kinetic of the flotation process is described by eq. (1), where C_p and C_b are the concentrations of particles and bubbles respectively, t is the time, n and m are the orders of reaction and k is the flotation rate constant.

$$-\frac{dC_p}{dt} = kC_p^n C_b^m \tag{1}$$

The classic model considers that flotation follows a first-order kinetic, with n = 1 [13]. Since the airflow is kept constant during the process, the flotation rate depends on the solid particles and is linearly dependent on their concentration. Therefore, the flotation process is represented by eq. (2) as a differential equation.

$$-\frac{dC_p}{dt} = kC_p \tag{2}$$

After integration, the kinetic expression in terms of the concentration of particles that remain in the system at t = t, C_t, and the initial concentration of particles, C_0, is given by eq. (3).

$$ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = -kt \tag{3}$$

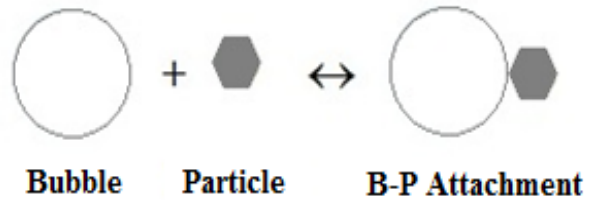


Figure 1. Approach of the classic flotation model
Source: The authors.

In the case of coal flotation, the combustible recovery, R, is expressed by eq. (4) as a function of the initial concentration and the concentration of remaining particles. Then, the coal flotation kinetic in terms of combustible recovery is given by eq. (5). According to this model, the flotation rate constant can be obtained from a data set of combustible recovery as a function of time, which can be measured in conventional flotation equipment [14].

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \tag{4}$$

$$ln(1 - R) = -kt \tag{5}$$

Since it is not possible to obtain 100% combustible recovery in real flotation systems, the classic model is modified, including a maximum recovery parameter, R_∞, which represents the maximum recovery after a long flotation time. Thus, the flotation kinetic can be expressed by eq. (6). Despite of the acceptance of this first-order kinetic model, there is an unresolved controversy about the order of the flotation process [5]. Klassen and Mokrousov [15] suggested that the flotation order n most frequently equals 1, less frequently equals 2 and seldom 3 or more. De Bruyn and Modi [16] observed first order rates for the flotation of fine particles if the solids content in the pulp is less than 5.2%. Tomlinson and Fleming [17] also observed that the flotation is a first-order process when the solids concentration in the pulp is low. When the concentration is high, the flotation behaves as a zero-order process.

$$ln\left(1 - \frac{R}{R_\infty}\right) = -kt \tag{6}$$

Following the approach of the classic first-order model, Yoon and Mao [18] proposed that the flotation rate constant is a function of both hydrodynamic parameters and surface phenomena, given by eq. (7), where S_b is the superficial surface area rate of bubbles, and P is the probability of the particles being collected by air bubbles.

$$k = \frac{1}{4} S_b P \tag{7}$$

The superficial surface area rate of bubbles, S_b, is defined as the bubble surface area moving out of the cell per unit time per unit cross-sectional area, and it is a function of the superficial gas velocity and the bubble size. The probability of collection, P, is a function of the hydrodynamics of the system and all dominant surface forces found in flotation [19]. The complexity of calculating k, from surface and hydrodynamic parameters, justified the appearance of kinetic expressions as a function of operating parameters affecting the flotation and can be measured more easily [20]. Zhang [21] presented a review of kinetic expressions based on the classic flotation model. Szatkowski and Freyberger [22] expressed the flotation rate constant as a function of operating parameters as particle size, d_p, bubble size, d_b, air concentration in pulp, C_a, air flow, J, and pulp volume, V_s. The flotation rate is represented by eq. (8), where A is a coefficient.

$$k = A\frac{d_p(0.806C_a^{-0.33} - 0.5)J}{(V_s d_b)^2} \quad (8)$$

Inoue and Imaizumi [23] suggested that the flotation rate constant is defined by the agitation velocity of the conventional flotation equipment. k is given by eq. (9) where Na_f is the airflow number calculated from the features of the agitation system, represented by eq. (10), i is the specific agitation energy, obtained from the agitation power and the characteristics of the pulp, given by eq.(11), and A and B are coefficients.

$$k = A\, Na_f^{0.5}\, i^{0.75} + B \quad (9)$$

$$Na_f = \frac{Q_a}{N_i\, D_i^3} \quad (10)$$

$$i = \frac{P}{pV} \quad (11)$$

Where Q_a is the airflow rate, N_i is the rotating velocity of the impeller, D_i is the impeller diameter, P is the agitation power, p is the apparent density of the stirred pulp and V is the pulp volume. Other authors related the flotation rate with particle size [24,25]. These studies agree that the dependence of the flotation rate constant with the particle size, d_p, is represented by eq. (12), where A is the coefficient of proportionality and n is a parameter between 1 and 2.

$$k = A\, d_p^n \quad (12)$$

Based on this relationship, Mohns [26] obtained a second order polynomial model for k as a function of the particle size, given by eq. (13), where A, B and C are coefficients.

$$k = A + B\, d_p + C\, d_p^2 \quad (13)$$

Cilek [27] found a statistical model represented by eq. (14) for the flotation rate constant as a function of the airflow rate (x_1), the froth thickness (x_2) and the feed grade (x_3), with a-g coefficients. This model integrates the grade, a characteristic of the mineral, as a factor affecting the kinetics of flotation.

$$k = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_1x_2 + fx_2x_3 + gx_1x_3 \quad (14)$$

2. Formulation of the new mathematical model for coal flotation kinetics

The proposed model allows for the calculation of an "average" flotation rate constant for all particles in the system and under all flotation conditions. This is the simplest discrete model type with a single rate constant assuming a feed of particles with the same floatability. To be able to compare with the classic flotation model, the population-balance models also are discrete kinetic models where the particles in the system are divided into groups, and the particles in any one group are similar in dimension and composition [3,28]. Those particles in the system have distinct characteristics affecting their floatability (particle size and hydrophobicity) and the proposed model will apply only when these features are taken into account. This includes, for example: a good liberation degree (i.e. particle size reduction accounting the mineral liberation) and narrow particle size distributions. These applicability conditions of this type of model were included in the present work.

According to the classic flotation model, the change in the concentration of coal particles, C_p, over time, in conventional flotation equipment, can be expressed by eq. (15), where t represents the flotation time, n is the order of the process and k is the flotation rate constant. If the volume of the system is kept constant throughout the process, the flotation kinetic may be represented by eq. (16), where M represents the mass of coal that remains in the equipment and k is a complex constant. The flotation rate constant may be expressed by several empirical correlations where k is related with operating parameters such as particle size, airflow, and pulp concentration [20-26]. In spite of the effort to obtain a general equation for k, these correlations are limited to a first-order kinetic and do not show dimensional consistency regarding the parameters and exponents involved.

$$-\frac{dC_p}{dt} = kC_p^n \quad (15)$$

$$-\frac{dM}{dt} = kM^n \quad (16)$$

One of the reasons for this is that the flotation kinetic constant is highly affected by other parameters such as the reagents dosage and the characteristics of the mineral. In coal flotation, k is influenced by factors related to the chemistry of the process, the petrographic characteristics of the coal and operating conditions. Chemical parameters include solids concentration in the pulp and frother and/or collector dosage. Operating parameters include airflow velocity and particle size. In terms of petrographic characteristics, this includes the floatable macerals and non-floatable particles content in the coal. By considering all these independent variables, an equation to determine k can be derived by dimensional analysis using the Rayleigh method [29]. According to this method, the flotation rate constant, k (g^{1-n}/s) can be expressed theoretically by eq. (17).

$$k = f(J_g, C_0, d_p, C_R, M_f, M_i) \quad (17)$$

where J_g is the airflow velocity (cm/s), C_0 is the solid concentration in the pulp (g/cm^3), d_p is the particle size (cm), C_R is the frother concentration (g/cm^3), and M_f and M_i are the floatable macerals and the non-floatable particles volume in the coal feed (cm^3), respectively. In general terms, eq. (17) can be expressed in an exponential form by eq. (18), where the exponents a, b, c, d, e and f make the equation dimensionally consistent.

$$k = J_g{}^a C_0{}^b d_p{}^c C_R{}^d M_f{}^e M_i{}^f \quad (18)$$

By substituting the corresponding dimensions of each

parameter, the expression given by eq. (19) is obtained, where M is the unit of mass (g), L is the unit of length (cm), t is the unit of time (s) and Lm is the unit of length for macerals in coal (cm, for volumetric content of macerals).

$$\frac{M}{tM^n} = L^a t^{-a} M^b L^{-3b} L^c M^d L^{-3d} Lm^{3e} Lm^{3f} \quad (19)$$

Solving for the exponents: a = 1, b = 1 – n – d, c = 2 – 3n and f = -e. After substitution of these exponents, eq. (18) becomes eq. (20).

$$k = J_g{}^1 C_0{}^{1-n-d} d_p{}^{2-3n} C_R{}^d M_f{}^e M_i{}^{-e} \quad (20)$$

By grouping the parameters with the same exponent, eq. (20) can be expressed by eq. (21).

$$\frac{k d_p{}^{3n-2}}{J_g C_0{}^{n-1}} = f\left[\left(\frac{C_R}{C_0}\right)^d \left(\frac{M_f}{M_i}\right)^e\right] \quad (21)$$

A proportionality constant, k_0, can be introduced in the equation and constants d and e can be renamed as a and b, respectively. Therefore, eq. (21) can be rewritten as eq. (22).

$$\frac{k d_p{}^{3n-2}}{J_g C_0{}^{n-1}} = k_0 \left(\frac{C_R}{C_0}\right)^d \left(\frac{M_f}{M_i}\right)^e \quad (22)$$

Due to the fact that coal macerals have differences in both hydrophobicity and electro kinetic surface properties, they have different behaviors in the flotation process. The decreasing hydrophobicity order for coal macerals is liptinite > vitrinite > inertinite [30]. On this basis, the percentage by volume of floatable macerals, M_f, can be considered as the percentage by volume of liptinite, L, and vitrinite, V; whereas the percentage by volume of non-floatable particles, M_i, can be considered as the percentage by volume of inertinite, I, and mineral matter content, MM (%, v/v). Thus, eq. (22) can be expressed as eq. (23).

$$\frac{k d_p{}^{3n-2}}{J_g C_0{}^{n-1}} = k_0 \left(\frac{C_R}{C_0}\right)^d \left(\frac{V+L}{I+MM}\right)^e \quad (23)$$

The left side term of eq. (23) relates to the flotation rate constant, k, with operating parameters such as airflow velocity, particle size and solids concentration in the pulp. The first factor on the right side relates to the solids concentration, which also affects the chemistry of the process and the reagent concentration; and the factor on the far right represents the relationship between the percentage of floatable and non-floatable coal material. From eq. (23), the flotation rate constant can be calculated by eq. (24).

$$k = k_0 \frac{J_g C_0{}^{n-1}}{d_p{}^{3n-2}} \left(\frac{C_R}{C_0}\right)^d \left(\frac{V+L}{I+MM}\right)^e \quad (24)$$

Eq. (24) allows for the calculation of an average flotation rate constant for all particles in the pulp, assuming a feed of

$$\frac{k d_p{}^{3n-2}}{J_g C_0{}^{n-1}} = k_0 \left(\frac{C_R}{C_0}\right)^d \left(\frac{V+L}{I+MM}\right)^e$$

Number I Number II Number III

Figure 2. Dimensionless numbers in the coal flotation kinetic model Source: The authors.

$$\frac{k d_p{}^{3n-2}}{J_g C_0{}^{1-n}} = k_0 \left(\frac{C_R}{C_0}\right)^d \left(\frac{V+L}{I+MM}\right)^e$$

Nusselt (I) Reynolds (II) Prandtl (III)

$$\frac{hD}{k} = C\left(\frac{D\rho v}{\mu}\right)^m \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^n$$

Figure 3. Analogy of the coal flotation kinetic model and the heat transfer coefficient model
Source: The authors.

particles with the same floatability. Since the particles in the flotation system have distinct characteristics affecting their floatability (e.g. particle size and hydrophobicity), the proposed model has application only when these features are controlled (i.e. high mineral matter liberation and narrow particle size distributions). By substituting eq. (24) into eq. (16), the coal flotation kinetic is given by eq. (25).

$$\frac{dM}{dt} = -k_0 \left(\frac{J_g C_0{}^{n-1}}{d_p{}^{3n-2}}\right)\left(\frac{C_R}{C_0}\right)^d \left(\frac{V+L}{I+MM}\right)^e M^n \quad (25)$$

A well as exhibiting dimensional consistency, the dimensionless numbers in the model represented by eq. (23), as shown in Fig. 2, have a physical-chemical meaning.

The dimensionless number I represents the relationship between the kinetics of the process and the factors affecting the hydrodynamic process. Dimensionless number II is associated with the chemical characteristics of the flotation process and dimensionless number III considers the coal's characteristics by the relationship between floatable and non-floatable fractions. Those dimensionless numbers were based according to the effect of chemical reagents dosage and solids concentration on the chemistry of froth flotation [31], the effect of the hydrophobicity of coal macerals [30], and the operating variables affecting the hydrodynamics of the process [32].

The coal flotation kinetics model resembles transport phenomena models represented by dimensionless numbers, for instance, the equation used to calculate heat transfer coefficients which is a function of Nusselt, Reynolds and Prandtl dimensionless numbers. This analogy is shown in Fig. 3.

The heat transfer driving force given by the Reynolds number, can be related to the dimensionless number II in the model, which represents the chemistry of the process. Since

chemical reagents dosage and the solids concentration affect the collision, attachment and stability processes between particles and bubbles which govern particle recovery [31], the relation of parameters in the dimensionless number II can be considered as the driving force of the overall flotation process. The Prandtl number provides a combination of properties of the fluid while the dimensionless number III is a combination of the properties of the coal defining its natural hydrophobicity or hydrophilicity [30]. The Nusselt number represents the ratio of the convective and conductive heat transfer of a fluid, two mechanisms of heat transfer, whereas the dimensionless number I relates to the main recovery mechanisms in the flotation, comparing the flotation kinetics, which considers recovery by true flotation, with the hydrodynamic features of the process defining recovery by entrainment [32]. The Rayleigh method has also been useful to develop kinetic models of other processes as char combustion for pulverized coal, where the physical characteristics of the char, the chemical characteristics of the coal/char combustion process and the composition of the coal are related to the chemical reaction rate coefficient through dimensionless numbers [33].

3. Validation of the flotation rate new mathematical model for coal flotation kinetics (special case of n = 1)

Following the classic first-order model approach, the flotation rate constant can be expressed as eq. (26), by substituting n = 1 in eq. (24).

$$k = k_0 \frac{J_g}{d_p}\left(\frac{C_R}{C_0}\right)^d \left(\frac{V+L}{I+MM}\right)^e \quad (26)$$

The required coefficients to validate the kinetic model shown in eq. (26) were derived from experimental data of kinetic flotation runs using a coal sample from the state of Antioquia-, Colombia, under different operating conditions. Table 1 shows the proximate analysis and the maceral composition of the coal sample.

The kinetic tests were carried out in a 135 cm high 3.9 cm diameter batch glass flotation column. Kerosene and Aerofroth-65 were used as the collector and frother respectively and the frother/collector ratio and the pulp concentration were kept constant at 1.6 and 7.6% w/w, respectively. Three particle sizes (less than 150, 250 and 500 µm), three airflows (0.82, 0.89 and 1.03 cm/s) and three frother concentrations (2400, 2600 and 2800 g/ton) were considered to complete a 3^3 factorial experimental design with the flotation rate constant as response variable. In all experimental runs, froth samples were collected after 5, 15, 35 and 60 seconds of flotation. From the results of combustible recovery as a function of time, the kinetic constant was determined by linear regression from the solution of eq. (16) for n = 1, given by (27).

$$ln\left(\frac{M_0}{M_t}\right) = kt \quad (27)$$

For the validation of the proposed kinetic expressed in eq. (26), a non-lineal least-square method was used to find the values of the constants k_0, d and e, that minimized the sum of the squares of the residuals between the experimental kinetic constant and the model calculations. The minimum and maximum values of k from experimental data, the parameters, k_0, d and e, and the standard error of the regression, S, are presented in Table 2. The standard error of the regression represents the average distance that the observed values fall from the predicted values of k using the eq. (26) and the parameters of Table 2. The observed and calculated values of the flotation kinetic constant for the coal sample are shown in Fig. 4.

According to the Fig. 4 and the results presented in Table 2, the proposed model shows notable agreement with experimental kinetic constants at various operating conditions using the Antioquia coal sample. The resulting model can be considered a technical tool to predict the flotation process behavior from traditional coal analysis data (proximate and petrographic analysis) and known and/or easily calculated typical operating conditions (particle size, airflow velocity, pulp concentration and reagent dosage), to help in the design, evaluation or optimization of flotation units.

Table 1.
Proximate and petrographic analysis of the coal sample.

Parameter	Value
Proximate analysis (wt.%, dry basis)	
Ash	11.17
Volatiles	45.94
Fixed Carbon	42.89
Sulfur	0.69
Petrographic analysis (vol.%, including mineral matter)	
Vitrinite	87.90
Liptinite	4.55
Inertinite	1.20
Mineral matter	6.35

Source: The authors.

Table 2.
Validation of the flotation kinetic model given by eq. (26)

Experimental k values, 1/s		Parameters of eq. (26)			S, 1/s
kmin	kmax	k_0	d	e	
0.0070	0.0261	0.5500	1.5732	0.7748	0.0031

Source: The authors.

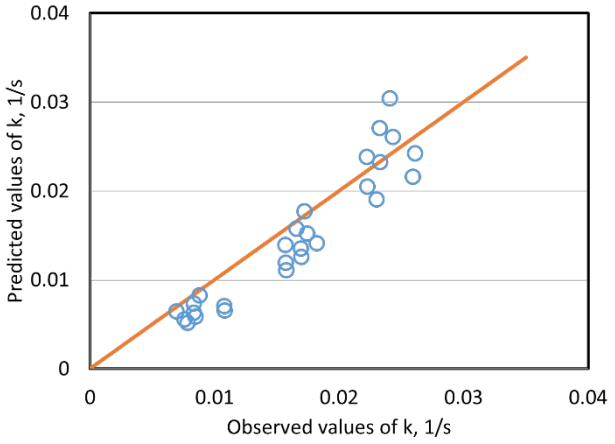


Figure 4. Predicted and observed values of flotation kinetic constant k
Source: The authors.

4. Conclusions

Most of the flotation kinetic models found in the literature are empirical and do not have dimensional consistency. A theoretical analysis can be a more descriptive model for the microprocesses of the flotation with practical applications where all of the complex parameters involved are known or measured with specialized equipment. The coal flotation kinetics model developed in this work is new and was obtained by dimensional analysis where petrographic, chemical and operating parameters involved in flotation were correlated with the flotation rate constant using the Rayleigh method. The equation obtained is dimensionally consistent and is given by a combination of three dimensionless numbers which have physical-chemical meaning. These dimensionless numbers represent the hydrodynamical components of the process; the chemical factors of flotation; and the characteristics of the coal in terms of the floatable and non-floatable material content. Moreover, the new model exhibits similarities with models of dimensionless numbers used in transport phenomena. The model was validated to predict the flotation kinetic constant (for the special case of first-order) of a sample of Colombian coal and it showed that there is a good correlation between experimental and predicted values under various operating conditions involving particle size, airflow velocity and frother concentration. The proposed model offers an approximation of the expected behavior of the flotation process when the coal characteristics and operating conditions are known.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the grant given by the Colombian Institute of Science and Technology (Colciencias) to Juan Guerrero in order to carry out his doctoral studies.

References

[1] Ahmed, N. and Jameson, G.J., Flotation kinetics. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Review 5, pp. 77-99, 1989. DOI: 10.1080/08827508908952645

[2] Saleh, A.M., A study on the performance of second order models and two phase models in iron ore flotation. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 44, pp. 215-230, 2010.

[3] Bu, X., Xie, G., Peng, Y., Ge, L. and Ni, C., Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 53, pp. 342-365, 2017.

[4] Yianatos, J., Bergh, L., Vinnett, L., Contreras, F. and Diaz, F., Flotation rate distribution in the collection zone of industrial cells. Minerals Engineering, 23, pp. 1030-1035, 2010. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.05.008.

[5] Polat, M. and Chander, S., First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constants. International Journal of Mineral Processing, 58, pp. 145-166, 2000. DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00069-1

[6] Luo, C., He, Y., Bu, X. and Wang, S., And improved classic flotation kinetic model of narrow size slime. Journal of China University of Mining and Technology, 44, pp. 477-482, 2015.

[7] Vinnett, L., Alvarez-Silva, M., Jaques, A., Hinojosa, F. and Yianatos, J., Batch flotation kinetics: Fractional calculus approach. Minerals Engineering, 77, pp. 167-171, 2015. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.020

[8] Ni, C., Kie, G., Jin, M., Peng, Y. and Xia, W., The difference in flotation kinetics of various size fraction of bituminous coal between rougher and cleaner flotation processes. Powder Technology, 292, pp. 210-216, 2016. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.02.004

[9] Alvarez-Silva, M., Vinnett, L., Langlois, R. and Waters, K.E., A comparison of the predictability of batch flotation kinetic models. Minerals Engineering, 99, pp. 142-150, 2016. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.019

[10] Ai, G., Yang, X. and Li, X., Flotation characteristics and flotation kinetics of fine wolframite. Powder Technology, 305, pp. 377-381, 2017. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.09.068

[11] Xing, Y., Gui, X., Cao, Y., Wang, Y., Xu, M., Wang, D. and Li, C., Effect of compound collector and blending frother on froth stability and flotation performance of oxidized coal. Powder Technology, 305, pp. 166-173, 2017. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.10.003

[12] Zhang, N.N., Zhuo, C.C., Pan, J.H., Xia, W., Liu, C., Tang, M.C. and Cao, S.S., The response of diasporic-bauxite flotation to particle size based on flotation kinetic study and neural network simulation. Powder Technology, 318, pp. 272-281, 2017. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.06.010

[13] Brozek, M. and Mlynarczykowska, A., Analysis of kinetics models of batch flotation. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 41, pp. 51-65, 2007.

[14] Wierink, G., A computational framework for coupled modelling of three-phase systems with soluble surfactants. PhD dissertation, Aalto University, Helsinki, Finland, 2012.

[15] Klassen, V.I. and Mokrousov, V.A., An introduction to the theory of flotation. Butterworths, London, 1963.

[16] De Bruyn, P.L. and Modi, H.J., Particle size and flotation rate of quartz. Trans. AIME, 205, pp. 415-419, 1956.

[17] Tomlinson, H.S. and Fleming, M.G., Flotation rate studies. VI International Mineral Processing Congress Proceedings, 1965, pp. 563-579.

[18] Yoon, R. and Mao, L., Application of extended DLVO theory, IV derivation of flotation rate equation from first principles. Journal of Colloid and Interface Science, 181, pp. 613-626, 1996. DOI: 10.1006/jcis.1996.0419

[19] Sherrel, I.M., Development of flotation rate equation from first principles under turbulent flow conditions. PhD dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2004.

[20] Piñeres, J.L., Fenómenos superficiales y cinéticos de la separación del grupo maceral vitrinita en fracciones beneficiadas de carbones colombianos obtenidas por flotación burbujeante. PhD dissertation, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2008.

[21] Zhang, J.G., Factor affecting the kinetics of froth flotation. PhD Dissertation, Department of Mining and Mineral Engineering, University of Leeds, Great Britain, 1989.

[22] Stokowski, H. and Freyberger, W.L., Model describing mechanism of the flotation process. Transaction of the Institution of Mining and Metallurgy, 94, C 61-69, 1985.

[23] Inoue, T. and Imauzumi, T., A series of work related to flotation kinetics. 4th Joint Meeting MMIJ-AIME Proceedings, 1980. pp. 84-100.

[24] Trahar, W.J., A rational interpretation of the role of particle size in flotation. International Journal of Mineral Processing, 8, pp. 289-327, 1981. DOI: 10.1016/0301-7516(81)90019-3

[25] Hernáinz, F. and Calero, M., Froth flotation: kinetic models based on chemical analogy. Chemical Engineering and Processing, 40, pp. 269-275, 2001. DOI: 10.1016/S0255-2701(00)00125-2

[26] Mohns, C.A., Effect of particle size on coal flotation kinetics. MSc. Thesis. Department of Mining Engineering, Queen's University, Kingston, Canada, 1997.

[27] Cilek, E.C., Estimation of flotation kinetic parameters by considering interactions of the operating variables. Minerals Engineering, 17, pp. 81-85, 2004. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.10.008

[28] Jovanovic, I. and Miljanovic, I., Modelling of flotation processes by classic mathematical methods - A review. Archives of Mining Sciences, 60(4), pp. 905-919, 2015. DOI: 10.1515/amsc-2015-0059

[29] Perry, R., Green, D.W. and Maloney, J.O., Perry's chemical engineers' handbook, vol. 2. 6th ed. McGraw Hill, New York, 1992, pp. 2-120.

[30] Arnold, B. and Aplan, F., The hydrophobicity of coal macerals. Fuel, 68(5), pp. 651-658, 1989. DOI: 10.1016/0016-2361(89)90168-3

[31] Rao, S.R., Surface chemistry of froth flotation. Kluwer Academic / Plenum Publisher. New York, 2004, pp. 660-695.

[32] Wang, L., Peng, Y., Runge, K. and Bradshaw, D., A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. Minerals Engineering, 70, pp. 77-91, 2015. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.09.003
[33] Barranco, R., Rojas, A., Barraza, J. and Lester, E., A new char combustion kinetic model 1. Formulation. Fuel, 88, pp. 2335-2339, 2009. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.02.005

J.S. Guerrero-Pérez, received the BSc. Eng in Chemical Engineering in 2009 and the MSc. in Chemical Engineering in 2013, all of them from the Universidad del Valle. Cali, Colombia. Currently, he is a PhD candidate and auxiliar professor of the Chemical Engineer School of the Universidad del Valle, Cali-Colombia. He is member of the Coal Science and Technology Group, leading the projects related to coal preparation and utilization.
ORCID: 0000-0001-5839-8291

J.M. Barraza-Burgos, received the BSc. Eng in Chemical Engineering in 1984 from the Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia; the MSc. degree in Chemical Engineer in 1988 from the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia; and the PhD. degree in Chemical Engineering in 1995 from the Nottingham University, UK. Currently, he is a full professor of the Chemical Engineering School of the Universidad del Valle, Cali, Colombia and the director of the Coal Science and Technology Group. His research lines include coal preparation, combustion, conversion of coal and valorization.
ORCID: 0000-0001-8951-6975

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Química e Ingeniería de Petróleos

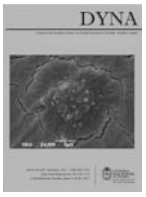
Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Burr formation and control for polymers micro-milling: A case study with vortex tube cooling

Michael Miranda-Giraldo, David Serje-Martínez, Jovanny Pacheco-Bolívar & Jorge Bris-Cabrera

Universidad del Norte, Barranquilla-Colombia.
michaelmiranda@uninorte.edu.co, serjed@uninorte.edu.co, jpacheco@uninorte.edu.co, jbrix@uninorte.edu.co

Received: July 4th, 2017. Received in revised form: August 1rd, 2017. Accepted: October 9th, 2017.

Abstract
Micro-machining of different polymer based components often require high precision and excellent surface quality at high production rates with low costs. Micro-milling is a cost-efficient micro-machining process capable of generating complex shapes in a wide range of materials. Challenges based on size effect, burr formation and adequate chip removal must be faced and are addressed in this research. Material removal mechanisms, as well as its impact on burr formation and control are reviewed, followed by a case study through the application of gaseous cooling based on vortex tubes. Different vortex generator configurations were tested, proving to be fast response an economically-friendly alternative for burr reduction while micro-milling biopolymers. Configurations, as mentioned above, were used for biopolymer micro-milling towards burr measurement after each test; achieving as a result, a burr reduction while cooling temperature decreases.

Keywords: Micro-milling; Burr; Polymer machining; Vortex cooling.

Formación de rebabas y su control para el micro-fresado de polímeros: Un caso de estudio con refrigeración por tubo vortex

Resumen
El micro-maquinado de diferentes componentes basados en polímeros a menudo requiere de gran precisión y un excelente acabado superficial a unas tasas elevadas de producción con un bajo costo. El micro-fresado es un proceso costo-efectivo de micro-maquinado capaz de generar formas complejas en una amplia variedad de materiales. Retos basados en el efecto tamaño, formación de rebabas y una adecuada remoción de la viruta deben ser enfrentados y son tratados en la presente investigación. Los mecanismos de remoción de material, al igual que su impacto en la formación de rebabas y su control, son revisados, acompañados de un caso de estudio a través de la aplicación de refrigeración gaseosa basada en tubos vortex. Diferentes configuraciones de generadores de vortex son probados, demostrando ser una alternativa de respuesta rápida, económica y amigable para la reducción de rebabas mientras se micro-fresan biopolímeros. Dichas configuraciones se utilizaron en el micro-mecanizado de un polímero bio-compatible, midiendo el tamaño de rebaba que se genera en cada prueba, dando como resultado la disminución de estas a media que baja la temperatura de refrigeración.

Palabras clave: Micro-fresado; Rebaba; Maquinado de polímeros; Refrigeración con tubo vortex.

1. Introduction

The growing biomedical industry demands continuous innovation in the manufacturing of high precision products with progressively smaller dimensions, thereby increasing the requirements of quality, materials, speeds and costs for current fabrication techniques [1]. Micro-manufacturing is the process of fabrication used for these micro parts and products, or for creating micro-features using scaled down manufacturing processes [2,3]. Among the different existing techniques, micro-machining stands out, referring to it as the removal of material by cutting, polishing, etching, thermal elimination process, and others [4]. The micro-milling is one of the most widely used techniques of micro-fabrication due

How to cite: Miranda-Giraldo, M., Serje-Martínez, D., Pacheco-Bolívar, J. and Bris-Cabrera, J., Burr formation and control for polymers micro-milling: A case study with vortex tube cooling DYNA, 84(203), pp. 150-159, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

to its versatility to generate different shapes from a wide range of materials. It offers considerable productivity, with high accuracies (of a few microns) using energy-efficient small machine tools [5]. Also, it has a good similarity with macro- milling making it simpler to use than other emerging micro-technologies. Therefore, micro-milling is an efficient option for the manufacturing of medical implants with biocompatible materials in the micro-scale [6].

Synthetic polymers are one of the main raw materials used for the manufacture of biomedical implants such as dental tissue substitutes, soft orthopedic implants, ocular and cardiovascular implants [7,8]. Their functionality and integration of these implants with the host organism, are largely dependent on the existent agreement of the surface micro-topography with the structural requirements of the host organ. High accuracy and an excellent surface finish may promote increased comfort levels for a patient, while avoiding the application of chemical processes to improve the surface quality and burrs removal [9].

Multiple studies indicated that the cutting parameters have a significant effect on the surface quality and burr formation [6, 9-12]. One of the technical options to minimize the effect of burr formation during machining is to guarantee low temperatures in the material cutting, looking for greater rigidity and fragility in the chip to ease its removal. Different strategies like flood cooling (wet cooling), minimum quantity lubrication (MQL), cryogenic refrigeration, dry machining and gaseous refrigeration have been applied. In this research, gaseous refrigeration based on cold compressed air is applied to reduce friction and heat in the cutting zone (thereby increasing tool life) and to improve surface quality while reducing production costs with an environmentally friendly alternative that also complies with biomedical cleanliness requirements (i.e., no cutting fluid decontamination is necessary).

A vortex tube offers an instantaneous high-efficiency response at low-cost for cooling and cleaning the machined biomedical component surface [13]. There is no maintenance, risk of explosion, electricity and additional parts required which are all other benefits of these devices. The vortex tube operation is based on the phenomenon of temperature distribution in a rotating gas flow known as the Ranque-Hilsch effect and its applications has been successfully applied to the field of the machining processes [13,14].

Studies regarding multifactorial nature of the vortex tube and its performance on micro-milling are still limited. This research aims to review material removal at the micro-scale, and analyze the effect of gaseous refrigeration through cooled compressed air towards a reduction of burr formation for polymers micro-milling. A series of cutting tests were conducted with different configurations to study their effect on achievable temperatures and burr dimensions. Through these tests, it is expected that at lower cooling temperatures, a significant reduction in the quantity and size of burrs while cutting biopolymers should be observed.

2. Material removal at micro-scale

2.1. Size effect

Micro-machining is a scaled down version of the macro-machining process. Based on this relationship, an initial approach, was to assume that the underlying mechanism for chip formation and removal had no significant difference between the macro-scale and the micro-scale. Later studies confirmed that such assumption could not be guaranteed due to a phenomenon called size effect and minimum chip thickness [10,15,17]. At small chip thicknesses, the specific energy required to remove a unit amount of material increases, which is often referred to as the size effect [17]. During a micro-milling operation, the cutting edge radius of a micro-tool is comparable to the uncut chip thickness, resulting in a possible cutting at negative rake angles. Therefore, the relationship between the cutting thickness and tool edge radius will influence the dominant chip removal mechanism [16]. Fig. 1 shows the geometric arrangements for conventional and micro-scale machining. The chip will not form unless the cutting depth is greater than a critical value called the minimum uncut chip thickness (h_{min}). Below this value, the material is subject to an elastic-plastic deformation (plowing/rubbing) without efficient material removal (Fig. 2), where the actual depth of cut is less

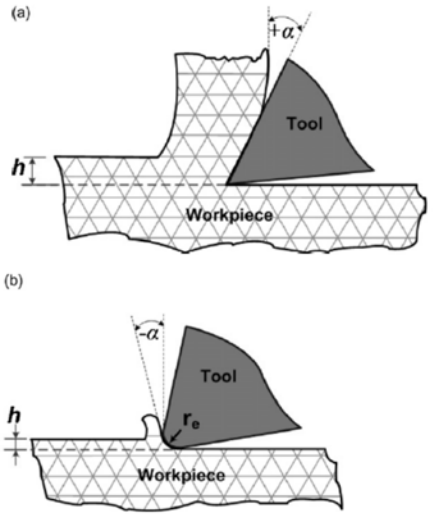


Figure 1. Cutting edge size comparison. a) Macro-scale. b) Micro-scale. Source: [15].

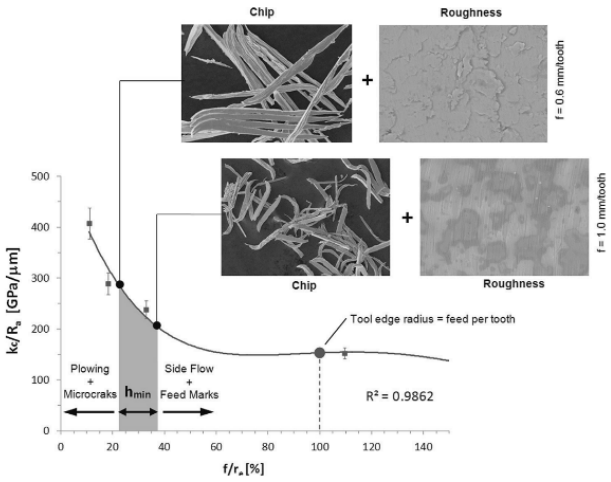


Figure 2. Minimum uncut chip thickness determination. Source: [16].

than the theoretical depth [11]. At higher cutting thicknesses (exceeding h_{min}-value) the plowing effect decreases considerably, and chips are formed efficiently due to the shearing of the workpiece [18].

The plowing effect and the nature of the micro-deformation leads to increased cutting forces, burr formation, and increased surface roughness. Therefore, knowledge of the minimum chip thickness is essential in the selection of appropriate cutting conditions. This value depends on several factors such as the cutting edge radius, workpiece material, micro-structure and other operating parameters.

L'vov [19] and others indicate a minimum cutting depth were the chip separation from the material occurs and its dependency upon the cutting edge sharpness and material properties. Weule et al. [20], then established a relationship to find the achievable surface roughness in terms of hmin for AISI 1045 Tempered Steel. A saw-tooth-like profile was observed while analyzing the cross section of the machined surface which can be explained by the minimum chip thickness relationship. Several studies have proposed various methods to find hmin, some recent results concerning the determination of hmin for different materials, tools and methods are listed in Table 1. It can be seen that in general, hmin values are between 1/4 to 1/3 of the tool edge radius. The chip flow stagnation region varies depending on the material and the friction angle and thereby generating a variation on minimum uncut chip thickness.

Cutting edge radius (sharpness) and its effect on other parameters such as forces [21,22], surface roughness [22-24], burr formation [25] and acoustic emissions (AE) [26] have also been studied. This literature supports the relevancy of this parameter to guarantee a complete chip formation and to predict other process responses. The minimum uncut chip thickness does not necessarily implies an adequate chip formation, surface integrity or productivity, therefore, to improve the productivity, some techniques like the use of coolants/lubricants can be considered for existing machine-tool-workpiece material combination.

Table 1.
Some minimum uncut chip thickness related research.

Author (year)	Material (Method)	Tool	h_{min}/r_e
Shi (2017) [26]	Inconel 718 (Experimental)	Φ=0.35 mm r_e=6 µm	0.23
De Oliveira (2014) [16]	AISI 1045 (Experimental)	Carbide w/ TiNAl coat Φ=0.8 mm r_e=2.7 µm	0.22-0.36
Malekian (2012) [29]	Aluminum 6061(Analytical)	Non-coated WC, rake 0° r_e=15 µm	0.23
Liu (2011) [30]	OFHC Copper (Finite Element)	Different rake angles	0.17
Lai (2008) [31]	OFHC Copper (Finite Element)	Carbide, Rake 10° Φ=0.1 mm r_e=2 µm	0.25
Son (2005) [22]	Aluminum, Brass, OFHC Copper (Analytical)	Square diamond r_e=0.5 µm	0.2, 0.24, 0.18
Vogler (2004) [23]	Steel - Pearlite Steel - Ferrite (Finite Element)	Φ=508 µm r_e=2-5 µm	0.14-0.25 0.29-0.43
Weule et al. (2001) [20]	AISI 1045 tempered (Experimental)	Carbide, fly cutter r_e=5 µm	0.293
Yuan (1996) [24]	Aluminum Alloys (Experimental)	Diamond r_e=0.2-0.6 µm	0.2-0.4
L'vov (1969) [19]	AISI 1045	Tungsten Carbide	0.29

Source: Authors.

2.2. Burr formation

According to the DIN ISO 13715, a burr is a "material overhang outside of the ideal geometrical shape of the workpiece edge, which remains after the machining". A burr is unavoidable, and it may be critical or not based on application requirements. The only solution is to reduce these burrs to an acceptable degree. Often, they hold micro-cracks and generate subsequent problems during assembly, inspection or product operation due to its dimensions and bonding with the rest of the workpiece. Milling burrs can be classified according to the location (Fig. 3), shape and formation mechanism [27]. In some cases, burrs can be relatively large when compared to the feature size (Fig. 4) and the amount of time taken to remove them may be over 35% of the time required to machine a part [11].

Chern [28] studied burr formation while face milling aluminum alloys, and reported that the occurrence of five burr types were dependent on cutting conditions. Knife-type, curl-type, edge breakout and secondary burr were generated and classified.

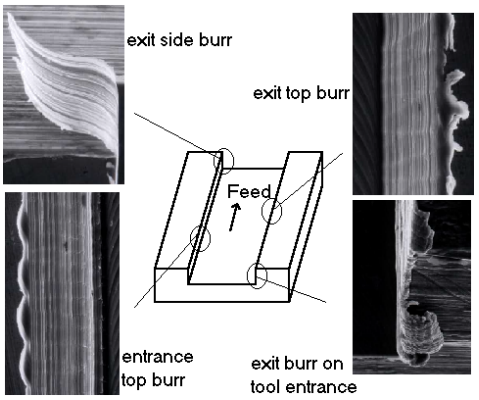


Figure 3. Burrs in micro-milling.
Source: [32].



Figure 4. Exit burr while micro-drilling Aluminum 6061 T6.
Source: [32].

The standard DIN ISO 13715 defines a corner with a burr, where it is assessed by measuring the perpendicular distance between the burr tip and the surface from which it is protruding. Schäfer [33] defined the burr value (g), composed by parameters as burr root thickness (bf), burr root radius (rf), burr thickness (bg), and burr height (h0) (Fig. 5). Burr geometry in the case of micro-machining could not be easily quantified; that is, geometrical parameters like burr height and burr width could not be measured without a lack of repeatability.

In ductile materials, a burr is more likely to be formed due to high elastic-plastic deformation during machining [33] and in brittle or hard materials it is mainly affected by the tool wear progress [20]. In the micro-milling of ductile materials like Aluminum (Al2124), Lekkala et al. [12] observed that up micro-milling produces more side exit burrs and a rougher wall surface relative to down milling. This result is consistent with findings reported by Schueler et al. [34] while micro-milling Ti-6Al-7Nb alloy. In SAE 1045 Steel, Weule et al. [20] showed that an increase in micro-milling cutting velocities led to less burr formation. Aramcharoen et al. [15] noted that burr size is significantly affected by tool geometry and coatings with favorable rounded cutting edges or chamfered geometries for better quality.

Instead of measuring techniques, research has been focused on burr reduction for micro-milling, through experimentation [9,12,32,35] or simulation [36-38] by varying the process parameters or deburring after machining. The formation of burrs in the macro-milling process has been studied extensively through experimental and predictive analytical modeling, but in the micro-scale, very little work has been reported in the literature.

Although deburring techniques such as electrochemical polishing and others, can be applied to remove burrs, they require additional time and are costly [12]. Burr prevention must consider from design to manufacturing and use proper cutting fluid through strategies such as machining with minimum quantity lubrication coupled with hard coated tools [32].

2.3. Cutting fluids

Cutting fluid is applied during machining to increase tool life, enhance surface finishes, decrease burrs, and avoid build-up edge formation [11,17]. Traditionally coolants promote a friction and temperature reduction, to remove chips from the cutting zone, to limit chemical diffusion and to protect the machined surface from corrosion [39].

2.3.1. Flood (wet) cooling

Flood cooling (wet cooling) with jets or nozzles sprays large quantities of fluid on the workpiece. Cooling reduces friction, aid to dissipate heat, remove chips and other secondary functions [40]. Coolants/Lubricants also allow to increase the cutting speeds, extend tool life, reduce the workpiece damage, and improve the surface quality while aiding to meet the expected dimensions and tolerances [39]. Therefore, cutting fluids increase productivity, improve efficiency by reducing the number of defects, help to ensure process safety, and guarantee and enhance the machining quality.

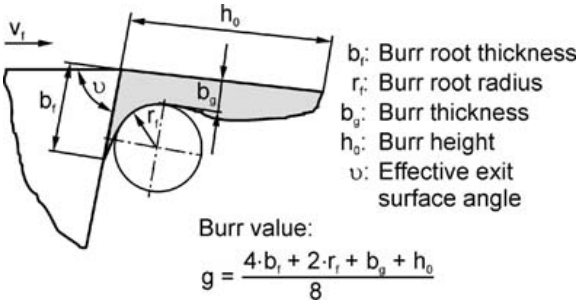


Figure 5. Burr measurement according to Schäfer. Source: [33].

Flood cooling also involves some drawbacks such as their high costs, environmental concerns, and human health risks. Also, in micro-milling, the application of flood cooling may not be very effective due to poor penetration based liquid tension at small surfaces (in magnitudes of micrometers) rotating at very high speeds. The impact created by these fluids may be greater than the cutting forces observed during micro-machining [11]. These issues make necessary to develop and apply novel lubrication/cooling systems like dry machining, minimum quantity lubrication (MQL), cryogenic refrigeration, and gaseous refrigeration.

2.3.2. Dry machining

To manufacture without using any cutting fluid, also referred to as dry machining, has become popular among researchers in recent years [40]. An economical and environmentally friendly process like dry machining must incorporate some changes to overcome the absence of coolant and the associated benefits like cooling, lubrication and chip removal. Tool material with high hardness, thermal fatigue limit and chemical stability, and proper cutting parameters must be carefully selected for a successful implementation [39]. This technique has been applied in numerous machining processes mainly in the automotive industry with materials like gray cast iron and aluminum cast alloys which yield low cutting forces and temperatures [40]. Interrupted machining processes such as milling, turning and sawing with short breaking chips (Fig. 6) are suited for a coolant/lubricant reduction [39]. Several challenges still exist for machining some materials, and near dry machining or minimum quantity lubrication have evolved to address some of these issues.

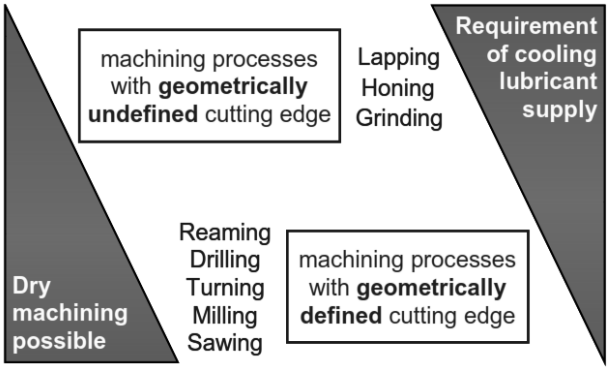


Figure 6. Machining process influence on cooling lubricant supply. Source: [40].

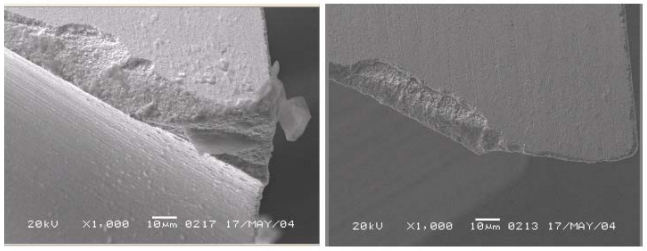


Figure 7. Worn tools (same cutting conditions). a) Dry machining. b) MQL. Source: [41].

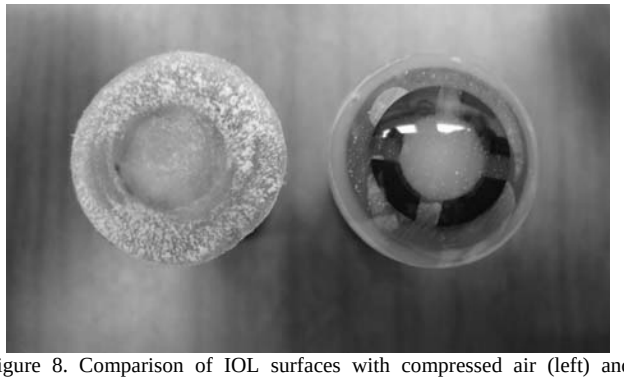


Figure 8. Comparison of IOL surfaces with compressed air (left) and cryogenic cooling (right).
Source: [47].

2.3.3. Minimum quantity lubrication

Minimum quantity lubrication (MQL) uses a mix of compressed air with a reduced amount of coolant/lubricant in the form of drops, producing a spray or mist in the cutting zone. Often, the amount of coolant (below 10 ml/min) is nearly 3 to 10 orders of magnitude lower than conventional flood cooling [39, 41]. Other advantages include reduced cost and tool wear, improved surface quality, a reduction in environmental and worker health hazards and nearly clean chips.

Soo et al. [42] performed a series of micro-drilling experiments on Al 6061 with 200 µm carbide twist drills. Compressed air, pure MQL and nano-fluid MQL with paraffin and vegetable oils as base fluids were used. Nano-fluid MQL with nano-diamond particles exhibited a significant reduction in drilling torques and thrust forces. In addition, the quality and quantity of drilled holes was superior to those obtained when pure MQL and compressed air was used. Zheng et al. [41] also indicate an improvement in tool life (Fig. 7) and reduced material adhesion while micro-milling Ti-6Al-4V in contrast with dry cutting. Air pressure and direction must be carefully selected as it shows an influence on burr formation.

Atomization based cutting fluid (ACF), is an alternative proposed by Nath et al. [43] were droplets are produced by an ultrasonic atomizer and further pressurized through an air-CO2 mixture. A better cooling and lubrication of cutting tool-chip interface was achieved while turning a titanium alloy Ti-6Al-4V, with a high chip evacuation at lower running cost and improved tool life up to 40-50% over flood cooling.

Some authors have studied minimum quantity lubrication techniques in combination with cooled air and showed that improved cooling and lubricating performance during machining steel and difficult-to-machine materials was possible [39]. MQL has a high potential in terms of improving overall process performance but some issues still have to be addressed regarding MQL supply (generator, coolant channels, control systems etc.), cutting tools and machine tool design.

2.3.4. Cryogenic cooling

Cryogenic cooling uses liquid nitrogen (LN2 at -196°C) or carbon dioxide (CO2 at -78°C) as support during machining through its application from the rake face or flank face of the cutting tool [44]. The use of liquid nitrogen is also an environmentally friendly alternative and non-toxic gas that contributes to process sustainability, while absorbing the generated heat and acting as a lubricant.

Micro-milling aided with cryogenic cooling has been applied successfully in soft polymer materials with low toughness were the material is changed from a rubbery state to a glassy state below the glass transition temperature. Several cutting tests were applied in Polydimethylsiloxane (PDMS) achieved better-shaped micro-grooves with a surface roughness up to 80 nm [45]. Friedrich [46] performed micro-milling of Polymethylmethacrylate (PMMA) below the glass transition temperature and found that as a result of the cryogenic cooling, the cutting force was held relatively constant. The specific cutting energy also increased linearly with a reduction in the temperature and a rougher surface finish. Extended life parameters were found while using a specially manufactured 22 µm diameter micro-tool with a 70 nm edge radius. Ghosh et al. [47] applied cryogenic machining to avoid cracking and surface defects while micro-milling a soft hydrophobic intraocular lens (IOL) material (Fig. 8).

Recent studies are focusing not only on the cryogenic effect on cutting forces and tool wear but also on surface integrity (roughness, microstructure, residual stresses, etc.) and proper parameters like number and positioning of nozzles, flow rates [39,44].

2.3.5. Gaseous cooling

Cooling systems based on gases are an alternative based on air, carbon dioxide, nitrogen, water vapor and others. Air is one of the most popular options mainly, due to its costs and low health risks and environmental impact. Although the air has a small cooling capacity, this property can be enhanced by its cooling, compression or liquefaction [39].

In cold compressed air systems, the required refrigeration capacity could be provided by various means such as liquid nitrogen, vapor-compression refrigeration, or through expansion by a vortex tube.

The vortex tube should be remarked as an excellent alternative, as it offers an instant high-efficiency response at low-cost for cooling with no maintenance, no risk of explosion, no electricity and no additional parts [13]. Its

principle based on the Ranque-Hilsch effect and its applications have extended in the field of the machining processes [13,14].

Through the combination of cold compressed air with an environmentally friendly lubricant like vegetable oil, lignin containing fluids or liquid nitrogen could not only reduce the cutting forces and temperature but also make it possible to apply high feed rates and cutting speeds [39].

2.4. Polymer machining

Polymer processing through machining may become an economical alternative while ultra-rapid prototyping lowers production volumes or custom components where complex shapes and high resolution is required [9,48]. Their machinability depends on mechanical properties, thermal characteristics like the glass transition temperature (T_g), melting temperature (T_m), and rheological properties as well as cutting conditions [9,47]. Material properties are highly temperature and strain rate sensitive. For example, stiffness increases significantly below T_g where a brittle behavior could be expected (Fig. 9). As temperature is increased, a sudden decline in stiffness is observed (or elastic modulus) facilitating greater deformations and increased adhesion towards a more rubbery state.

Ghosh et al. [47] indicated that the machining performance of a biopolymer is mainly determined by the relationship of its glass transition temperature to the room temperature. If no cooling is provided, the temperature rise could cause the polymer to be inside the rubbery region where the machined surface would be defined by significant tearing and waviness (Fig. 9). Orozco et al. [6] while micro-milling grooves in a PMMA polymer at different cutting depth, speed, and feeds, observed better results in down milling, and observed the easy formation of built up edge while machining at room temperature. Kakinuma et al. [45] applied cryogenic cooling to lower the cutting temperatures below the glass transition temperature to precisely shape some micro-grooves in PDMS. Friedrich [46] compared the specific cutting energy for PMMA at temperatures below 0°C finding high values comparable with materials like 6061-T6 Aluminum and oxygen-free high conductivity copper (OFHC). Also, as the work piece was cooled, the surface roughness increased indicating a more brittle machining condition.

Usefulness and advantages of micro-milling outweigh its limitations. Applications in micro-fluidics for machining micro-molds or micro-channels and features directly into the final polymeric part are some of the important roles that this process may play [48]. This research aimed to increase the knowledge of burr formation and minimization during polymer micro-milling and to link cutting parameters and cooling effects of a biopolymer for medical purposes.

3. Methodology

3.1. Tools and equipment

Gaseous refrigeration system: A vortex tube FRIGID-X 56108F manufactured by Nex Flow was used (Fig. 10). Five

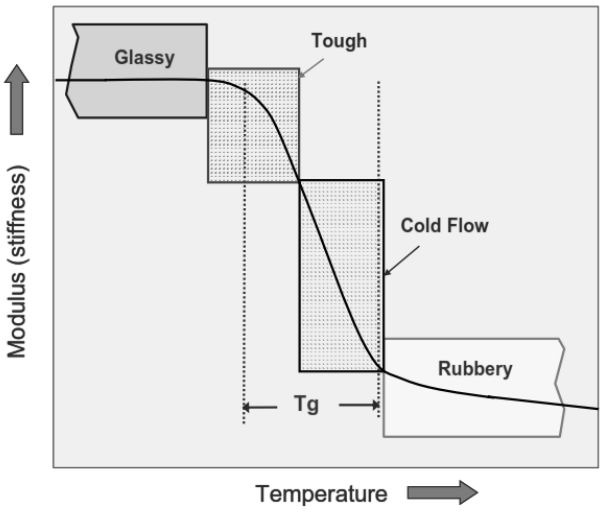


Figure 9. Polymers stiffness curve with machinability regions.
Source: [47].

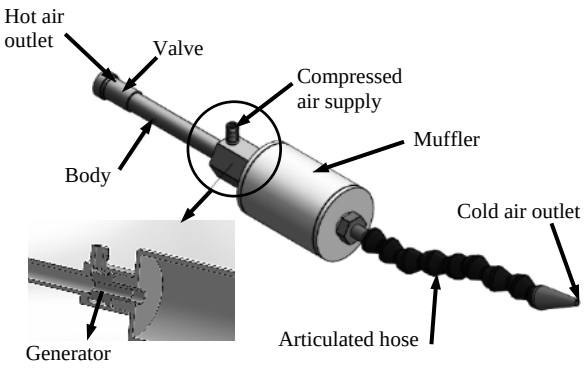


Figure 10. Vortex tube components.
Source: Authors.

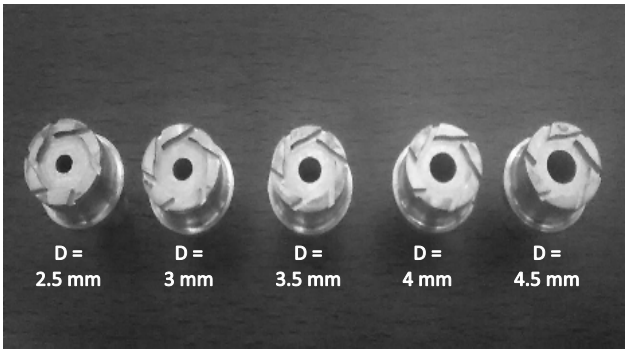


Figure 11. Generators configurations.
Source: Authors.

generators were manufactured in Aluminum 6061, with an internal diameter ranging from 2.5 mm to 4.5 mm with 0.5 mm increments. The generators were produced by turning and milling, using a standard geometrical configuration for this type of generator so that an additional variable is not present in the tests and that ensures the formation of the inner vortex formed by tangential slots of 1.5 mm thick (Fig. 11).

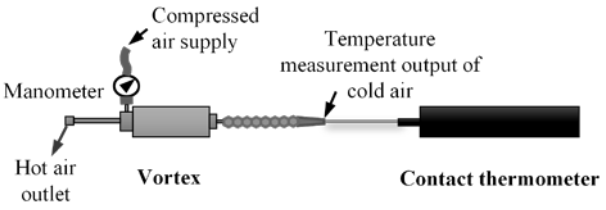


Figure 12. Vortex tube with instrumentation.
Source: Authors.

The vortex tube was coupled with each of the generators and was connected to a compressed air line which delivers air at 16°C and 87 psi (Fig. 12). To measure the inlet pressure analog manometer 0-140 psi was used. Temperatures were measured by a digital thermometer with a DeltaOhm contact sensor.

Machine-tool: An ultra-precision milling machine (KERN Evo) with computer numerical control (CNC) was used to perform the machining tests. Spindle speeds up to 45,000 RPM, feed rates of 16,000 mm/min with a 0.5 µm positioning resolution can be attained. A polymer concrete base, high stiffness and vibration damping, along with precision components make this possible.

Tools: The micro-end-mills used in this study were two flutes uncoated tungsten carbide (WC) with 200 µm diameter (reference 1610-0079.024), a total cutting length of 0.6 mm and a helix angle of 30° (Fig. 13). Tool edge radius was measured with scanning electron microscopy (SEM) by placing the best-fitted circle to the tool edge and was found to be 4 µm.

Workpiece material: Biopolymer samples used for intraocular lenses made of Filcon II Silicone Hydrogel from Contamac® were prepared in the form of 10 mm discs. Each part was glued onto an acrylic component and mounted on the mill press. After machining, no deburring processes were applied, and a TESA VISIO 200GL optical microscope was used for slot inspection and burr measurement. The experimental setup is shown in Fig. 14. The cold air outlet was oriented to the cutting zone to cool the area directly.

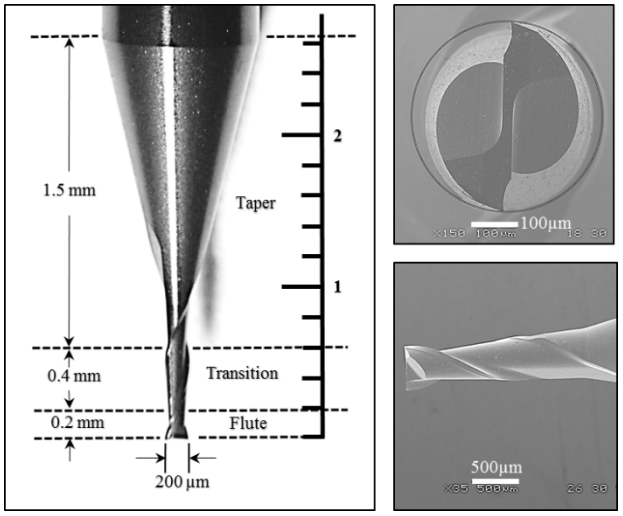


Figure 13. Micro-end-mill photographs.
Source: Authors.

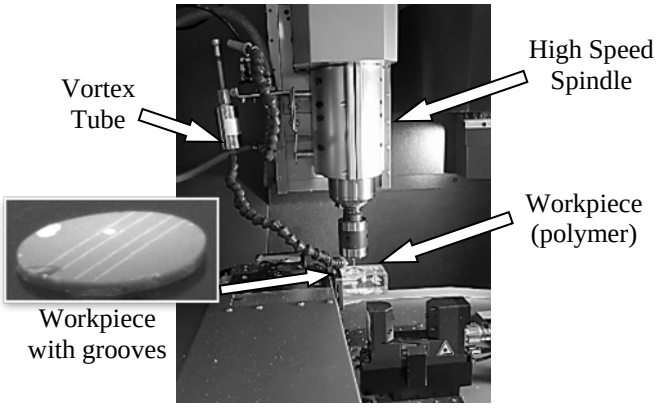


Figure 14. Experimental set-up of micro-milling machine.
Source: Authors.

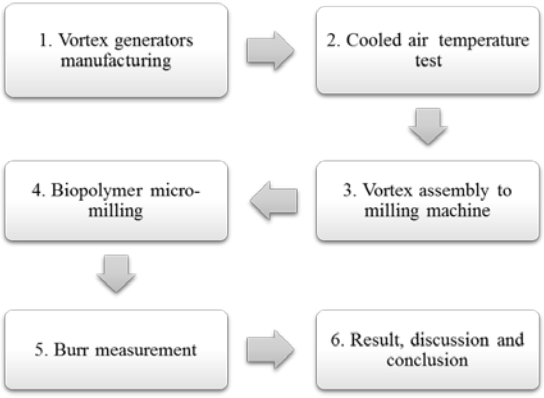


Figure 15. Methodology followed during machining and measurement.
Source: Authors.

3.2. Procedure

Fig. 15 outlines the steps followed during the micro-milling and succeeding burr measurement process. The three specimen used for the tests were divided into two sections, one section contains grooves milled without vortex cooling, and another includes grooves with gaseous cooling. The machining parameters used for all tests were a spindle speed of 25,000 RPM, a feed rate of 120 mm/min and, an axial depth of cut of 0.1 mm.

Vortex tubes were manufactured as described then tested individually for temperature measurements using a contact thermometer as shown in Fig. 12. Vortex assembly was installed and properly oriented on the milling machine, and biopolymer disc fixed into mill press. After each test was completed, top burrs are measured in each channel at different regions, and an average value is calculated to characterize burr size (Fig. 16). Exit and side burrs were not measured as their relative size was not high while compared to the top burr. Results were recorded and classified, and micro-milling performance was analyzed to modify parameters or test conditions.

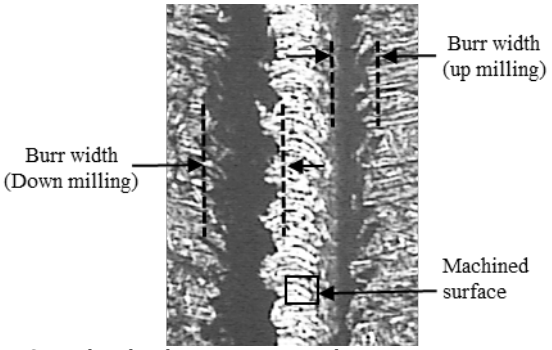


Figure 16. Top burr height measurement in the micro-grooves.
Source: Authors.

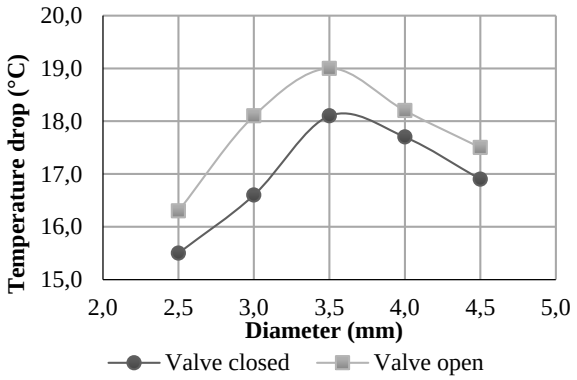


Figure 17. Generator diameter vs Temperature drop through vortex tube.
Source: Authors.

Table 2.
Temperature in the Cold Vortex tube outlet opening for different internal valve diameters and valve positions

Diameter (mm)	Cold temperature (°C)	
	Fully closed valve	Fully open valve
2.5	0.5	-0.3
3	-0.6	-2.1
3.5	-2.1	-3
4	-1.7	-2.2
4.5	-0.9	-1.5

Source: Authors.

Table 3.
Size of burrs at different cooling temperatures

Generator Diameter (mm)	Cooling temperature (ºC)	Burr length (µm)
Without vortex	16	185
2.5	-0.3	178
3	-2.1	228
3.5	-3	244
4	-2.2	70
4.5	-1.5	140

Source: Authors.

4. Results and analysis

The temperatures measured in the cold air outlet with fully open and fully closed valve positions are shown in Table 2. Air temperatures fluctuated from -2.2°C to 0.5°C. A non-linear behavior was observed for the temperatures, while compared to generator diameters. Maximum temperature drops between the compressed air supply and cold vortex outlet of 19°C was achieved with a generator diameter of 3.5 mm (Fig. 17), where cold and hot outlets were found at -3°C and 40°C respectively.

After machining, burrs were measured at different points within the grooves, and average measurements are shown in Table 3. An increase in burr size can be noted while using generators of 2.5 to 3.5 mm with lower air temperatures. This effect can be explained based on the fact that a higher restriction (pressure drop) in the vortex tube increases the temperature drop of cold air and also the mass flow fraction, (therefore its cooling capacity too). Larger diameters can promote lower pressure drops, higher cold air temperatures but reduced cooling capacity.

Fig. 18 illustrates a burr size comparison between a micro-milled groove without vortex tube cooling (air at 16°C), and the smallest burr found while applying compressed air cooling with a generator of 4 mm of diameter and a cold air flow at -2.2°C. In the first case, a constant burr width of 185 µm was found where the machined surface is almost impossible to see, as it is completely blocked by top burr (closed groove). A rubbery behavior was found with a continuous shape corresponding to a completely ductile formation mechanism [27].

When vortex cooling is applied, the burr width is reduced to 70 µm, and burrs seem to be discontinuous suggesting a decrease in workpiece deformation. This indicates that the cutting temperature has been lowered to a region where the stiffness of the material increases, thereby exhibiting a transitional brittle/ductile behavior as seen in Fig. 9.

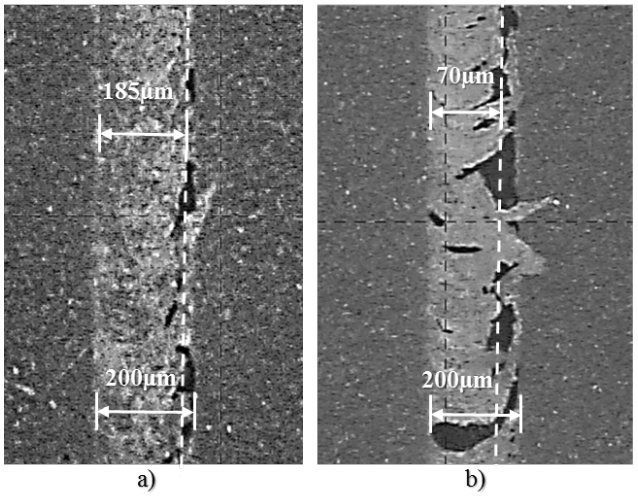


Figure 18. Biopolymer micro-milling burrs. a) without vortex tube. b) with vortex tube.
Source: Authors.

5. Conclusions

Micro-milling of a biopolymer applying compressed air cooling was performed. The role of air flow and temperature was examined towards a better burr control technique. Some

of the most relevant findings of this research according to the works reviewed in this study and experimentation, are summarized as follows:

- Burr formation in micro-milling is an undesirable and unavoidable process with complex geometry to be quantified. Several parameters may influence the formation such as tool material, shape and dimensions, depth of cut, feed rates, cutting speeds and coolant.
- Effective burr control strategies should be applied from design to manufacturing phases as some conventional deburring operations cannot be easily used for some applications. Materials, geometrical features, cutting parameters and strategies are some of the variables that are susceptible of been modified by designers and manufacturers.
- Gaseous cooling for micro-milling with compressed air is highly recommended, particularly in machining of biopolymers for medical applications not only to improve machining performance but also as an economical, environmentally friendly and hazard risk-free alternative.
- Experimental results show a significant top burr reduction while cooling with a vortex tube based on a generator with a 4 mm diameter. Air flow at -2.2°C allowed for a good cooling capacity while aiding in the chip removal process and a micro-burr morphology that decreases the time and cost requirements for the deburring processes.
- Future research could be applied to extend the experimental area and evaluate different polymers and wider machining parameters. An example is the application of gaseous refrigeration combined with cutting fluid atomization to not only reduce the cutting forces and temperature but also make it possible to apply high feed rates and cutting speeds with a cost-effective alternative.

References

[1] Câmara, M.A., Rubio, J.C.C., Abrão, A.M. and Davim, J.P., State of the art on micromilling of materials, a review. Journal of Materials Science & Technology, 28(8), pp. 673-685, 2012. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60115-7.

[2] Masuzawa, T., State of the art of micromachining. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 49(2), pp. 473-488, 2000. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63451-9.

[3] Jain, V., Sidpara, A., Balasubramaniam, R., Lodha, G., Dhamgaye, V. and Shukla, R., Micromanufacturing: A review—Part I. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 228(9), pp. 973-994, 2014. DOI: 10.1177/0954405414539487.

[4] Dornfeld, D., Min, S. and Takeuchi, Y., Recent advances in mechanical micromachining. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55(2), pp. 745-768, 2006. DOI: 10.1016/j.cirp.2006.10.006.

[5] Leo-Kumar, S.P., Jerald, J., Kumanan, S. and Prabakaran, R., A review on current research aspects in tool-based micromachining processes. Materials and Manufacturing Processes, 29(11-12), pp. 1291-1337, 2014. DOI: 10.1080/10426914.2014.952037.

[6] Orozco, Y.M., Pacheco, J.A. and Bris, J. Microfresado de polímeros biocompatibles. Ingeniería y Desarrollo, 30(1), pp. 61-78, 2012.

[7] Alexander, H., Brunski, J.B., Cooper, S.L., Hench, L.L., Hergenrother, R., Hoffman, A., et al., Classes of materials used in medicine. Biomaterials Science: An Introduction to materials in medicine, Academic Press, 1996, pp. 37-130.

[8] Ratner, B.D., Hoffman, A.S., Schoen, F.J. and Lemons, J.E., Biomaterials Science: An introduction to materials in medicine, Academic press, 2004.

[9] Ervine, P., O'Donnell, G.E. and Walsh, B., Fundamental investigations into burr formation and damage mechanisms in the micro-milling of a biomedical grade polymer. Machining Science and Technology, 19(1), pp. 112-133, 2015. DOI: 10.1080/10910344.2014.991028.

[10] Ducobu, F., Filippi, E. and Rivière-Lorphèvre, E., Chip formation and minimum chip thickness in micro-milling. Proceedings of the 12th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, pp. 339-346, 1, 2009.

[11] Venkatesh, V., Swain, N., Srinivas, G., Kumar, P. and Barshilia, H.C., Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations. Materials and Manufacturing Processes, 32(3), pp. 235-262, 2017. DOI: 10.1080/10426914.2016.1151045.

[12] Lekkala, R., Bajpai, V., Singh, R.K. and Joshi, S.S., Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling. Precision Engineering, 35(4), pp. 625-637, 2011. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2011.04.007.

[13] Liu, J. and Chou, Y.K., On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al–Si alloys with vortex-tube cooling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(3), pp. 635-645, 2007. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.04.008.

[14] Yalçın, B., Özgür, A.E. and Koru, M., The effects of various cooling strategies on surface roughness and tool wear during soft materials milling. Materials & Design, 30(3), pp. 896-899, 2009. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.05.037.

[15] Aramcharoen, A. and Mativenga, P.T., Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. Precision Engineering, 33(4), pp. 402-407, 2009. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2008.11.002.

[16] Oliveira, F.B. de, Rodrigues, A.R., Coelho, R.T. and Souza, A.F. de., Size effect and minimum chip thickness in micromilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 89, pp. 39-54, 2015. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001.

[17] Cheng, K. and Huo, D., Micro-Cutting: Fundamentals and Applications, John Wiley & Sons, 2013.

[18] Qin, Y., Micromanufacturing Engineering and Technology, Elsevier Science, 2015.

[19] L'vov, N., Determining the minimum possible chip thickness. Machines & Tooling, 4, pp. 40-45, 1969.

[20] Weule, H., Hüntrup, V. and Tritschler, H., Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 50(1), pp. 61-64, 2001. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62071-X.

[21] Bissacco, G., Hansen, H.N. and Slunsky, J., Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling. {CIRP} Annals - Manufacturing Technology, 57(1), pp. 113-116, 2008. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.085.

[22] Son, S.M., Lim, H.S. and Ahn, J.H., Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(4-5), pp. 529-535, 2005. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.09.001.

[23] Vogler, M.P., DeVor, R.E. and Kapoor, S.G., On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part I: Surface generation. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126(4), pp. 685-694, 2005. DOI: 10.1115/1.1813470.

[24] Yuan, Z.J., Zhou, M. and Dong, S., Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. Journal of Materials Processing Technology, 62(4), pp. 327-330, 1996. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02429-6.

[25] Guo, X., Zhang, X., Liu, Z., Zhang, D., Jin, Z. and Guo, D., Modelling the effects of tool edge radius on micro machining based on smooth particle hydrodynamics simulation method. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 16(3-4), pp. 303-317, 2014. DOI: 10.1504/IJMMM.2014.067310.

[26] Shi, Z., Li, Y., Liu, Z. and Qiao, Y., Determination of minimum uncut chip thickness during micro-end milling Inconel 718 with acoustic emission signals and FEM simulation. The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology, pp. 1-9, 2017. DOI: 10.1007/s00170-017-0324-z.
[27] Hashimura, M., Hassamontr, J. and Dornfeld, D.A., Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 121(1), pp. 13-19, 1999. DOI: 10.1115/1.2830566.
[28] Chern, G.-L., Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(12-13), pp. 1517-1525, 2006. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.006.
[29] Malekian, M., Mostofa, M.G., Park, S.S. and Jun, M.B.G., Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. Journal of Materials Processing Technology, 212(3), pp. 553-559, 2012. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.022.
[30] Shi, Z.Y. and Liu, Z.Q., Numerical modeling of minimum uncut chip thickness for micromachining with different rake angle. In: ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, June 13–17, 2011, pp. 403-407.
[31] Lai, X., Li, H., Li, C., Lin, Z. and Ni, J., Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(1), pp. 1-14, 2008. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011.
[32] Lee, K., Stirn, B. and Dornfeld, D.A., Burr formation in micro-machining aluminum, 6061-T6. In: Inasaki, I., editor. Boston, MA: Springer US, pp. 47-51.
[33] Schäfer, F., Grundlagen zur Lösung von Entgratproblemen. Entgrat-Technik, Entwicklungsstand und Problemlösungen, Reihe Kontakt und Studium, Oberfläche, 392, pp. 33-42, 1992.
[34] Schueler, G.M., Engmann, J., Marx, T., Haberland, R. and Aurich, J.C., Burr formation and surface characteristics in micro-end milling of titanium alloys. In: Aurich, J.C., Dornfeld, D., editors. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg pp. 129-138.
[35] Saptaji, K., Subbiah, S. and Dhupia, J.S., Effect of side edge angle and effective rake angle on top burrs in micro-milling. Precision Engineering, 36(3), pp. 444-450, 2012. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2012.01.008.
[36] Yadav, A.K., kumar, M., Bajpai, V., Singh, N.K. and Singh, R.K., {FE} modeling of burr size in high- speed micro-milling of Ti6Al4V. Precision Engineering, 49, pp. 287-292, 2017. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.02.017.
[37] Chen, M.J., Ni, H.B., Wang, Z.J. and Jiang, Y., Research on the modeling of burr formation process in micro-ball end milling operation on Ti-6Al-4V. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62(9-12), pp. 901-912, 2012. DOI: 10.1007/s00170-011-3865-6.
[38] Leopold, J. and Wohlgemuth, R., Modeling and simulation of burr formation: State-of-the-art and future trends. In: Aurich, J.C., Dornfeld, D., editors. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg pp. 79-86.
[39] Benedicto, E., Carou, D. and Rubio, E.M., Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes. Procedia Engineering, 184, pp. 99-116, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.075.
[40] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W. and Wakabayashi, T., Dry Machining and minimum quantity lubrication. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 53(2), pp. 511-537, 2004. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60027-4.
[41] Zheng, X., Liu, Z., Chen, M. and Wang, X., Experimental study on micro-milling of Ti6Al4V with minimum quantity lubrication. International Journal of Nanomanufacturing, 9(5-6), pp. 570-582, 2013. DOI: 10.1504/IJNM.2013.057600.
[42] Nam, J.S., Lee, P.H. and Lee, S.W., Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51(7-8), pp. 649-652, 2011. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.04.005.
[43] Nath, C., Kapoor, S.G., Devor, R.E., Srivastava, A.K. and Iverson, J., Design and evaluation of an atomization-based cutting fluid spray system in turning of titanium alloy. Journal of Manufacturing Processes, 14(4), pp. 452-459, 2012. DOI: 10.1016/j.jmapro.2012.09.002.
[44] Kaynak, Y., Lu, T. and Jawahir, I.S., Cryogenic machining-induced surface integrity: A review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining. Machining Science and Technology, 18(2), pp. 149-198, 2014. DOI: 10.1080/10910344.2014.897836.
[45] Kakinuma, Y., Yasuda, N. and Aoyama, T., Micromachining of soft polymer material applying cryogenic cooling. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2(4), pp. 560-569, 2008. DOI: 10.1299/jamdsm.2.560.
[46] Friedrich, C.R., Near-cryogenic machining of polymethyl methacrylate for micromilling tool development. Materials and Manufacturing Processes, 15(5), pp. 667-678, 2000. DOI: 10.1080/10426910008913012.
[47] Ghosh, R., Knopf, J.A., Gibson, D.J. and Mebrahtu, T., Cryogenic machining of polymeric biomaterials: An intraocular lens case study. pp. 54-64.
[48] Guckenberger, D.J., Groot, T.E. de, Wan, A.M.D., Beebe, D.J. and Young, E.W.K., Micromilling: a method for ultra-rapid prototyping of plastic microfluidic devices. Lab Chip, 15(11), pp. 2364-2378, 2015. DOI: 10.1039/C5LC00234F.

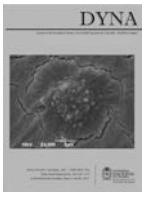
M. Miranda-Giraldo, received BSc. degree in Mechanical Engineering in 2008, and a Sp. degree in Quality Management in 2013, both from the Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia. From 2007 to 2014, he worked for the metalworking sector and hydraulic company. In 2017 he received a MSc. degree in Mechanical Engineering from Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Currently, he is a lecturer in the Mechanical Engineering Department of Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. His research interests include: Micro-machining, micro-milling, bio-materials.
ORCID: 0000-0002-6795-076X.

D.A. Serje-Martínez, received BSc. and MSc. degrees in Mechanical Engineering from Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia in 2009 and 2010, respectively. Currently, he´s pursuing a Ph.D. degree from the same university thanks to a research grant from Colciencias Ph.D. National Scholarship. His principal research interests are design engineering, machinery modeling and simulation, and micro-machining.
ORCID: 0000-0001-9963-9231.

J.A. Pacheco-Bolívar, is currently an assistant professor in the Mechanical Engineering department in Universidad del Norte, Barranquilla-Colombia. He received his BSc. degree in Mechanical Engineering in 1998 and also a MSc. in 2003 in Mechanical Engineering from Universidad del Norte. He also received his Ph.D. in Engineering Science from ITESM, Monterrey Mexico. His current research interest is Dynamics and Synthesis of parallel mechanism, robotics, and micro-machining.
ORCID: 0000-0001-7632-7227.

J.L. Bris-Cabrera, is currently associate professor in Mechanical engineering department in Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. He received his BSc. degree in Mechanical Engineering in 1994 from Universidad del Norte and M.Sc. degree in Mechanical Engineering in 2000. He also received his Ph.D. in Materials Science and Metallurgy from Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, Spain. His current research interest is materials science, micro-manufacturing.
ORCID: 0000-0003-2009-8044.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Ubiquitous learning model based on platforms of multi-screen TV (uLMTV)

Gustavo Alberto Moreno-López [a], Edgar de Jesús Ramírez-Monsalve[b], & Jovani Alberto Jiménez-Builes [b]

[a] *Facultad de Ingenierías, Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia, gamoreno@elpoli.edu.co*
[b] *Facultad de Ciencias Humanas y Económicas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, eramirezmo@unal.edu.co*
[b] *Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, jajimen1@unal.edu.co*

Received: April 20th, de 2017. Received in revised form: September 15th, 2017. Accepted: October 09th, 2017

Abstract
Although ICTs have strengthened educational processes, there are still some challenges on flexibility and convergence, among others. In this article, we propose a ubiquitous learning model (u-learning) that can have a positive impact on the teaching/ learning process since it considers video as an important element which can be displayed on any screen at any time and place. Besides indicating the elements making part of the model, alternatives of implementation, uses of video and experimentation with a cloud supported video platform are shown here. The results demonstrate an optimal deployment of the video at different devices when using a multi-screen video platform connected to the Internet, and show this model as a good reference to projects an u-learning service.

Keywords: u-learning; ubiquitous computing; cloud computing; multi-screen TV; TV/video platforms everywhere.

Modelo de aprendizaje ubicuo basado en plataformas de televisión multipantalla (uLMTV)

Resumen
Las TIC han potencializado los procesos educativos, pero aún hay desafíos de flexibilidad, convergencia, entre otros. Este artículo propone un modelo de aprendizaje ubicuo (u-learning) que puede impactar positivamente al proceso de enseñanza/aprendizaje, ya que contempla el video como un elemento importante, que se puede desplegar en cualquier pantalla, en cualquier momento y lugar. Además de indicar los elementos que intervienen en el modelo, se presentan alternativas de implementación, usos del video, y una experimentación con una plataforma de video basada en la nube. Los resultados demuestran un despliegue óptimo del video en diferentes dispositivos cuando se utiliza una plataforma de video multi-pantalla conectada a Internet, y muestran este modelo como una buena referencia para proyectar un servicio de u-learning.

Palabras clave: aprendizaje ubicuo; computación ubicua; computación en la nube; TV multipantalla; plataformas TV/video en todas partes.

1. Introduction

Although ICT have significantly contributed to education by supporting the teaching-learning process, some challenges remain and here are still several aspects to improve in the educational field such as: formal education during working life, lifelong learning, greater access to education for all, availability, connectivity, interaction, flexibility, mobility, overcoming space-time barriers, access to distance learning resources, awareness of ICT use, significant contents, relevance, innovation, effectiveness, [1-6], as well as inequity and inclusion [7], and greater appropriation for educational use [8]. Also, there is the challenge for teachers to understand the context of young people (known as digital natives or millennials) [9], because they could seem distracted by electronic devices and bored in a traditional class. Thus, the teachers should use different strategies, adapt new technologies and even acquire and apply digital abilities to be able to motivate their students.

U-learning and video platforms everywhere can

How to cite: Moreno-López, G.A., Ramírez-Monsalve, E.dJ. and Jiménez-Builes, J.A., Ubiquitous learning model based on platforms of multi-screen TV (uLMTV) DYNA, 84(203), pp. 160-169, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

contribute to overcome these challenges. U-learning is one of the application fields of ubiquitous computing, whose founder was Mark Weiser [10]. He laid out that computing would be everywhere, in a transparent and invisible way to the user. Ubiquitous learning or u-learning is defined as the learning that can be obtained by using any device, at any time and place, and is embedded in everybody's daily life [11-13]. U-learning covers other ICT models for education such as computer based training-CBT, e-learning, m-learning, and t-learning, by using different ICT resources.

This article proposes a model of u-learning based on platforms of Multi-screen TV (uLMTV), which allow to display video on different screens under connectivity contexts, making possible to widen its application field in education while continuing projecting the reflection about u-learning. Trends in digital technology, convergence, and cloud computing, among others, are taken into account. In this paper, multi-screen TV is also related to television everywhere (TVE), where TVE refers to video and/or TV contents that can be seen "everywhere", on different screens (multiscreen), supported by Internet.

The rest of the article is organized as follows. Chapter II offers a review of the literature. In chapter III, the method is explained. In chapter IV, the results are shown, in which we present a proposal based on video platform everywhere, the uses of video as main content, implementation alternatives, the detailed uLMTV model and an experimentation scenario. In chapter V, the discussion is presented. Finally, the conclusions are presented.

2. Materials

2.1. U-learning models

Another definition of u-learning is the ecosystem where any person wishes to learn actively about any area of knowledge; which can be accessed from any place at any time, keeping contact with any other person by using any ICT resource and ubiquitous device [14]. Immediacy, accessibility, interactivity, context awareness, flexibility, scalability, security, daily ubiquity, portability, functionality, user-adjustability, interoperability, learnability, usability, and interconnectivity can be counted as features of u-learning [15-21].

In the literature, we found several proposals of u-learning models, most of which use mobile devices, in some cases, together with sensory technology. But we find little detail of the models or clarity for its actual implementation. They overlook the possibility of displaying content on any screen; or the use of video as a key element that could strengthen the learning process even more. Hijazi and Itmasi [22] propose a Crawler Based Context Aware Model for Distributed e-Courses through Ubiquitous Computing, in which they use PC and mobiles within a university campus. In Rabello et al [23] a Collaborative Multi-agent Model is shown for Decentralized Ubiquitous Education Environments, applied in a simulation with mobiles and for this, agents must be installed. A model for profile management [24] uses semantics in a simulation scenario. Joo and Park [25] propose a U-SM model (Ubiquitous Scaffolding and Mentoring) which applies online advising online and the necessary support for students who have just started their learning process, based on computers distributed around the campus and on a LMS platform. Nevertheless, technological aspects and other trends are not mentioned, and its context is limited. Caytiles [20] presents a model of a ubiquitous learning environment based on mobile devices and wireless sensor networks. Díaz and Rusu [9] propose a methodological model of computer-supported collaborative learning based on collaboration and communication tools, in order to define activities and spaces of work, but they do not mention how it would be technologically supported. In [26] it is shown an instructional model of u-learning using the project-based learning approach to improve students' abilities of creation-innovation; it only sets out the use of PC and mobiles, though.

2.2. Video or TV everywhere

TV has evolved [27]; first it was the over-the-air broadcasting, then the transmission of several channels over cable, satellite, and also over telecom networks. Later, in the 90´s, there was the third generation of TV, with the platforms of digital TV and the beginning of massive implementation of digital terrestrial television, which led to optimize the electromagnetic spectrum, and to have a better quality of image and sound. Towards mid-2000s, along with the adoption of the Internet broadband, the increase of the transmission speeds, the download of video content and online streaming have taken rise. Video and TV online continue growing [28], becoming the fourth generation of TV, based on online transmission of connectivity to broadband Internet. In these new scenarios of TV, as Noam [27] mentions, new elements appear, such as resolution (4K and 8K), person-to-computer interactivity, 3-D, peer-interactivity, computer-enhanced reality, user-generated content, peer-to-peer content, asynchronous viewing and individualization, multi-platform distribution, branching plotlines, user participation, and globalization. Putting these and other elements together makes possible to have a high-resolution, immersive, participatory, customized, social, TV of wider experience.

As it is indicated by Sanz and Crosbie [29], we go from closed TV platforms (traditional service) to open TV platforms by using Internet or hybrid platforms that can give more value to the company and to the user. The understanding and connection with the users is one of the main benefits of the distribution in digital platforms that imply bidirectional connectivity [30].

Some examples of this route of convergence are the TV connected to Internet (with smart TVs or through computers, video game consoles, set top box, blue ray readers, etc.) and the HbbTV standard [31] as hybrid between TV Broadcast and Broadband promoted in Europe. Different TV suppliers are implementing hybrid solutions [32] like broadcast + IPTV (ex: DVB-T+IPTV), or broadcast + OTT, or IPTV + OTT, or migrating to offer their services via Internet (known as OTT), and migrating towards multiplatform strategies for distribution of content [30]. That is why TVE appears, technically known as multi-channel programming distributors (MVPDs), which cable operators began to use as

Comcast to offer an online aggregation of television programming [28].

Television can then be seen not only on a TV set but on multi-screen TV services [33], in which users can see the videos on different screens (e.g. smartphones, game consoles, tablets, PCs, and TVs). The fast adoption of mobile and portable devices as smartphones and tablets, known as second screens, transforms the traditional form of watching TV.

Video leads traffic growth in Internet [34], and many online video platforms (OVP) prevail in the market, such as vimeo, telestream, among others. Thanks to ubiquitous devices, broadband growth, wireless technologies, digital convergence, OTT services, cloud computing, CDN, among other advances, users can enjoy content in any place at any time.

2.3. Over The Top (OTT)

OTT is the delivery of video, audio, TV, and other services via Internet directly to the user's connected devices [35] (Fig.1). Some examples of OTT services are Youtube, Whatsapp, Netflix, HBO go, Twitter, Hulu, Skype and other apps. TV suppliers [36] constantly look to offer OTT services to their customers; for instance, UNEPLAY and Caracolplay, in Colombia; Directvplay, in Latin America; Xfinity, in the United States; Tving, in South Korea; and iPlayer of the BBC, in England.

2.4. Cloud computing

According to The Information Technology Laboratory (ITL) at the National Institute of Standards and Technology (NIST) [37], cloud computing is a model for enabling ubiquitous, convenient, on-demand network access to a shared pool of configurable computing resources (e.g., networks, servers, storage, applications, and services) that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or service provider interaction.

This cloud model promotes availability and is composed of five essential characteristics: On-demand self-service, Broad network access, Resource pooling, Rapid elasticity, and Measured service [37]. In addition, the cloud computing model considers three service models (Cloud Software as a Service (SaaS), Cloud Platform as a Service (PaaS), Cloud

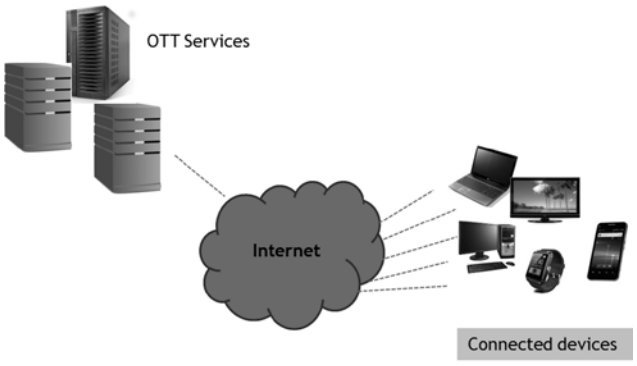


Figure 1. Example of OTT services
Source: The authors

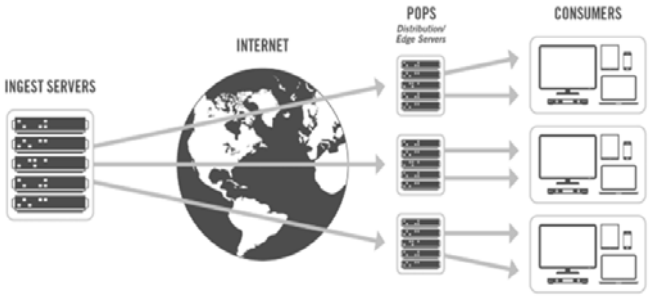


Figure 2. Topology of a CDN
Source: [39]

Infrastructure as a Service (IaaS)); and four deployment models (Private cloud, Community cloud, Public cloud, Hybrid cloud).

Other characteristics of cloud computing are manageability, scalability, availability, economical, on-demand service, expedient, ubiquitous, multitenant, elasticity, and stability. The user can select the resource as required (hard disk, operating system, networking, access control, among others), benefiting from "pay as you go" (PAYG) model, in which users pay for what they use [38].

2.5. Content Delivery Network (CDN)

A CDN is a system of software, hardware and network components that acts like a great distributed computer [39]. This system allows to copy the contents or objects in different servers located in different geographic areas to optimize delivery performance and to be experienced by users [40]. Fig. 2 illustrates the elements of CDN such as servers and points of presence (POP). Examples of CDN suppliers are Akamai and limelight.

2.6. Encoders and transcoding technologies

MPEG-H/H.265 suite [41,42], -which is focused on the delivery of media in heterogeneous environments, IP networks and digital broadcasting networks- includes HEVC compression format (high efficiency video coding), which is more efficient in mobile applications and supports hi-res 4k/8k, 3D TV. It also includes the MMT standard (The MPEG Media Transport) that defines the Encapsulation, Delivery, and Signaling, as well as the application layer forward error correction (AL-FEC), among others. Transcoding is defined as converting one compressed input bitstream to an outgoing bitstream [43]; that is to say, it can change from one format to another to adapt the content according to the device. Widely used technology ABR (adaptive bitrate) encodes a video at multiple bitrates and maximizes the video bitrate within the available bandwidth. This allows to deliver a higher fidelity video over HTTP when possible, and dropping to lower quality rather than causing an interruption of playback of the excessively high bitrate video [44].

3. Methods

In order to obtain the model proposal, research was led by using exploration, reviewing and interpretation of the theory

available in the academic community. Description and innovation were also used, and the contribution of technological trends solutions was considered. The methodology is based on the design- based research (DBR) [45], and at agile methodology [46] thanks to the cyclical character in design. Among the instruments used, we can find literature review, documentation and experimentation.

Five stages were defined: 1) Review of the theoretical framework and tendencies in u-learning, cloud computing, OTT, CDN, among others. 2) Analysis to identify key aspects and basic requirements as well as identification of implementation options. 3) Definition of the model, components and key aspects. 4) U-learning prototype for deployment in several screens. 5) Model validation by means of an experimental case and tests. This paper will mainly focus on the model and an experimental case will be set out as an example for the prototype and validation.

4. Results

4.1. Video everywhere platform

Those platforms must be able to adapt contents (like video) into any format and device. This platform must have the necessary technologies of encoding, transcoding, gateway or middleware, as well as storage option, management, encapsulation and distribution technologies, among others. The ideal is for it to be "cloud" supported", due to its characteristics and advantages. Video platform(s) can be complemented with other services of cloud computing (e.g. Google apps or G suite). The Fig. 3 illustrates the scenario.

Fig. 4 lays out different uses of the video, such as to be used in the classroom or online at any time, recording conferences, documenting cases, sharing knowledge, performing competitions, interactive quizzes, external communications with alumni, in social networks, among others.

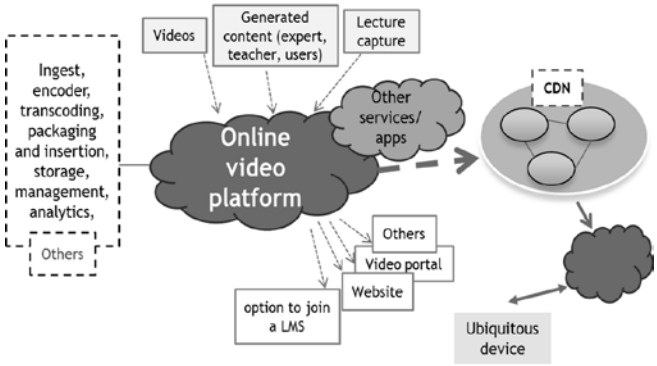


Figure 3. Proposal of video everywhere platform
Source: The authors



Figure 4. Uses of the video
Source: The authors

Table 1.
Examples of implementation alternatives

Alternative	Examples	Comment
Using common channels	Youtube	It is considered as a social network.
With aaS video suppliers	Viacess orca Elemental Kaltura	Main services are defined already.
Creating the solution of cloud-supported video	Amazon web sevices AWS Cloud google Microsoft azure Vpaas-kaltura	Configuration and development are needed. It requires more knowledge.

Source: The authors

4.2. Implementation alternatives in video everywhere platforms or multi-screen TV

The implementation of a u-learning service based on video everywhere platforms can be: a) on-premises, having all the necessary infrastructure of hardware, networks and software; b) hybrid, having certain own infrastructure and other services in the cloud with a third party; and c) cloud supported, in which infrastructure is supported by another company. The Table 1 indicates implementation examples.

The platform to be implemented or chosen must consider the codification, trans-codification, transport and display to different devices, storage, and CDN options, among others.

4.3. uLMTV model

uLMTV Model (ubiquitous learning based on platforms of multi-screen TV) is defined as an ecosystem made up of multiple items that contribute -to a certain degree- to the u-learning solution. It looks like the solar system, where all elements are somehow linked to each other. It considers several levels, each one of them including a group of specific factors. There is a feedback loop (between the levels and the intra-level) to redefine or project the improvements of the ubiquitous learning service. The Fig. 5 illustrates the model:

- First level - Initiation: They are related to the first steps, the u-learning idea, the actors that can take part, technology trends, and other necessary steps. See Table 2.

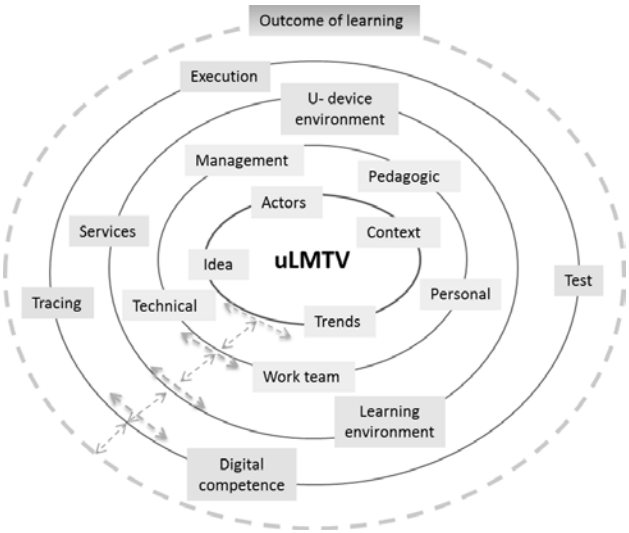


Figure 5. Elements of the proposed model
Source: The authors

Table 2.
Aspects of the initiation level

Factor	Description
Idea	General concepts, characteristics, and uses of u-learning
Actors	Professors, students, directors, companies, institutions, among others
Technology trends	multiscreen platforms, CDN, OTT, transcoding, connected devices, broadband, among others
Context	Education sector, corporate sector, health, intelligent city, social inclusion, government, etc.
Others	Draft proposal, among others.

Source: The authors

- Second level - Planning: it includes the requirements of technological and technical aspects as well as pedagogical and personal ones, teamwork making, or management groups that the u-learning service will have. Tables 3 to 7 detail such requirements.

Table 3
It is suggested to define a work team.

Factor	Description
Implementation	Define if it must be taken or not into account.
Interdisciplinary	YES teachers, adviser, engineers, pedagogue, multimedia and audiovisual programmers, among others.

Source: The authors

Table 4.
Technological aspects

Technological requirements	Description
Type of solution	On premise Hybrid (own part and rented part) Cloud (by a third party)
Transmission	Technology for TV or video everywhere (CDN, transcoding, compression enconder, or encryption and distribution to any platform, cameras, etc.) Service type (VoD, live, broadcast)
Internet connectivity infrastructure	Wireless: Wifi, cellular network (3G, 4G or 5G), satellite networks Wire: ADSL, optical fiber, cable, etc. Hybrids: wireless and wire
Devices (Input and Output)	TV, PC, smartphone, tablet, sensor technology, others.
Communication System	One way interaction (student - content) Two ways interaction (student - teacher, student-student, student - learning environment) Interaction complemented with ICT devices and resources (sensor technology, second screen app, social network, etc.)
Storage system	Contents and videos repository
Complementary systems	Management systems (service, contents, users, etc). Statistics or analytics Monitoring, among others.
Security	Data integrity, Authentication Data privacy Contents or DRM
Scalability	In the amount of users, contents and services
Context awareness	The content (video) adapts to the device and information of the user according to the system's sensing functions.
Daily Ubiquity	This system supports the information to be in any place at anytime and on any screen.
Accessibility	Available information, accessibility to ICT resources, applications, infrastructure, and standards.
Functionality	The system works.
Immediacy	The information is obtained "quickly".
Usability	The system or solution allows the activities to be performed quickly and easily.
Portability	Solution can be given in easily carry-on devices.
Interoperability	It works in different systems or devices.
Flexibility	The solution can be adapted to the most suitable form.
User-adjustable	The system could consider the users' profiles, follow-up and feedback, and the possibility to choose.
Learnability	The system is able to learn, which eases the students' learning process.

Source: The authors

Table 5.
Personal or target group's needs

Requirements	Description
Type of learning	Formal learning Nonformal learning Informal learning
Target group	Aimed at ...
Special considerations	Ages, handicaps, visual or auditory deficiency, or none
Situation	He/She works/studies, He/she studies only, He/She works only, level of education, others.
Learning objective	Define objectives
Accessibility	Geographic, personal, technical
Motivation, expectation	Motivation for technology use, expectations about devices, on-line learning experiences

Source: The authors

Table 6.
Pedagogical aspects

Requirements	Description
U-learning role	Complementary Partial Substitute
Delimitation	Area of knowledge

	Define themes or program
Content	Learning material (video and others)
	Guides
	Others
Interaction	Student - contents
	Student - teacher
	Student - student
	Student - learning environment
Strategies	Flipped class, BYOD, active methodologies… among others
Activities	Define according to learning objectives...
Freedom of choice	Possibility to choose the place, moment and ICT resources
Evaluation	Self-evaluation
	Between peers
	Expert - traditional
	Activities (samples, exposition, use of video for evidences, others)
	Synchronous or asynchronous
	Note: use rubrics
Customized learning	If it is possible, define according to profiles, knowledge/abilities, work speed, etc.

Source: The authors

Table 7.
Management aspects

Requirements	Description
Implementation	Define if it must be taken or not into account.
Type	Manual or automated
Supported with systems	LMS, CMS, LCMS, LAMS, combined, others
Follow-up	Learning analytics, others

Source: The authors

Table 8.
Aspects of product/ implementation level

Factor	Description
Ubiquitous device environment	Devices
	Connect to internet network (wireless, wired, network convergence), TVE Infrastructure (CDN, servers, encoder, transcoding, distribution, etc.)
Learing environment	Platform (content-video display to different screens webpage, user)
	Resources (applications, contents, google app, social media, management systems, learning objects, among others)
Services	Activity (as a teacher, among peers, of communication, e-portfolio, etc.)
	Contents (videos, guides, rubrics, etc)
	Distance learning, link, educational resources, feedback, support

Source: The authors

- Third level - Production/implementation: once the requirements are defined, we proceed to the learning environment and service construction, among others. It is also necessary to know if it counts on a part of the infrastructure or on all of it, or if it will be outsourced. See Table 8.
- Fourth level - u-learning service implementation: it includes the evidence of the display, the implementation or execution of the service, the strengthening and development of digital abilities, and the service monitoring. See Table 9.

Table 9.
Aspects of u-learning service implementation level

Factor	Description
Deployment tests	Tx and Rx verification
	In several devices
Execution service	Focal groups - pilots
	Real scenarios
Stengthen digital abilities	Stimulate or strengthen the use and appropriation of ICT to look for, organize, create, share, and secure the information and work in the digital society.
Service monitoring	Functioning monitoring
	Monitoring the use by users
	Support

Source: The authors

Table 10.
Aspects of the learning result level

Factor	Description
Expectation process	Satisfaction Degree
	New knowledge/abilities
Impact of the service	Usability degree
	Favorability to learning
	Performance
Others	To be defined according to results…

Source: The authors

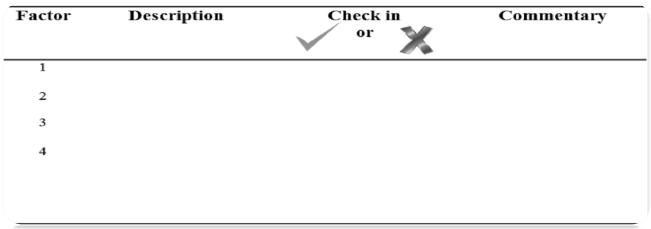


Figure 6. Proposed checklist
Source: The authors

- Fifth level - learning result: it must be the main aspect: how the teaching/learning process was favored and what the obtained impact of the u-learning service is. See Table 10.

4.3.1. Checklist

To define what aspects or elements will be considered in each level, we propose to check with a ✓if it is carried out or with an X if it is not, and to have another field to be filled in with comments, as it is shown in Fig.6.

4.4. Experimental case

As a proof of concept, and to exemplify the u-learning service based on platforms of multi-screen TV, a scenario with several complementing videos for the internship in the area of telecommunication has been set up. The video was embedded in the cloud supported with video platform kaltura, and its link is published via e-mail or WhatsApp.

We defined aspects such as educational context, formal education, u-learning role (complementary), topics on optical fiber connection in the academic subject of optical communication,

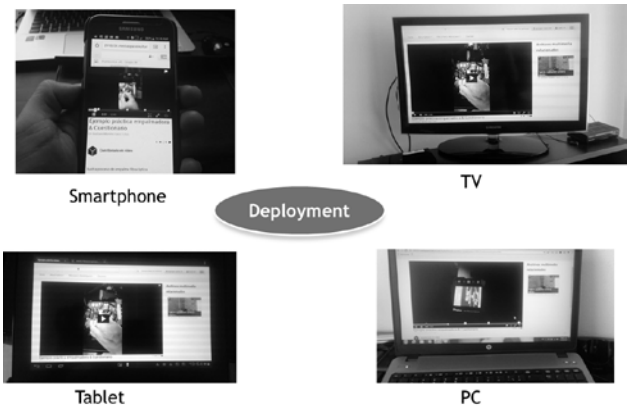


Figure 7. Deployment tests
Source: The authors

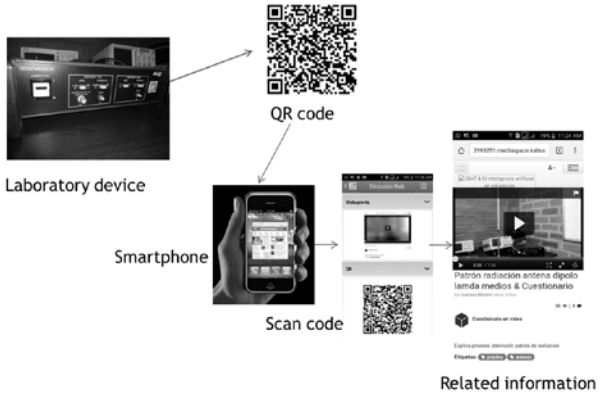


Figure 8. Case of interaction with QR code in device
Source: The authors

Table 11.
Plataforms used

Platform	Plays
COMPUTER	66
MOBILE	19
DMR	4
TABLET	3

Source: The authors (based on a report of analysis in platform kaltura)

and obtaining pattern radiation in the subject radio-propagation and antennas; content (video), an interactive feedback quiz, additional interaction by means of QR code, video platform used (kaltura). Tests are carried out with several ubiquitous devices such as smartphones, TV, PC and Tablets, connected to Internet through wireless networks (wifi, cellular), and wire net. See Fig. 7.

Fig. 8 illustrates a case using sensor technology (QR codes, and the camera of a Smartphone) in a laboratory device.

92 video views were performed in four platforms (PC, Tablet, Smartphone, and in TV connected with google TV), Table 11. 90 out of 92 views were seen in Colombia and two in the United States, confirming coverage in any place.

Views were seen in 8 different operating systems (Table 12).

Table 12.
Operating systems used

Operating System	Plays
WINDOWS 7	64
ANDROID5	15
GOOGLE TV	4
ANDROID4 TABLET	3
IOS9 IPHONE	2
ANDROID MOBILE	2
WINDOWS 10	1
LINUX	1

Source: The authors (based on a report of platform kaltura)

The 92 reproductions were seen in 10 different Web browsers as chrome, chrome mobile, firefox, IES, safari4, and mobile safari.

5. Discussion

The model shown is an example to perform a u-learning service based on platforms of multi-screen TV, where more than one device can be used to interact with the content. The video is considered as an important element to be implemented in different activities of the teaching/learning process. Video platforms that best fit the needs and conditions of teachers and institutions must be identified. For this test, it was defined to use video platform kaltura, which besides offering a free version, allows to add an interactive quiz application to the video, favoring a different experience when watching the video. In addition, this video platform is a cloud-supported service, which favors the u-learning characteristics.

It is possible to use several video platforms or other cloud support services/applications to complement the activities within the teaching/ learning process; for example, youtube channels. These allow students to create their own videos, or to share and record an e-portfolio by means of a blog.

Some of the elements laid out in the model were positively experienced, like the sense of ubiquity, interoperability, functionality, portability, and context awareness (the video was adapted in different test devices, and using sensor technology with QR codes). A longer curve of time takes place at the beginning of the learning process, especially about the technological aspects while the u-learning environment and services are developed and configured. A wider implementation of u-learning will require to consider many more elements, as well as the resources and efforts needed to carry it out. It is here where creativity, innovation and free resources (mainly for education) are needed.

The tests of the video deployment worked properly in the various devices and operating systems used. The interaction with QR code arranged in a laboratory device worked correctly too (which allows accessing the video that illustrated the process of practice) by using a mobile device, confirming the versatility of the cloud supported video platform we used. Among the navigators, the most frequently used was Chrome. The video had an application layer with an interactive quiz, which gives another impression to engage the user more, and provides feedback. In certain PC or Tablet equipments, in google TV, and in cellphones with IOS, the

content of the interactive quiz could not be viewed because of certain aspects such as an old navigator version or the lack of some complements. This can be avoided in future versions by finding other options or second-screen applications.

The idea within the u-learning approach is to use diverse ICT resources and platforms that allow the content/applications to be "everywhere", to enrich the learning process, and to take the experience beyond the classroom, and to provide more flexibility, among others. As Lopez et al. emphasize [47], this u-learning ecosystem is supported by the convergence of technologies, telecommunications, internet connectivity scenarios, and computing systems, in which video content can be adapted to any screen.

When comparing the model and the topic presented in this paper to several mentioned authors (see Table 13), some aspects stand out such as: multiscreen display, more information of the elements of the model, the video as main content, and the use of cutting-edge technology as cloud computing, CDN services, and TV everywhere.

The Table 14 and Fig. 9 illustrate that the model based on TV everywhere or multi-screen video platforms supported in the cloud includes advantages as opposed to traditional TV/video systems like digital terrestrial television (DTT), Digital satellite television (DST), digital cable television (DCT) and IPTV private server, which use only one means or device or specific standard, or requires to have an infrastructure. Table 14 illustrates that the cloud-supported video platform optimizes the deployment to different screens, and supports more operating systems and navigators.

Table 13.
Comparison of the model to other authors

Aspect	Authors	Hijazi	Wagner	Caytiles	Rusu	Inthachot
Detail of the model	Wide	Poor	Average	Average	Average	Low
Display Multiscreen	YES	NO	NO	NO	NO	NO
Use of the main video	YES	NO	NO	NO	NO	NO
Integrate more ICT	YES	Little	Little	Average	YES	Average
Cover	Wide	Campus	Simulated	Campus	Average	It is not clear
with cloud computing	YES	NO	NO	NO	NO	NO
Context awareness	YES	YES	Little	YES	YES	NO
Main infrastructure	Cloud	Client/ server	Agents/ ontologies	Client/ server	It is not clear	It is not clear

Source: The authors

Table 14.
Comparative analysis to traditional TV platforms

Aspect	Cloud TV/video	DTT	DST	DCT	IPTV
Return channel limitation	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Supports different O.S	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Multi-screen optimization	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Source: The authors

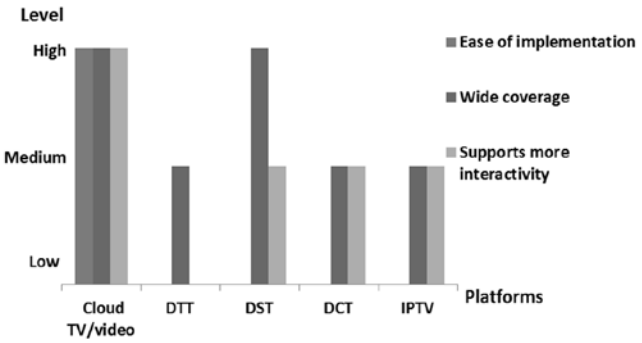


Figure 9. Comparative analysis to traditional TV platforms
Source: The authors

In Fig. 9, it is shown that the solution of cloud supported TV/video is of faster implementation, greater coverage and can support more interactivity than other traditional platforms.

6. Conclusions

The u-learning model based on platforms of multi-screen TV takes into account various elements that, when being considered partially or totally, contribute to the learning everywhere. The video is presented as the main content, which can be applied in different activities or strategies to favor other experiences and have a better impact in the learning. Due to the advance of digital technology and convergence, it is possible for the video to be displayed in different screens. Any user or traditional TV supplier can implement a hybrid or complete solution based on online cloud-supported video platforms. Results demonstrate a satisfactory and optimal deployment of the video in multiple screens, and the model as a good example since technology trends like OTT, CDN, and adaptive bitrate are taken into account as well as the cloud-supported video.

Although the proposed model is based on connectivity scenarios, u-learning also considers to continue learning "off-line" (with analogous elements, books, etc.). At the same time, the infrastructure topic (connectivity to Internet) becomes a challenge for the institutions or companies to provide the users with the benefit of being connected to the network. In u-learning, any device or ICT resource can favor and enrich the teaching and learning process beyond a traditional classroom, showing different application choices. The large use of mobile devices and their advantages of portability and mobility allow to extend the scenarios thanks to second screen applications and the use of sensor technology like QR codes. Cloud computing services favor to extend and implement real scenarios of u-learning in contexts of formal, non-formal and informal education, and in other contexts as well. The role of u-learning as complement, partial or alternative, can be implemented. U-learning favors personal learning environments (PLE) by making possible for the student to choose among different options. As future work, we expect to continue validating and giving feedback on the model, as well as working on the

prototypes and u-learning service implementations that consider more elements from the outlined uLMTV. We will consider standards like LOM (Learning Object Metadata), analytics, articulation with LMS, more interactivity options and context awareness, customization, evaluation. We will also verify the significant learning, among others.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support given by Colciencias (National doctorate scholarship).

References

[1] UNESCO. Las TIC en la educación [online], [reviewed: April 17th, of 2014]. Available at: http://www.unesco.org/new/es/unesco/themes/icts/

[2] The World Bank. Education for all (EFA) [online], [reviewed: April 17th, of 2014]. Available at: http://go.worldbank.org/I41DLBA8C0

[3] Aktaruzzaman, M., Shamim, M., Huq, R. and Clement, C.K., Trends and issues to integrate ICT in teaching learning for the future world of education. Int. J. Eng. Technol. IJET-IJENS. [online]. 11(3), 2011. [reviewed: april 17th, of 2014]. Available at: http://www.ijens.org/

[4] Päivi-Aarreniemi, J., T-learning for model learning via digital TV, Proceedings of 16 th Conference European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEEIE 05), 2005. pp.1-6.

[5] Wang, F. and Zhou, Ch., A theoretical study on development of information and communication technology (ICT)-Supported education systems, Proceedings of 10th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2013. pp. 1080-1084. DOI: 10.1109/FSKD.2013.6816357

[6] Cobo, C. and Moravec, J.W., Aprendizaje invisible: Hacia una nueva ecología de la educación [online], 2011, [reviewed: Sept. 21th of 2016]. Available at: http://conservancy.umn.edu/handle/11299/144375

[7] UNESCO. Global education monitoring report [Online], France, 2016, [reviewed: Sept. 21th of 2016]. Available at: http://es.unesco.org/gem-report/

[8] Infodev/World Bank. ICT and education - Key issues [Online], [reviewed: April 17th, of 2014]. Available from: http://www.worldbank.org/

[9] Diaz, J. and Rusu, C., Ubiquitous computer-supported collaborative learning: A literature review, Proceedings of Information Technology: New Generations (ITNG), 2014 11th International Conference on, 2014, pp. 593-598. DOI: 10.1109/ITNG.2014.48

[10] Weiser, M., The computer for the 21st century. Scientific American, 265(3), pp.94-104, 1991. DOI: 10.1038/scientificamerican0991-94

[11] Aihua, Z., Study of ubiquitous learning environment based on Ubiquitous computing, Proceedings of Ubi-media Computing (U-Media), 2010 3rd IEEE International Conference on. 2010, pp. 136-138. DOI: 10.1109/UMEDIA.2010.5544482

[12] Stefan, L., Gheorghiu, D., Moldoveanu, F. and Moldoveanu, A., Ubiquitous Learning Solutions For Remote Communities - A case study for K-12 classes in a Romanian Village, Proceedings of Control Systems and Computer Science (CSCS), 2013 19th International Conference on, pp. 569-574. DOI: 10.1109/CSCS.2013.22

[13] Zhou, W., Cui, B., Wang, B., Shi, Q. and Yokoi, S., An exploration of ubiquitous learning in computer fundamental learning scenario. Proceedings of The 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2012), Melbourne, Australia, 2012, pp. 1420-1424. DOI: 10.1109/ICCSE.2012.6295330

[14] López, G.A., Jiménez, J.A. and Puche, W.S., Ubiquitous personal learning environment model (uPLEMO), Proceedings of 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), 2016, pp. 1-8. DOI: 10.1109/TAEE.2016.7528383

[15] Chiu, P-S., Kuo, Y-H., Huang, Y-M. and Chen, T-S., A meaningful learning based u-Learning evaluation model, Proceedings of Eighth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, 2008, pp. 77-81. DOI: 10.1109/ICALT.2008.100

[16] Yahya, S., Arniza, A.E. and Abd-Jalil, K., The definition and characteristics of ubiquitous learning: A discussion. International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology (IJEDICT) [online]. 6(1), pp. 117-127, 2010. [reviewed: Oct 15th of 2014]. Available at: http://ijedict.dec.uwi.edu//viewarticle.php?id=785

[17] Restrepo, C.M.Z., Lalinde, J.G., Polido, O.A., Mejía, C.V., Núñez, R.A., Three dimensions as basic references for the construction of ubiquity learning environments in a university context, Proceedings of the 4th International Conference on Computer Supported Education, 2016. pp. 427-431. DOI: 10.5220/0003923904270431

[18] Castro, S.M., Clarenc, C.A., López-de Lenz, C., Moreno, M.E. y Tosco, N.B., Analizamos 19 plataformas de e-learning [online], 2013, 154 P. [reviewed Sept. 26th of 2014]. Available at: www.congresoelearning.org

[19] Aarreniemi-Jokipelto, P., Modelling and content production of distance learning concept for interactive digital television, PhD Dissertation, Department of Computer Science and Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2006.

[20] Caytiles, R.D., Jeon, S-H. and Kim, T., U-Learning Community: An interactive social learning model based on wireless sensor networks, Proceedings of 2011 International Conference on Computational Intelligence and Communication Systems. pp. 745-749. DOI: 10.1109/CICN.2011.165

[21] Sung, J-S., U-learning model design based on ubiquitous environment. International Journal of Advanced Science and Technology. [online]. 13, pp.77-88, 2009. [cited May 18th of 2014]. Available at: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.178.3054&rep=rep1&type=pdf

[22] Hijazi, H.W. and Itmazi, J.A., Crawler Based Context Aware Model for Distributed e-Courses through Ubiquitous Computing at Higher Education Institutes. Proceedings of e-Learning "Best Practices in Management, Design and Development of e-Courses: Standards of Excellence and Creativity", 2013 Fourth International Conference on. pp. 9-14. https://doi.org/10.1109/ECONF.2013.28

[23] Rabello, S., Oliveira, J., Wagner, A., Barbosa, J. and Barbosa, D.. CoolEdu-A collaborative multiagent model for decentralized ubiquitous education environments, IEEE Latin America Transactions, 10(6), pp. 2273-2279, 2012. DOI: 10.1109/TLA.2012.6418132

[24] Wagner, A., Barbosa, J.L.V. and Barbosa, D.N.F., A model for profile management applied to ubiquitous learning environments, Expert Systems with Applications, 41(4), pp. 2023-2034, 2014. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.08.098

[25] Joo, K.H. and Park, N.H., Design and application of the u-SM teaching and learning model for an efficient ubiquitous learning. Proceedings of Computing, Management and Telecommunications (ComManTel), 2013 International Conference on. pp. 264-268. DOI: 10.1109/ComManTel.2013.6482402

[26] Inthachot, M., Sopeerak, S. and Rapai, N., The development of a U-learning instructional model using project based learning approach to enhance students' creating-innovation skills, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 103, pp. 1011-1015, 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.10.426

[27] Noam, E., Cloud TV: Toward the next generation of network policy debates, Telecommunications Policy, 38(8-9), pp. 684-692, 2014. DOI: 10.1016/j.telpol.2013.10.004

[28] Waterman, D., Sherman, R. and Wook-Ji, S., The economics of online television: Industry development, aggregation, and "TV Everywhere.", Telecommunications Policy, 37(9), pp. 725-736, 2013. DOI: 10.1016/j.telpol.2013.07.005

[29] Sanz, E. and Crosbie, T., The meaning of difgital platforms: Open and closed television infrastructure, Poetics, 55, pp. 76-89, 2016. DOI: 10.1016/j.poetic.2015.11.002

[30] Doyle, G., Resistance of channels: Television distribution in the multiplatform era, Telematics and Informatics, 33(2), pp. 693-702, 2016. DOI: 10.1016/j.tele.2015.06.015

[31] ETSI. Hybrid broadcast broadband TV. ETSI TS 102 796 V1.1.1 [online], Technical Specification, France, 2010 [reviewed May 15th

2015]. Available at: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102700_102799/102796/01.01.01_60/ts_102796v010101p.pdf
[32] DATE, Consulting. advanced TV services for all, available now with hybrid broadcast broadband TV solutions, 2013 [reviewed Sept. 19th of 2016]. Available at: http://www.eutelsat.com/files/contributed/news/media_library/brochures/Hybrid-TV-White-Paper-iDate-Eutelsat-Orange.pdf
[33] Lin, T.T.C. and Oranop, C., Responding to media convergence: Regulating multi-screen television services in Thailand, Telematics and Informatics, 33(2), pp. 722-732, 2016. DOI: 10.1016/j.tele.2015.07.005
[34] Cisco. The zettabyte era—trends and analysis [online]. Cisco - White Papers, 2015 [reviewed March 31th of 2016]. Available at: http://www.cisco.com/
[35] Hooper, M., Moyler, A. and Nicoll, R., Over The Top TV (OTT TV) delivery platforms review [online], 2010 [reviewed May 29th of 2014]. Available at: http://www.bci.eu.com/over-the-top-tv/ott-tv-white-paper/
[36] Kim, J., Kim, S. and Nam, C.m Competitive dynamics in the Korean video platform market: Traditional pay TV platforms vs. OTT platforms, Telematics and Informatics, 33(2), pp. 711-721, 2016. DOI: 10.1016/j.tele.2015.06.014
[37] Mell, P. and Grance, T., The NIST definition of cloud computing. recommendations of the National Institute of Standards and Technology [online], 2011 [reviewed Sep 15th of 2016]. Available at: http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf
[38] Singh, S., Jeong, Y-S. and Park, J.H., A survey on cloud computing security: Issues, threats, and solutions, Journal of Network and Computer Applications, 75, pp. 200-222, 2016. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.09.002
[39] Elemental Technologies. CDNs DEMYSTIFIED. A streaming technology primer [Online], 2012 [reviewed Sep 15th of 2016]. Available at: http://www.elemental.com/
[40] Hours, H., Biersack, E., Loiseau, P., Finamore, A. and Mellia, M., A study of the impact of DNS resolvers on CDN performance using a causal approach, Computer Networks, 109(2), pp. 200-210, 2016. DOI: 10.1016/j.comnet.2016.06.023
[41] Tan, T.K., Weerakkody, R., Mrak, M., Ramzan, N., Baroncini, V., Ohm, J-R. et al., Video quality evaluation methodology and verification testing of HEVC Compression Performance, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 26(1), pp. 76-90, 2016. DOI: 10.1109/TCSVT.2015.2477916
[42] Stankowski, J., Grajek, T., Wegner, K. and Domanski, M., Video quality in multiple HEVC encoding-decoding cycles. Proceedings of Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2013 20th International Conference on, 2013. pp. 75-78. DOI: 10.1109/IWSSIP.2013.6623453
[43] De Praeter, J., Van Wallendael, G., Vermeir, T., Slowack, J. and Lambert, P., Spatially misaligned HEVC transcoding with computational-complexity scalability, Journal of Visual Communication and Image Representation, 40(Part A), pp.149-158, 2016. DOI: 10.1016/j.jvcir.2016.06.025
[44] Hwang, K-W., Gopalakrishnan, V., Jana, R., Lee, S., Misra, V., Ramakrishnan, K.K. et al., Joint-family: Adaptive bitrate video-on-demand streaming over peer-to-peer networks with realistic abandonment patterns, Computer Networks, 106, pp. 226-244, 2016. DOI: 10.1016/j.comnet.2016.06.006
[45] Gibelli, T., La investigación basada en diseño para el estudio de una innovación en educación superior que promueve la autorregulación del aprendizaje utilizando TIC, Argentina, [online]. 2014- [reviewed Dec. 12th of 2015]. Available at: www.oei.es/historico/congreso2014/memoriactei/1440.pdf.
[46] Allen Interactions Inc., Agile eLearning development with SAM [online], [reviewed Dec. 13th of 2015]. Available at: http://www.alleninteractions.com/sam-process
[47] Moreno-López, G.A., Builes-Jimenez, J.A. and Bernal-Villamil, S.C., Overview of u-learning. Concepts, characteristics, uses, application scenarios and topics for research, IEEE Latin America Transactions, 14(12), pp. 4792-4798, 2016. DOI: 10.1109/TLA.2016.7817013.

G.A. Moreno-López, is associated professor at Politécnico Jaime Isaza Cadavid. MSc. in Engineering, Sp. degree of telecommunications and BSc. in Electronics Engineer of Universidad Pontificia Bolivariana. Current PhD candidate in Systems Engineering. Areas of research: loT, educational technology, ubiquitous computing, cloud computing, platforms of digital TV, u-learning, TV everywhere.
ORCID: 0000-0002-7269-9020

E.J. Ramírez-Monsalve, ia a full time professor, at the Facultad de Ciencias Humanas y Económicas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. He holds a degreee in Sociology from Universidad Autónoma Latinoamericana and received an MSc. in Socio-Educational Research from Universidad de Antioquia, and a PhD. Education and Society from Universidad de Sevilla, España. His research areas include: e-learning, b-learning and pedagogy.
Orcid: 0000-0002-0648-2341

J.A. Jiménez-Builes, is a full time professor, at the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. He holds a BSc. degreee in Computer Teaching Universidad de Medellin, Colombia and received an MSc. in System Engineering, and a Ph.D. Engineering from Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. His research areas include: artificial intelligence in education, knowledge management, E-learning and T-learning.
ORCID: 0000-0001-7598-7696

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
de Sistemas e Informática

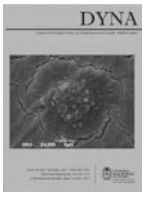
Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas
Especialización en Mercados de Energía
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas
Doctorado en Ingeniería- Sistemas e Informática

Mayor información:

E-mail: acsei_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5365

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Improvement of the adhesion on Hydroxyapatite coatings produced by oxyfuel thermal spray from results of numerical simulation

Hamilton Copete [a], Fabio Vargas [a], Esperanza López [a], Jhonatan Gómez-Pérez[a] & Tatiana Ríos [b]

[a] *Grupo GIPIMME - GIMACYR –Universidad de Antioquia, Medelllín, Colombia, hamiltoncopete@gmail.com, esperanza.lopez@udea.edu.co; fabio.vargas@udea.edu.co*
[2] *Industrias Médicas Sampedro, La Estrella, Colombia. investigación@sampedro.com*

Received: July 21th, de 2016. Received in revised form: September 18th, 2017. Accepted: September 26th, 2017

Abstract
Numerical simulations were carried out by Jets et Poudres software, and the results obtained were used to deposit hydroxyapatite coatings through oxyfuel flame spraying process, in order to improve its adhesion onto Ti6Al4V substrates. The effect of a neutral, an oxidizing and a super-oxidizing flames, as well as the spray distance between the substrate and the torch (7, 9.5 and 12 cm), on dimensionless K-Sommerfeld (K) number was determined. The dimensionless number is highly influenced by the spraying distance, while an effect of the flame type was not evident. The Sommerfeld number in coatings manufactured at 12 cm is between 34 and 37 and the homogeneity in their structure is higher than in those sprayed at 7 and 9.5 cm, in which unmelted particles (K=0) or splashing (K>75) were observed, decreasing the adhesion of coatings.

Keywords: Hydroxyapatite; Flame Spray; Simulation; Sommerfeld; Adhesion.

Mejoramiento de la adherencia en recubrimientos de Hidroxiapatita elaborados mediante proyección térmica oxiacetilénica, a partir de resultados de simulación numérica

Resumen
Los resultados de la simulación numérica realizada con el software Jets et Poudres fueron utilizados para depositar recubrimientos de hidroxiapatita mediante proyección térmica oxiacetilénica, con el fin de aumentar su cohesión y adhesión sobre sustratos de Ti6Al4V. Se determinó el efecto de una llama neutra, una oxidante y una súper-oxidante, así como de la distancia de proyección (7, 9,5 y 12 cm) entre el sustrato y la antorcha, sobre el número adimensional de K-Sommerfeld (K). Dicho número adimensional es influenciado por la distancia de proyección y no por las llamas evaluadas. Para recubrimientos fabricados a una distancia de 12 cm el número de Sommerfeld varía entre 34 y 37, lo que les confiere una estructura más homogénea que la de aquellos depositados a 7 y 9,5 cm en los que existe un alto contenido de partículas parcialmente fundidas (K=0), o con salpicaduras (K>75), que reducen la adhesión de los recubrimientos.

Palabras clave: Hidroxiapatita; Proyección térmica; Simulación; Sommerfeld; Adherencia.

1. Introducción

La Hidroxiapatita (HA) de fórmula $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, es el fosfato de calcio de mayor aplicación en regeneración y sustitución ósea, debido a que su composición es la más cercana a la fase mineral del hueso y representa un 70% de su peso y un 50 % de su volumen. Según la American Society for Testing and Materiales (ASTM-1996), la composición química ideal de este material es determinada por la relación molar Ca/P= 1,67 [1]. La HA es un material cerámico con bajas propiedades mecánicas, por lo tanto, no puede ser utilizada directamente para aplicaciones en las cuales sea necesario soportar altos esfuerzos, como dedos artificiales o huesos y por lo tanto, su uso en recubrimientos se convierte

How to cite: Copete, H., Vargas, F., López, E., Gómez-Pérez, J. and Ríos, T., Mejoramiento de la adherencia en recubrimientos de Hidroxiapatita elaborados mediante proyección térmica oxiacetilénica, a partir de resultados de simulación numérica DYNA, 84(203), pp. 170-176, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

en la aplicación más funcional ya que le confiere a un sustrato metálico (como el Ti6Al4V) encargado de cumplir una función estructural, la biocompatibilidad una vez este sea implantado [2].

La proyección térmica ha sido uno de los métodos más empleados para depositar recubrimientos de Hidroxiapatita sobre prótesis ortopédicas debido a su versatilidad, altas tasas de deposición, fácil reproducibilidad del proceso y alta relación costo/beneficio. En este proceso las partículas utilizadas para elaborar el recubrimiento son calentadas hasta su fusión total o parcial y propulsadas hacia la superficie a recubrir, para que al impactar con ella formen una especie de disco denominado splat, o lamelle (esta última si se observa desde su sección transversal). El apilamiento sucesivo de múltiples splats da origen a la estructura del recubrimiento [3-5] . En la mayoría de los casos se emplea un plasma como fuente de energía para fundir las partículas y proyectarlas sobre el sustrato, sin embargo, la alta temperatura inherente al jet de plasma puede descomponer la hidroxiapatita en fases secundarias como el Fosfato Tricálcico-TCP (α y β), la Oxiapatita y el Fosfato Tetracálcico-TTCP, lo cual tiene efectos adversos para el biomaterial después de la implantación, tales como degradación y delaminación tanto cohesiva (entre capas del recubrimiento), como adhesiva (entre el recubrimiento y el sustrato) [6-9] . Lo anterior ha motivado el uso de la proyección térmica por llama tanto de alta como de baja velocidad, en la cual se aprovecha la energía suministrada por la combustión de una mezcla de oxígeno y acetileno para fundir las partículas de hidroxiapatita. Además, desde el punto de vista económico, la proyección térmica por llama oxiacetilénica resulta una alternativa atractiva ya que el costo de la elaboración de recubrimientos puede ser hasta 10 veces menor que el de los elaborados mediante proyección térmica por plasma [10,11].

La adhesión de los recubrimientos cerámicos depositados mediante proyección térmica se da por anclaje mecánico y por lo tanto, la rugosidad superficial del sustrato, la mojabilidad de las partículas proyectadas sobre él y los esfuerzos térmicos producidos en la interfaz sustrato-recubrimiento son factores fundamentales para controlarla. Por su parte, los esfuerzos térmicos generados en el recubrimiento depositado y la homogeneidad estructural, directamente dependiente del correcto apilamiento de los splats, controlan la resistencia cohesiva entre capas del recubrimiento. La rugosidad necesaria en la superficie del sustrato para la adecuada adhesión de las partículas proyectadas generalmente es producida por procesos mecánicos como el de chorro de partículas abrasivas, mientras que los esfuerzos térmicos generados tanto en la interfaz, como en el recubrimiento durante la proyección, son minimizados a través del precalentamiento del sustrato a una temperatura cercana a un valor conocido como temperatura crítica (T_c) y mediante el control de la velocidad de enfriamiento de la capa depositada [12, 13].

Dado que la mojabilidad insuficiente entre las partículas proyectadas y el sustrato puede facilitar su desprendimiento en el momento del impacto con él y que la generación de salpicaduras pueden ser contraproducentes para el correcto apilamiento de los splats, el número adimensional de Sommerfeld (K) presentado en las ecuaciones 1 y 2, puede ser utilizado para predecir y evitar fallas adhesivas y cohesivas de los recubrimientos depositados mediante proyección térmica [14]. El K-Sommerfeld fue descrito por Kappel y Mundo cuando estudiaban el impacto de gotas de agua y etanol sobre superficies frías, las cuales tenían diámetros entre 60 y 150 µm y en las que se hizo evidente los fenómenos de salpicadura y deposición y se ha utilizado para predecir el comportamiento de una partícula al impactar con una superficie que puede ser el sustrato o una capa de recubrimiento previamente depositada. Mundo et al., definieron que por medio de este número (K) es posible predecir la interacción entre la partícula y el sustrato, ya que si el valor de K es menor a 3, la partícula rebotará al impactar contra el sustrato, mientras que si K se encuentra entre 3 y 57,7, la partícula se adhiere al sustrato formando un splat, y si el valor de K supera el 57,7 la partícula salpicará al impactar con el sustrato y por lo tanto, gran parte del material que la conforma no será depositado [15,16]. El software Jets et Poudres desarrollado por la Universidad de Limoges-Francia, permite calcular el tratamiento termocinético de partículas de diversos materiales proyectados mediante una llama de combustión o por un jet de plasma, así como la evaluación termodinámica de las llamas o jets de plasma, determinando los puntos más calientes, la entalpia y su velocidad, entre otros factores asociados al proceso.

$$K = We^{1/2}Re^{1/4} \quad (1)$$

Siendo We y Re los números adimensionales de Weber y Reynolds, que representan la relación entre la inercia de la partícula fundida respecto a su tensión superficial, así como la relación entre las fuerzas de inercia de cada gota (partículas fundidas) y las asociadas a su viscosidad, respectivamente. Entonces:

$$K = [\rho v d/\mu]^{1/2}[\rho \mu^2 d/\sigma]^{1/4} \quad (2)$$

De donde ρ, ν, d, µ,y σ, son la densidad, la velocidad, el diámetro , la viscosidad y la tensión superficial de la gota (partícula fundida) que impacta la superficie [5].

Los trabajos y reportes científicos realizados para mejorar la adhesión de recubrimientos de hidroxiapatita depositados mediante proyección térmica han estado enfocados al tratamiento superficial del sustrato y a reducir los esfuerzos térmicos generados tanto en la interfaz (sustrato recubrimiento), como en el recubrimiento [17,18]. Por su parte, en este trabajo se utilizó el número adimensional de K-Sommerfeld, como un indicador de la mojabilidad entre las partículas proyectadas y el sustrato y por ende, de la homogeneidad en el apilamiento de los splats, lo cual está directamente ligado con la adhesión y cohesión de los recubrimientos, contribuyendo así al entendimiento y mejoramiento de los mecanismos asociados con la integridad estructural de este tipo de sistemas utilizados como biomaterial en implantes quirúrgicos.

2. Materiales y Métodos

Se realizó la simulación de diferentes condiciones de proyección térmica oxiacetilénica con el software Jets et Poudres con el fin de establecer los parámetros en los cuales las partículas se depositan sobre el sustrato, sin que reboten o

Tabla 1.
Diseño de experimentos utilizados para la simulación numérica.

Niveles	Relación C_2H_2:O_2	Distancia de Proyección (cm)
1	1:1,7	7-9,5-12
2	1:2,5	7-9,5-12
3	1:3,2	7-9,5-12

Fuente: Los autores

formen salpicaduras, buscando con ello obtener capas de hidroxiapatita con buena mojabilidad con la superficie de una aleación de Ti6Al4V y a su vez una estructura lo menos irregular posible, aumentando así la resistencia adhesiva y cohesiva de la capa. Las simulaciones fueron realizadas para una partícula de hidroxiapatita de 11 µm correspondiente al d10 del polvo que se utilizará para la validación experimental de los resultados, siendo este tamaño, uno de los más críticos para el tratamiento termocinético en la llama dada la baja densidad del material. Las propiedades físico-químicas y térmicas del material de partida, requeridas para la simulación numérica fueron las correspondientes a la hidroxiapatita porosa, contenidas en la base de datos del software Jets et Poudres.

De acuerdo con lo anterior, se evaluó el efecto sobre el número adimensional de Somerfeld de tres tipos de llama (una neutra, una oxidante y una súper oxidante obtenidas a partir de diferentes relaciones volumétricas (Partes de acetileno: Partes de Oxigeno) las cuales definen la eficiencia de la combustión y la longitud de cada una de las zonas de la llama[19], así como de la distancia de proyección entre el sustrato y la antorcha partiendo de estudios previos realziados por el grupo [20].

En la Tabla 1 se presenta el diseño de experimentos 3^2 empleado en las simulaciones, en el cual las variables de respuesta permiten determinar el tratamiento termocinético que experimentan las partículas en vuelo y de esta forma establecer cuál combinación entre los factores del diseño es la más adecuada para elaborar los recubrimientos. Como variable respuesta de mayor significancia se tiene el número Sommerfeld y como variables de respuesta auxiliares se determinaron la temperatura de la partícula y el porcentaje de fusión. Por lo tanto, mediante un análisis de varianza (ANOVA) se estableció que tan significantes son cada uno de los factores evaluados y la interacción entre ellos; y de acuerdo al valor P (P-value) se comprobó la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95% (α=0,05). El modelo estadístico para el diseño 3^2 se describe mediante la ecuación 3, donde Y es la variable respuesta, µ es la media poblacional, γ_i y δ_j son los efectos de cada factor en su respectivo nivel, $(\gamma\delta)_{ij}$ es el efecto de la interacción de los factores (i=1,2,3, j=1,2,3, k=1,..,n) y los residuales son la diferencia entre el modelo teórico y el encontrado experimentalmente.

$$Y_{ijk} = \mu + \gamma_i + \delta_j + (\gamma\delta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

La validación experimental de los resultados de la simulación se llevó a cabo mediante proyección térmica por combustión oxiacetilénica en la cámara ARESTE 1, la cual incorpora una antorcha Eutectic Castolin Terodyn 2000 modificada y posee dispositivos electromecánicos para controlar el movimiento relativo entre la antorcha y el sustrato, el flujo de los gases de trabajo y la temperatura de precalentamiento del sustrato entre otros. Las variables fijas de operación que se tuvieron en cuenta para la elaboración de los recubrimientos fueron: Flujo de material de 12 g/min controlado por un sistema de distribución de polvos TUMAC. Previo a la deposición de las partículas, los sustratos de Ti6Al4V de 12,5 mm de diámetro y 6 mm de espesor fueron preparados superficialmente con chorro abrasivo de partículas de corindón y posteriormente limpiados en un baño ultrasónico de alcohol, obteniendo una rugosidad media (Ra) entre 10 y 11 µm. Posteriormente, estos fueron precalentados con la llama oxiacetilénica hasta 250 °C, con el fin de minimizar el choque térmico de las partículas al impactar con el sustrato. Los recubrimientos fueron elaborados a partir de dos pases de proyección, para lo cual la antorcha fue desplazada verticalmente a una velocidad de 0,6 cm/s frente a los sustratos ubicados en un porta-muestras cilíndrico de 70 mm de diámetro y que rota a 115 rpm. Con el fin de minimizar los esfuerzos residuales producidos durante el enfriamiento de los recubrimientos se utilizó un sistema de enfriamiento frontal con aire a temperatura ambiente, que incide sobre las muestras a 180 grados respecto al punto en que la antorcha deposita las partículas de hidroxiapatita.

La materia prima para la elaboración de los recubrimientos fue Hidroxiapatita comercial de alta pureza (Captal 30, Plasma-Biotal Limited, Tideswell, North Derbyshire, UK), su composición química se determinó mediante Fluorescencia de Rayos X por Longitud de Onda Dispersiva (FRX-WD), usando en espectrómetro Thermo Scientific ARL OPTIM'X. Por su parte, la morfología de la materia prima, así como de la superficie de los recubrimientos se analizó por medio de un microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL JSM 6490 LV, que posee una sonda de análisis químico por Barrido de Energía Dispersiva. Este mismo microscopio fue utilizado para analizar la sección transversal de los recubrimientos sobre la cual se midió su espesor. Las fases cristalinas de la materia prima fueron determinadas por medio de difracción de rayos X (DRX), con un equipo Panalytical de referencia Empyream con fuente de radiación de cobre (Cukα, λ=1,5406 Å), y potencia de 1,8 kW. Los picos de difracción fueron detectados con una velocidad de barrido de 0,02° por paso en el rango 2θ entre 5° y 60°.

La resistencia adhesiva y cohesiva se determinó bajo el procedimiento descrito por la norma ASTM F1147-05 [21] para recubrimientos de fosfatos de calcio con una velocidad de carga de 2,5 cm/min hasta fallar la unión entre el sustrato recubierto y un contra-cuerpo unidos entre sí mediante un adhesivo epóxico. Los esfuerzos residuales que se pueden generar durante el proceso de proyección térmica se determinaron por el método de curvatura, estableciendo el tipo de esfuerzo generado y la magnitud del mismo, para lo cual se usaron probetas Almen N-1S.

3. Resultados obtenidos

3.1. Caracterización de la materia prima

De acuerdo con el análisis químico realizado al material de partida, se pudo establecer que su relación molar calcio/fósforo

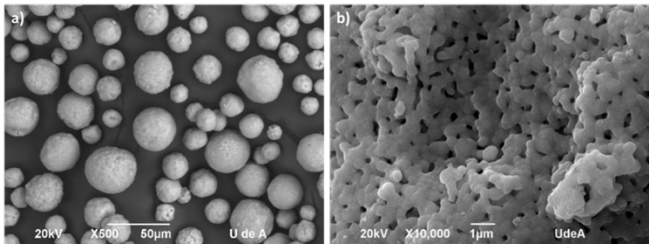


Figura 1. Morfología de los polvos de hidroxiapatita. (a) Descripción general de la forma y el tamaño. (b) Detalle de la superficie de una partícula, en la que se evidencia la aglomeración y sinterización de las múltiples partículas que la constituyen.
Fuente: Los autores

(Ca/P) es de 1,79. Por su parte, el análisis de su morfología (Fig. 1) indica que las partículas tienen una forma esférica y que cada una de ellas está constituida por múltiples partículas aglomeradas que forman una estructura porosa y en cuyas uniones se aprecian los cuellos característicos de los procesos de sinterización. De acuerdo a la Fig. 1a se pudo establecer que las partículas más pequeñas tienen un tamaño aproximado de 11 µm, por lo que este tamaño y las características de la Hidroxiapatita porosa contenidas en el software Jets et Poudres fueron empleados para realizar las simulaciones.

El análisis de fases realizado a partir del espectro de difracción de rayos X se muestra en la Fig. 2, el cual fue llevado a cabo utilizando el software High Score Plus y usando el patrón de difracción PDF 9-432, que presenta el principal plano de cristalización (211) en un ángulo 2θ cercano a 31,78°, además no se detecta la presencia de otras fases debido a que la totalidad de los picos corresponden a la fase Hidroxiapatita.

3.2. Simulación de parámetros de proyección

Los resultados de la simulación llevada a cabo mediante el software Jets et Poudres para cada una de las condiciones del diseño de experimentos se muestran en la Tabla 2. Como puede observarse, para los tres tipos de llama evaluadas y a una distancia de 12 cm se obtuvieron valores de Sommerfeld que se encuentran en el rango entre 3 – 57,7 (condición en la que la partícula se deposita sin rebotar, ni formar salpicaduras) [5].

Para las demás distancias de proyección dichos valores fueron iguales a cero o superiores a 70. Como es evidente en esta misma tabla, el K-Sommerfeld equivale a cero cuando la partícula aún no ha alcanzado su temperatura de fusión (1570 °C), lo que podría hacer que rebotase al impactar con otra superficie también sólida. Esta condición se obtendría para partículas proyectadas a 7 cm del sustrato y con llamas tanto neutras como super-oxidantes. Por su parte, en las condiciones a las cuales el valor de Sommerfeld fue superior a 57,7 la salpicadura de las partículas será el comportamiento predominante una vez impacte con el sustrato.

Es importante tener en cuenta que en una llama neutra o estequiométrica obtenida a partir de una relación de oxígeno y acetileno (C_2H_2:O_2) equivalente a aproximadamente 1:1,7 en volumen, se alcanza una temperatura máxima de 3113ºC a 1 atm de presión [5]. Por su parte, la adición de una exceso de oxígeno reduce la temperatura de la llama pero a su vez se obtiene una zona de reacción primaria (cono de la llama, que

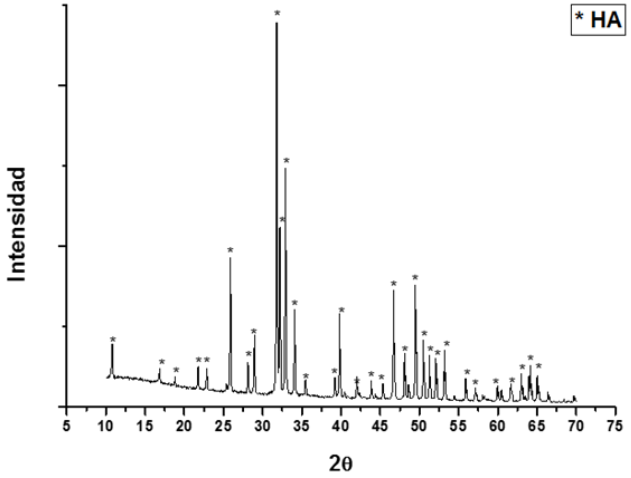


Figura 2. Espectro de DRX de los polvos utilizados para elaborar los recubrimientos.
Fuente: Los autores

es la zona más caliente de ella) mucho más larga que en una llama estequiométrica, por lo que las partículas tienen un mayor tiempo de residencia en la zona más caliente de la llama y por lo tanto, pueden lograr un mejor calentamiento. Una cantidad muy alta del exceso de comburente (como en el caso de la llama super-oxidante), puede reducir demasiado la temperatura máxima de la llama y por lo tanto, el calor que se le puede aportar a las partículas puede ser insuficiente para completar su fusión [22]. Lo anterior permite entender por qué la máxima temperatura de la partícula se alcanza cuando es calentada en una llama oxidante con una relación en volumen de C_2H_2:O_2 equivalente a 1:2,5. En lo que respecta al efecto de la distancia de proyección, también es evidente que para cada tipo de llama, a medida que aumenta dicha distancia, incrementa la temperatura de la partícula.

En el diseño de experimentos, el valor P permite probar la hipótesis nula, en la cual se supone que la influencia de la relación volumétrica de gases y de la distancia de proyección, en el parámetro Sommerfeld es cero y por lo tanto, si este valor P es menor que el nivel de significancia establecido (α), la hipótesis nula se rechaza y el factor tiene influencia en la variable respuesta. En la Tabla 3 se presenta el ANOVA del diseño factorial, en ella puede observarse que la distancia de proyección tiene una mayor influencia en el tratamiento termocinético de una partícula de HA con un diámetro de 11 µm, ya que el valor P es menor al nivel de significancia α=0,05, mientras que la relación de gases y la interacción entre estos dos factores no son significativos a la hora de evaluar el Sommerfeld. Comparando los tres tipos de llama no existen diferencias en el número Sommerfeld para una partícula de HA con un tamaño de 11 µm, pero si se analiza la temperatura que alcanza el material sometido a una llama con una relación de gases intermedia 1-2,5, ésta presenta una temperatura cerca de 200 °C por encima de las otras relaciones de gases, lo cual es importante a la hora de realizar una validación experimental, debido a que para elaborar los recubrimientos se emplean materias primas con una distribución de tamaño de partícula y al contar con partículas de mayor tamaño, esta mayor temperatura facilitarásu fusión.

Tabla 2.
Resultado del diseño factorial empleado para las simulaciones

N° Experimento	Relación C_2H_2:O_2	Distancia (cm)	Sommerfeld	Temperatura(°C)	% de Fusión
HA-1	1:1,7	7	0	1347	0
HA-2	1:2,5	7	111	1652	100
HA-3	1:3,2	7	0	1520	0
HA-4	1:1,7	9.5	78	1774	100
HA-5	1:2,5	9.5	79	2199	100
HA-6	1:3,2	9.5	75	2005	100
HA-7	1:1,7	12	34	2228	100
HA-8	1:2,5	12	37	2465	100
HA-9	1:3,2	12	36	2303	100

Fuente: Los autores

Tabla 3.
Anova para el K-Sommerfeld

Factor	DF	SS	MS	F	P-Value
Relación	1	0	0	0	0,10
Distancia	1	15913,5	15915,5	304,95	$1,13 \times 10^{-5}$
Relación: Distancia	1	1,1	1,1	0,02	0,90
Residuales	5	260,9	52,2		

DF: Grados de libertad, SS: Suma de cuadrados, MS: Cuadrados medios, P-Value: Valor P
Fuente: Los autores

Debido a esto se procedió a realizar la validación experimental con las tres relaciones acetileno:oxígeno a una distancia de 12 cm, para las cuales el K–Sommerfeld se encuentra entre el rango de 3-57,7 (experimento HA-7, HA-8 y HA-9) y por lo tanto, predice la adhesión de las partículas proyectadas y por ende un buen empaquetamiento de los splats con una fusión total de las partículas. Así mismo, se depositaron dos recubrimientos adicionales a una distancia de 7,0 cm y con relaciones volumétricas de C_2H_2:O_2 de 1:1,7 y 1:2,5 para los cuales el K-Sommerfeld es mínimo (equivale a cero) y máximo (equivale a 111) respectivamente (Experimentos HA-1 y HA-2 de la Tabla 2).

El modelo que describe el comportamiento del número adimensional de Sommerfeld para una partícula de Hidroxiapatita de 11 µm se presenta en la ecuación 4. El coeficiente de determinación para el modelo presentado fue R^2=0,9839 con lo cual el modelo explica la variabilidad del Sommerfeld en un 98%.

$$Y = 286{,}109 - 2{,}688(x) - 21{,}301(y) + 0{,}284(z) + 7{,}224 \qquad (4)$$

De donde:
x, es la relación volumétrica de gases (1,7, 2,5 o 3,2),
y es la distancia de proyección [cm]
z, es el efecto combinado de las dos variables anteriores

3.3. Validación experimental

En la Fig. 3 se observan las imágenes SEM de la superficie de los recubrimientos, donde se evidencia la influencia del parámetro Sommerfeld en el comportamiento de las particulas una vez se depositan sobre el sustrato. El recubrimiento HA-1 (Fig. 3a) presenta principalmente en su superficie particulas sin fundir, lo cual concuerda con los datos obtenidos en las simulaciones que predicen que la temperatura que alcanzaría una partícula de 11 µm es insufisiente para su fusión y que su número Sommerfeld equivale a 0. Por su parte, el recubrimiento HA-2 (Fig. 3b) cuyo K-Sommerfeld fue superior a 100 tiene en su estructura una combinación de splats bien fundidos y salficaduras producto de la energia termocinetica excesiva con la que las partículas impactan el sustrato. Finalmente, la morfología de los recubrimientos HA-7, 8 y 9 (Fig. 3c) muestra la estructura deseada para un recubrimiento elaborado por proyección térmica con splat completamente fundidos y bien acoplados entre sí, además de la presencia de algunas grietas que son características del proceso de elaboración de los recubrimientos y que son producto de la contracción de los splats durante el enfriamiento. Dichas grietas no representan inconvenientes para el desempeño mecánico del recubrimiento.

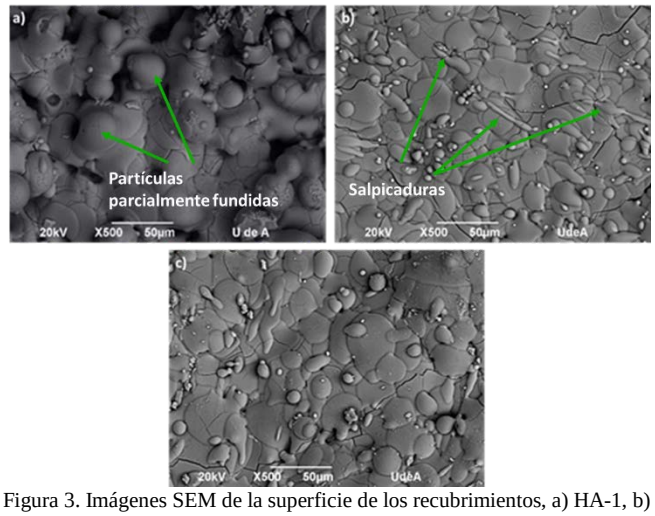


Figura 3. Imágenes SEM de la superficie de los recubrimientos, a) HA-1, b) HA-2 y c) Imagen representativa de las muestras HA-7, 8 y 9.
Fuente: Los autores

La resistencia mecánica de los recubrimientos se evaluó para las tres muestras que presentaron un valor de K-Sommerfeld entre 34 y 37 (HA-7, 8 y 9) y para aquella elaborada a partir de un tratamiento térmo-cinético de las partículas deficiente (HA-1, cuyo K=0). Es importante resaltar que este ensayo permite medir la resistencia adhesiva entre el sustrato y el recubrimiento o la resistencia cohesiva entre capas del mismo recubrimiento. Sin embargo, en todas las muestras evaluadas la falla fue adhesiva. En la Tabla 4, se presenta la resistencia adhesiva de los recubrimientos evaluados, donde puede observarse que la muestra HA-1

Tabla 4.
Propiedades mecánicas de los recubrimientos

Recubrimiento	Adherencia (MPa)	Espesor (µm)	Esfuerzo Residual (MPa)
HA-1	2,68 ± 0,69	104,35±31,08	---
HA-7	6,74 ± 2,01	61,29±11,09	7,58 ± 5,20
HA-8	6,82 ± 2,13	114,35±41,04	64,84 ± 26,68
HA-9	9,01 ± 1,20	80,50±23,30	108,24 ± 14,64

Fuente: Los autores

correspondiente a un valor de K-Sommerfeld igual a cero, presenta una resistencia adhesiva muy baja en comparación con aquellas cuyo K-Sommerfeld se encuentra entre 34 y 37 (HA 7, 8 7 y 9). La mayor resistencia adhesiva para estos últimos recubrimientos se logra gracias a la buena mojabilidad que tienen las partículas al impactar con el sustrato cuando el K-Sommerfeld se encuentra en un rango entre 3 y 57,7.

Por otro lado, al comparar los resultados de los recubrimientos depositados a partir de un tratamiento termo-cinético adecuado de las partículas (HA-7, HA-8 y HA-9), la condición HA-9 correspondiente a un tipo de llama superoxidante presenta una resistencia a la adhesión más alta. Este comportamiento se debe al esfuerzo de solidificación (quenching stress) propuesto por Brenner – Senderoff [5], el cual genera un contra esfuerzo compresivo en la interfaz sustrato-recubrimiento, el cual promueve la adhesión capa-sustrato [23].

Estos esfuerzos residuales en los recubrimientos elaborados mediante proyección térmica pueden generarse principalmente por tres razones: 1) diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica del sustrato y del recubrimiento, 2) cambios de volumen por transformaciones de fase y 3) la combinación entre el enfriamiento rápido de los splat al entrar en contacto con el sustrato a menor temperatura (generando un esfuerzo tensil) y la compresión generada por las diferentes capas de material que se van depositando. Esta última combinación es denominada "quenching stress" y es la fuente que más aporta a los esfuerzos residuales de los recubrimientos elaborados por esta técnica [17,24].

El analisis de la sección transversal de los recubrimientos depositados permitió determinar que los espesores para los recubrimientos depositados varian entre 60-120 µm (Tabla 4), lo que los hace apropirados para ser utilizados en implantes biomédicos según la norma ISO 13779 [25].

En el caso de los recubrimientos de hidroxiapatita elaborados, los esfuerzos de tracción medidos son potencializados por el sistema de enfriamiento con aire a temperatura ambiente que se utilizó para la elaboración de las muestras, el cual incrementa la magnitud del esfuerzo de tensión producido y contrarresta los esfuerzos de compresión generados por el impacto de partículas sobre aquellas que ya se encuentran depositadas.

4. Conclusiones

El uso del software Jets et Poudres permite predecir mediante el parámetro K-Sommerfeld el comportamiento termocinético de una partícula de Hidroxiapatita al ingresar a una llama oxi-acetilénica, además determina la influencia de diferentes parámetros de proyección en las propiedades finales del recubrimiento como porcentaje de fusión, temperatura de deposición y el comportamiento de la partícula al impactar con el sustrato, convirtiéndose en una herramienta útil para los procesos de proyección térmica, minimizando así, los ensayos preliminares en búsqueda de parámetros de proceso adecuados que le confieran a los recubrimientos homogeneidad estructural y buen desempeño mecánico.

La validación experimental de los parámetros de proyección demostró la relación que existe entre el parámetro Sommerfeld y la adherencia de los recubrimientos de hidroxiapatita, estableciendo que la adhesión se ve potenciada cuando este parámetro se encuentra en un rango entre 34 y 37, el cual es adecuado para recubrimientos elaborados mediante proyección térmica. Por otro lado, fue necesario emplear el análisis de esfuerzos residuales con el fin de entender la diferencia en la resistencia adhesiva de los recubrimientos cuyo tratamiento termo-cinético de las partículas utilizadas como materia prima era similar, encontrando que en todos los casos un esfuerzo de tracción promueve la unión en la interfaz sustrato-recubrimiento y su magnitud influye proporcionalmente en la adhesión de los recubrimientos de Hidroxiapatita, de tal forma que el tipo de llama supeoxidante (1:3,2) permitió obtener la resistencia mecánica más elevada al producir un esfuerzo residual de tensión más alto en la capa de Hidroxiapatita depositada .

Agradecimientos

A los grupos de Investigación GIPIMME y GIMACYR, a la estratégia de sostenibilidad 2014-2015 aprobada al grupo GIPIMME, al proyecto CODI PRG-986 de la Universidad de Antioquia y a la empresa Industrias Médicas Sampedro.

Bibliografía

[1] Heimann. R.B., Structure, properties, and biomedical performance of osteoconductive bioceramic coatings. Surf Coatings Technol (233), pp. 27-38, 2013. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.11.013.

[2] Arcos, D., Calcium phosphate bioceramics. In: Vallet-Regi M, editor. Bioceram. with Clin. Appl., JohnWiley & Sons; 2014.

[3] ASM International. Handbook of thermal spray technology. ASM International; 2004.

[4] Pawlowski, L., The science and engineering of thermal spray coatings. Second Ed. 2008.

[5] Fauchais, P.L, Heberlein, J.V.R. and Boulos, M.I., Thermal spray fundamentals. New York: Springer; 2014. DOI: 10.1007/978-0-387-68991-3.

[6] Demnati, I., Grossin, D., Combes, C. and Rey, C., Plasma-Sprayed apatite coatings: Review of physical-chemical characteristics and their biological consequences. J Med Biol Eng., 34, pp. 1-7, 2014. DOI: 10.5405/jmbe.1459.

[7] Levingstone, T.J., Ardhaoui, M., Benyounis, K., Looney, L. and Stokes, J.T., Plasma sprayed hydroxyapatite coatings: Understanding process relationships using design of experiment analysis. Surf Coatings Technol 283, pp. 29-36, 2015. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.10.044.

[8] Heimann, R.B., Tracking the thermal decomposition of plasma-sprayed hydroxylapatite. Am Mineral, 100, pp. 2419-2425, 2015. DOI: 10.2138/am-2015-5413.

[9] Ben-Nissan, B., Advances in Calcium Phosphate Biomaterials. Vol. 2., Springer Heidelberg; 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-53980-0.

[10] Dorozhkin, S.V., Calcium orthophosphate coatings, films and layers. Prog Biomater. [online]. 1, 2012. DOI: 10.1186/2194-0517-1-1.

[11] Pawłowski, L., The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Firts Edit. 1995.
[12] Mohseni, E., Zalnezhad, E. and Bushroa, A.R., Comparative Investigation on the Adhesion of Hydroxyapatite coating on Ti-6Al-4V Implant: A Review Paper. Int J Adhes Adhes. 48, pp. 238-257, 2013. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2013.09.030.
[13] Jiang, Y., Liu, M., Wang, H.Y. and Mu, X.J., Recent development of experimental and numerical analysis of adhesion strength of thermal spray coatings. Mater Res Innov. 19, pp. S5-168-S5-172, 2015. DOI: 10.1179/1432891715Z.0000000001356.
[14] Berndt, C.C. and Lugscheider, E.F., Thermal Spray 2001, New Surfaces for a New Millennium. Int. Therm. Spray Conf., Singapore: 2001.
[15] Yang, K., Liu, M., Zhou, K. and Deng, C., Recent developments in the research of splat formation process in thermal spraying. J. Mater., 2013, pp. 1-14, 2013. DOI: 10.1155/2013/260758.
[16] Escure, C., Vardelle, M., Fauchais, P., Experimental and theoretical study of the impact of alumina droplets on cold and hot substrates. Plasma Chem Plasma Process, 23, pp. 185-221, 2003. DOI: 10.1023/A:1022976914185.
[17] Yang, Y.C., Influence of residual stress on bonding strength of the plasma-sprayed hydroxyapatite coating after the vacuum heat treatment. Surf Coatings Technol. 201, pp. 7187-7193, 2007. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.01.027.
[18] Mohammadi, Z., Ziaei-moayyed, A.A. and Mesgar, A.S., Grit blasting of Ti – 6Al – 4V alloy : Optimization and its effect on adhesion strength of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings. J. Mater Process Technol., 194, pp. 15-23 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.119.
[19] Flame solutions. BOC. 2010, pp. 1-13.
[20] Copete, H., López, M.E., Vargas, F., Echavarria, A. and Rios, T., In vitro evaluation of oxy-fuel thermal sprayed hydroxyapatite coatings onto Ti6Al4V substrates. DYNA, 80(177), pp. 101-107, 2013.
[21] ASTM F1147. Standard Test Method for Tension Testing of Calcium Phosphate and Metallic Coatings. ASTM, [online]. 5 (2011), 2011. DOI:10.1520/F1147-05R11.2.
[22] Soto-Martínez, D., Parra-Velásquez, C., López-Gómez, M.E., Vásquez-Jiménez, C.F. y Vargas-Galvis, F., Elaboración de recubrimientos base cobre sobre un sustrato de porcelana mediante proyección térmica con llama oxiacetilénica. Tecno Lógicas, 18, pp. 83-91, 2015.
[23] Sampath, S., Jiang, X.Y., Matejicek, J., Prchlik, L., Kulkarni, A. and Vaidya, A., Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings: An integrated study of Ni-5 wt. % Al bond coats. Mater Sci Eng A., 364, pp. 216-231, 2004. DOI: 10.1016/j.msea.2003.08.023.
[24] Kuroda, S. and Clyne, T.W., The quenching stress in thermally sprayed coatings. Thin Solid Films. 200, pp. 49-66, 1991. DOI: 10.1016/0040-6090(91)90029-W.
[25] ISO. ISO 13779-2. Implants for surgery — Hydroxyapatite. Switzerland, 2008.

H. Copete-López, recibió el título de Ing. de Materiales en 2011 y MSc. en Ingeniería de Materiales 2017, se desempeñó como Ingeniero de Proyectos en una empresa contratista de la industria cerámica. Joven Investigador Colciencias en los periodos 2013 y 2015, además de participación en proyectos de investigación en la Universidad de Antioquia, Colombia. Actualmente estudia Doctorado en Ingeniería de Materiales en la misma universidad.
ORCID: 0000-0002-5246-4136

F. Vargas-Galvis, durante sus primeros cinco años de ejercicio profesional se desempeñó como ingeniero en misión en el Instituto Colombiano del Petróleo de Ecopetrol, realizando proyectos de investigación y desarrollo de nuevos materiales, actividad que combinó con sus estudios de MSc. en Ingeniería Metalúrgica y como profesor catedrático adscrito a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Desde el 2013 y hasta la fecha se ha desempeñado como profesor de planta del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad de Antioquia, Colombia. Además es coautor de 2 secretos industriales y ha recibido reconocimientos profesionales como: primer puesto en las II Jornadas de Innovación Tecnológica en Ecopetrol, Maestro de Ingenieros, Universidad de Antioquia y Thèse Très Honorable de la Universidad de Limoges. En la actualidad se encuentra clasificado por Colciencias como Investigador Senior.
ORCID: 0000-0003-4484-3950.

M.E. López-Gómez, es Ing. de Minas y Metalurgia en 1991, MSc. en Ingeniería Metalúrgica en 1999 y Dra. en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad de Oviedo, Oviedo, España, en 2006. Es profesora titular de la Universidad de Antioquia, Colombia, vinculada desde el año 2001 al Departamento de Ingeniería de Materiales. Las áreas de interés son los materiales y recubrimientos cerámicos, los biomateriales, nanomateriales, metalurgia extractiva.
ORCID: 0000-0002-1038-6504

J. Gómez-Pérez, recibió el título de pregrado en Ing. de Materiales en 2017, en la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. De 2014 a 2017 trabajó como auxiliar de investigación en proyectos institucionales para la Universidad de Antioquia. Actualmente se desempeña como auxiliar de materias primas y pigmentos en la empresa Simex S.A.S de Envigado Antioquia. Su línea de trabajo investigativo se ha basado en el estudio de recubrimientos de hidroxiapatita, que incluyen: mejoramiento de la adherencia en recubrimientos de hidroxiapatita realizados mediante proyección térmica por llama oxiacetilénica a partir de resultados de simulación numérica y mediante el desarrollo tratamientos térmicos.
ORCID: 0000-0001-6246-3930

T. Ríos-Meneces, recibió el título de Bioingeniería en 2009 y de MSc en Ingeniería de Materiales en 2016, todas ellas de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. De 2008 a 2015, trabajó como coordinadora de investigación para una compañía de dispositivos médicos, actualmente es gerente de una empresa de consultoría dentro del sector de dispositivos médicos. Su interés en la investigación incluye: ajuste anatómico para dispositivos médicos implantables, diseño y desarrollo del sistema protésico para reemplazo articular, fabricación de material compuesto de PLA e hidroxiapatita para su uso en la fabricación de implantes óseos.
ORCID: 0000-0002-6545-8253



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales

Mayor información:
E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Model the green procurement based coloured Petri nets

Luz Maribel Guevara-Ortega [a] & Leonardo Rodríguez-Urrego [b]

[a] *Facultad de Estudios en Ambientes Virtuales, Universidad EAN, Bogotá, Colombia. lmguevara@universidadean.edu.co*
[b] *Facultad de Ingeniería, Universidad EAN, Bogotá, Colombia. lrodriguezu@universidadean.edu.co*

Received: June 5th, de 2017. Received in revised form: September 21th, 2017. Accepted: October 10th, 2017

Abstract
Developed countries have implemented sustainable development policies specifically in Sustainable Consumption and Production. The green procurement process is often considered critical for the adequate performance of the supply chain because it manages and guarantees the acquisition of the products / services so that the company fulfills its missionary activities, generating economic benefits, mitigating the effects of its activities in the environment and society. This article, presents a model for the green procurement process, based on a tool for the modeling of complex discrete event systems called Coloured Petri Nets (CPN).

Keywords: Green procurement, coloured Petri nets, sustainability supply chain.

Modelado de compras verdes mediante redes de Petri coloreadas

Resumen
Los países desarrollados han implementado políticas de desarrollo sostenible específicamente en Consumo y Producción Sustentable. El proceso de compras verdes suele ser considerado crítico para el adecuado rendimiento de la cadena de suministro porque gestiona y garantiza la adquisición de los productos/servicios para que la empresa cumpla con sus actividades misionales, generando beneficios económicos, mitigando los efectos de sus actividades en el medio ambiente y en la sociedad. Este artículo presenta un modelo para el proceso de compras verdes, basada en una herramienta para la modelación de sistemas de eventos discretos complejos llamada Redes de Petri Coloreadas (RdPC).

Palabras clave: compras verdes; cadena de suministro sostenible; redes de Petri coloreadas.

1. Introducción

Existen numerosos antecedentes de enfoques formales en cadenas de suministro sostenibles [1-3], donde se han realizado diversas investigaciones a través de herramientas cuantitativas con métodos analíticos, heurísticos y metaheurísticos y entre ellas se encuentran las Redes de Petri (RdP). El método de anidamiento de compras verdes [4,5], es una herramienta que permite mejorar la capacidad de las organizaciones y el proceso de compras a través de su elección de bienes y servicios en tres aspectos. El primero hace referencia a los aspectos económicos buscando una mejor relación calidad-precio, disponibilidad, rentabilidad, entre otros. En segundo lugar, los aspectos ambientales para mejorar los indicadores sobre el impacto al medio ambiente del producto o servicio en el ciclo de vida. El tercer aspecto social relacionado con los efectos de las decisiones de compra brindando condiciones de trabajo, equidad y dando cumplimiento a los derechos humanos, entre otros.

Para lograr una mayor sostenibilidad las empresas necesitan trabajar con proveedores sostenibles y establecer relaciones a largo plazo con ellos [6].

Las redes de Petri se han utilizado en diferentes campos de aplicación e integrado con herramientas tecnológicas como en la construcción aplicando sistemas automáticos de ayuda, CAD [7], en técnicas de automatización avanzadas en procesos industriales con SAP, modelado dinámico del proceso de trazabilidad de producto con redes de Petri para WorkFlow [8].

Existen múltiples técnicas de modelización de procesos de negocio como son: (diagramas de flujo, diagrama entidad-relación –IDEF- (por sus siglas en inglés “Integrated definition for function modelling”), diagrama de interacción de roles, técnicas orientada a objetos, Redes de Petri, entre

How to cite: Guevara-Ortega, L.M. and Rodríguez-Urrego, L., Modelado de compras verdes mediante redes de Petri coloreadas DYNA, 84(203), pp. 177-183, December, 2017.
© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

otras. Se ha seleccionado la técnica de Redes de Petri para el estudio y modelización del proceso compras verdes, por sus características de robustez y flexibilidad (semántica, representaciones gráficas) [9].

La idea principal de la metodología es el hecho de fusionar subsistemas concurrentes en una sola estructura gráfica y anidar todos los criterios a tener en cuenta en el proceso de compras verdes utilizando el poder de anidamiento o coloreadas de las RdPC.

Antes de explicar la formulación del método es importante resaltar las principales ventajas de las RdPC utilizadas en diferentes estudios de carácter académico.

Las RdPC, permiten anidar marcas que representan la operación normal de un sistema único (una marca) o un proceso con varios subprocesos (varias marcas). Esta capacidad es útil cuando se implementan sistemas complejos.

Otras ventajas de las RdPC brindan una mejor eficiencia del modelado de RdP ya que proporcionan sincronismo, concurrencia, exclusión mutua y compartición de recursos, características que han aportado una mayor capacidad y potencia de representación en los modelos resultantes. También tienen la capacidad de aplicar técnicas de fusionado de lugares, permitiendo así reducir el tamaño de los modelos. Esta capacidad se acentúa más con las denominadas Redes de Petri Coloreadas (RdPC) [10,11].

2. Criterios de selección de proveedores sostenibles

La selección de proveedores en la gestión de la cadena de suministro sostenible se considera crucial en las decisiones de compra [12,13], mejorando los beneficios para la organización como son: reducción de los costos, mitigar el riesgo, generación de nuevas fuentes de ingresos e incrementar el valor de la marca, entre otras [14].

Existen diferentes estudios que han abordado la selección de proveedores los cuales han permitido determinar una variedad de criterios. Los criterios económicos hacen referencia a un adecuado manejo de los recursos financieros y su contribución para lograr la satisfacción de los accionistas, clientes, empleados y de la propia empresa [15] [16-[19]. En referencia a los criterios ambientales se logran a menudo mediante un adecuado consumo de energía y eficiencia en el uso de los recursos y mitigando la generación de residuos, entre otros [18-21]. El proveedor por otra parte debe dar cumplimiento en los criterios sociales, en aspectos relacionados en la guía ISO 26000, los principios definidos por el Pacto Global y los indicadores de medición establecidos en el Reporte GRI.

A continuación, se definen cada uno de los criterios cualitativos y cuantitativos en el proceso de selección de proveedores verdes de productos y servicios (ver Fig. 1); soporte fundamental para el proceso de compras verdes [22].

2.1. Criterios económicos en la selección de proveedores verdes

La organización en el proceso de selección de proveedores verdes debe considerar los siguientes criterios económicos:

Costo. Comparación del precio de los materiales al precio de mercado, la competitividad de los costos, la capacidad de reducción de costos, el rendimiento de reducción de costos, la fluctuación en los costos, los costos directos, los costos de logística, costos de fabricación, costos unitarios, costos de ordenar, de costos de inventario, los costos de almacén, costo total de los envíos, el precio del producto.

Calidad. Cumplimiento con los estándares de calidad, programas de mejora continua, sistema de acciones correctivas y preventivas, documentación y auto-auditoría, inspección y control, sistema de calidad ISO instalado premios a la calidad, la certificación de calidad y rechazo de los clientes.

Entrega. Cumplimiento con la fecha de entrega, el cumplimiento de la fecha de vencimiento, retrasos en la entrega, la eficiencia de entrega, plazo de entrega, fiabilidad de entrega, el número de los envíos lleguen a tiempo, el tiempo de espera.

Tecnología. Instalaciones de fabricación actual, el desarrollo tecnológico de los proveedores para satisfacer la demanda actual y futura de la empresa, la capacidad de I+D+I y diseño de nuevos productos del proveedor para satisfacer la demanda actual y futura de la organización, la compatibilidad tecnológica, la capacidad, los proveedores velocidad en el desarrollo.

Flexibilidad. Cambios en el volumen del producto, tiempo de preparación, resolución de conflictos, análisis de capacidades, uso de máquinas flexibles, el tiempo o el costo necesario para agregar nuevos productos a la operación de producción existente.

Cultura. Sentimiento de confianza, actitud de gestión para el futuro, la compatibilidad entre los niveles y funciones, proveedores, estructura organizativa, la dirección estrategia, el grado de cooperación estratégica.

Innovación. Lanzamiento de nuevos productos, incorporación de tecnología.

Relaciones Comerciales. Relación a largo plazo, comunicación y reputación.

Planeación y evaluación de riesgos. Relacionada con la planeación y evaluación de riesgos ambientales, financieros y sociales.

2.2. Criterios ambientales en la selección de proveedores verdes

La organización en el proceso de selección de proveedores verdes debe considerar los siguientes criterios ambientales:

Ecoeficiencia de la Producción. Volumen promedio de los contaminantes del aire, aguas residuales, residuos sólidos y materiales peligrosos.

Eco-Diseño. Para la eficiencia de recursos, diseño de productos para reutilizar, reciclar, y la recuperación de material, diseño para la reducción o eliminación de materiales peligrosos.

Cumplimiento Legal. Certificados ambientales como la ISO 14001, la monitorización continua y el cumplimiento normativo, las políticas ambientales, procesos de planeación, programación y control con criterios verdes.

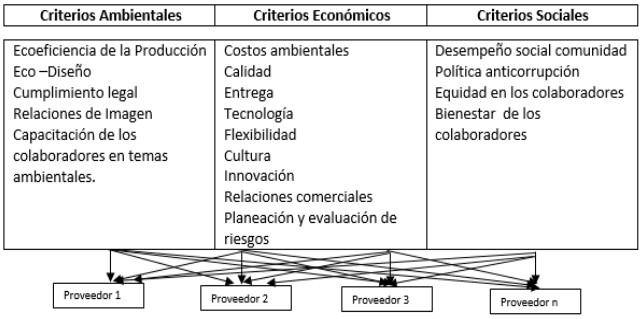


Figura 1. Criterios de selección de proveedores
Fuente: Autores

Relaciones de Imagen. Imagen verde de clientes verdes a un total de clientes, la responsabilidad social.

Capacitación. La capacitación del personal en temas ambientales.

2.3. Criterios sociales en la selección de proveedores verdes

La organización en el proceso de selección de proveedores verdes debe considerar los siguientes criterios sociales:

Comunidad. Impacto de la empresa y la involucración en el desarrollo de la comunidad, a través del apoyo de organizaciones e instituciones, de financiación de la acción social y del voluntariado social de los colaboradores.

Política anticorrupción. En referencia al panorama de las empresas en relación a la lucha contra la corrupción.

Equidad en los colaboradores. En relación a los derechos humanos y sus lineamientos éticos de la empresa.

Bienestar de los colaboradores. Acciones e iniciativas para selección y vinculación del personal acorde con las exigencias legales, evitando situaciones de discriminación.

3. Modelado inicial

El modelado inicial para el proceso de compras verdes se compone de varios pasos. El primer paso, será modelar el comportamiento del proceso discreto de cada una de las variables que intervienen en el proceso. Usualmente este tipo de procesos discretos representan las órdenes o acciones de control del sistema.

Un segundo paso será realizar un proceso de plegamiento en subsistemas de acuerdo a la concurrencia de cada uno de ellos, es conocido como el proceso de coloreado de la red, donde se implementan marcas que identifican cada subsistema concurrente del modelo. Para el coloreado solo se realiza para el modelo de comportamiento normal, una de las ventajas de las RdPC. Sin embargo, una de las ventajas principales de las RdPC se encuentra en la anidación de marcas y en su representación como subprocesos del sistema.

En la Red de Petri Coloreadas aplicadas a las Compras Verdes (RdPCCV) (en inglés Coloured Petri Net to green procurement (CPNGP), las solicitudes de un requerimiento de un servicio entrantes y salientes son codificadas como eventos como se detalla en la Fig. 2.

Si tenemos $* M_0 = \{M_0, M_1, \dots, M_{q+1}\}$, como el conjunto de $q+1$ marcados alcanzables por las marcas normales en la RdPCCV equivale al conjunto de estados posibles del sistema. Se considerará que existe correspondencia entre los valores esperados para un servicio con un comportamiento normal del sistema.

La RdPCCV, está compuesta inicialmente como una RdP aplicando las mismas técnicas de modelado que las utilizadas en el uso de las RdP generalizadas, realizando a continuación un proceso de plegamiento, utilizando las técnicas de RdPC para aprovechar las capacidades que estas ofrecen.

La idea inicial consiste en la elaboración de un modelo de RdP de comportamiento dinámico normal del sistema, no obstante, para el caso de aplicación a sistemas complejos, se puede desde un inicio, aplicar la capacidad de síntesis de las RdPC en esta primera fase de modelado, haciendo que una misma estructura básica común sea utilizada por varias subredes correspondientes a los distintos subprocesos que en un modelo global mantienen entre sí distintos tipos de cooperación.

La Fig. 2 muestra el modelo propuesto utilizado para el proceso de compras verdes. Una Red de Petri Coloreada para Compras Verdes (RdPCCV) está compuesta como:

$$RdPCCV = \{P, T, Pre, Post, Mo, C, PLNs, PLNu, PSS\} \quad (1)$$

Donde, *P* es un conjunto de lugares, *T* es un conjunto de transiciones, *Pre y Post* son las funciones de entrada y salida, un argumento adicional para estas funciones el cual es el color C_k de disparo de la transición T_j. Así $Pre(P_i, T_j\ /C_k)$ y $Post(P_i, T_j\ /C_k)$ correspondiendo en el caso general a la combinación lineal de las marcas coloreadas relacionadas al lugar P_i, M_0 es el marcado inicial.

3.1. Definición del conjunto de anidación en el proceso de compras verdes

Para el proceso de compras verdes se realiza el anidamiento representado por $PLNs, PLNu\ y\ PSS$ para nuestro modelo.

$PLNs \subset P$, si existe uno o más servicios a requerir en el lugar $P_i \in P$, este P_i $PLN_U \subset P$ si existe uno o más proveedores de servicios o requerimientos en el lugar$P_i \in P$, es P_i es ahora llamado PLN_U.

Donde, *C* es el color asignado a las diferentes identidades. $C = N \cup S \cup U$. Donde N es el subconjunto de lugares coloreados que representa el comportamiento normal $S = \{S_{1,}, S_{2,}, S_{3,} \dots S_{n,}\}$ representando el conjunto de posibles servicios en la base de datos que tiene la empresa (ej. Papel, computadoras, impresoras), $U = \{U_{1,}, U_{2,}, U_{3,} \dots U_{m,}\}$, representan los proveedores disponibles que pueden ofrecer el servicio, $SU = \{S_{1,}U_1, S_{2,}U_2, S_{3,}U_3 \dots S_{n,}U_m\}$, la unión $S \cup U$ representan el servicio de marcas requerido y proveedor seleccionado. Dos de las principales transiciones se pueden ver en la Fig. 2, La transición T_4 puede ser disparada sólo para el color $< S_1 \dots S_n >$ Donde n es el número de posibles servicios. Asimismo, el T_5 transición puede ser disparado sólo para el color $< S_1\ U_1 \dots S_n U_m >$ Donde *m* es el número de posibles proveedores. *PSS*, es el lugar de selección de proveedores, donde se tendrán en cuenta los criterios de calificación tanto cualitativos como cuantitativos [4].

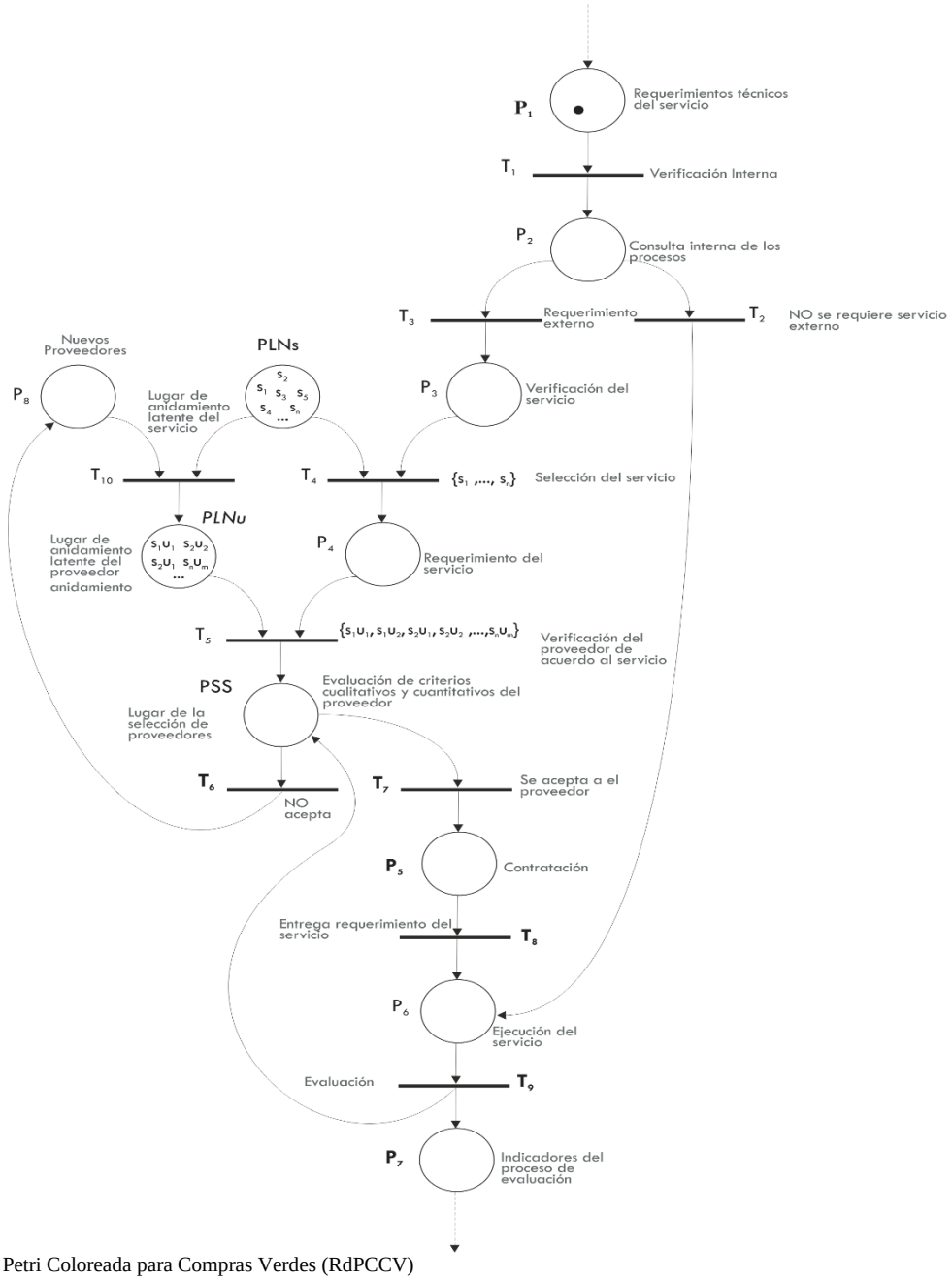


Figura 2. Red de Petri Coloreada para Compras Verdes (RdPCCV)
Fuente: Autores

3.1.1. Lugar de anidamiento PLN_S

El proceso de compras verdes inicia con la recepción de necesidades de requerimientos de bienes y/o servicios. Es importante que el cliente interno brinde una descripción clara y exacta de las necesidades, saber si se trata de un bien tangible o de un servicio o de bienes y servicios adjuntos, estas características del servicio están representadas en las marcas tipo *S*, las cuales describen la necesidad específica de cada servicio. Si se presenta una mala descripción de los requerimientos de materiales, servicios, niveles de calidad, tiempos de entrega generarán costos innecesarios a la empresa focal. Los administradores del proceso de compras verdes y el cliente interno comparten responsabilidades para describir de manera adecuada el bien o servicio que se requiere en la empresa focal. Cuando la empresa focal cuenta con inventario de un producto o servicio se dispara la transición T_3, en este caso el producto o servicio se entrega al área solicitada y no necesitará contratar a ningún proveedor.

PLN_S es el lugar de anidamiento latente de servicio o requerimientos técnicos. Para el lugar PLN_S, si existe uno o más servicios a requerir en el lugar $P_i \in P$ de la empresa focal, este P_i es ahora llamado PLN_S. El proceso de compras está encargado de realizar la recepción de la lista de materiales provenientes de las diferentes áreas de la empresa,

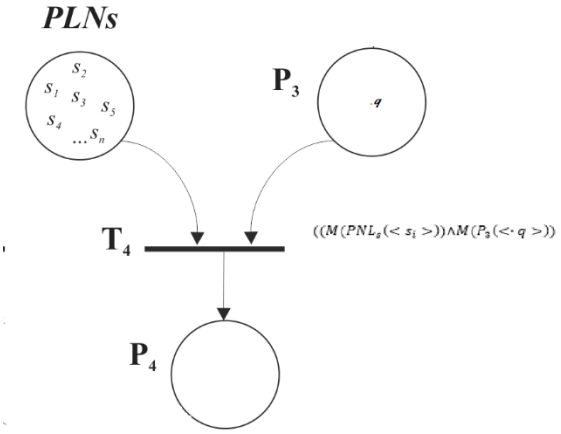


Figura 3. Lugar *PLNs*
Fuente: Autores

se reciben las solicitudes de servicio de productos con comportamiento normal, se conoce en nuestra red como PLN_S, donde las marcas del subconjunto $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots S_n\}$ representan los lugares coloreados con marcas de tipo servicios que son requeridos por la empresa focal. Mediante la transición *T_4. VSR(M_k)* → Lectura esperada de comportamiento normal para un marcado M_k.

La Fig. 3 representa la trayectoria de valores de servicios revisados (*VSR)*.

$$VSR = PLN_s \cap P_3 \quad (2)$$

Para cada marcado M_k, existe toda una posible combinación de valores esperados de *VSR (M_k)* a considerar, que depende del número de servicios que se requieran en la empresa focal.

A partir de cada uno de los lugares de anidamiento, se traza una trayectoria que partiendo de un lugar de anidamiento PLN_s, que contiene una marca del tipo s_i y una marca de comportamiento normal q; conduciendo finalmente al marcado *M(P_4(<s_i >))*, que evidencia la necesidad de un determinado tipo de servicio s_i .

Esto se expresa como

$$\forall\, s_i \in S\ \exists\ (M(PLN_s < s_i > \wedge P_3(<\cdot\, q >)) \\ [T_4/VSR((M(PNL_s(< s_i >)) \wedge M(P_3(<\cdot\, q >)) \\ > M(P_4(< s_i >)) \quad (3)$$

Donde s_i será el servicio que requiere la empresa focal para contratar a un proveedor.

3.1.2. Lugar de anidamiento PLN_u

El lugar PLN_U En el proceso de compras para cada servicio existen diferentes proveedores que puede suministrar el servicio con comportamiento normal donde las marcas se representan con lugares coloreados $s_1u_1, s_{i+1}u_{j+1} \dots, s_nu_m$ para brindar los servicios requeridos por la empresa focal.

$$PLN_u = \begin{bmatrix} s_1u_1 \\ s_1u_2 \\ s_nu_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{jk} \\ w_{11} & w_{12} & w_{2k} \\ w_{i1} & w_{i2} & w_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde,

$$SU = S \cup U = \{s_1u_1, s_{i+1}u_{j+1} \dots, s_nu_m\}$$

$$w_e = \sum_{i=1}^{9} a_{ei}\ ,\ \ w_a = \sum_{i=10}^{14} a_{ai}\ ,\qquad w_s = \sum_{i=15}^{18} a_{si}$$

$$Wu_j = w_e + w_a + w_s,\ \ 0 \le w_k \le 1 \quad (5)$$

El conjunto de pesos genera una matriz Wu_j, obtenidos en la autoevaluación realizada al proveedor de entrada en cada uno de los atributos por criterio de sostenibilidad. El peso de cada criterio de sostenibilidad económico, ambiental y social de los proveedores *(w_e, w_a* y *w_s)* respectivamente.

La Fig. 4 representa la trayectoria de valores de proveedores revisados por servicio (VPRS). Mediante la transición *T_5. VPRS(M_k)* → Lectura esperada de comportamiento normal para un marcado M_k.

$$VPRS = PLN_u \cap P_4 \quad (6)$$

Para cada marcado M_k, existe toda una posible combinación de valores esperados de *VPRS(M_k)* a considerar, que depende del número de servicios que se requieran en la empresa focal y los proveedores que puedan suministrar el servicio.

A partir de cada uno de los lugares de anidamiento, se traza una trayectoria que partiendo de un lugar de anidamiento PLN_u, que contiene una marca del tipo $s_i\, u_j$ y una marca de comportamiento normal s_i.

Esto se expresa como:

$$\forall s_iu_j \in SU\ \exists\ (M\big(PLN_u < s_iu_j > \wedge P_4(< s_i >)\big) \\ [T_5/\ (M(PLN_u < s_iu_j >)) \wedge VPRS(M(P_4(< s_i >)) \quad (7)$$

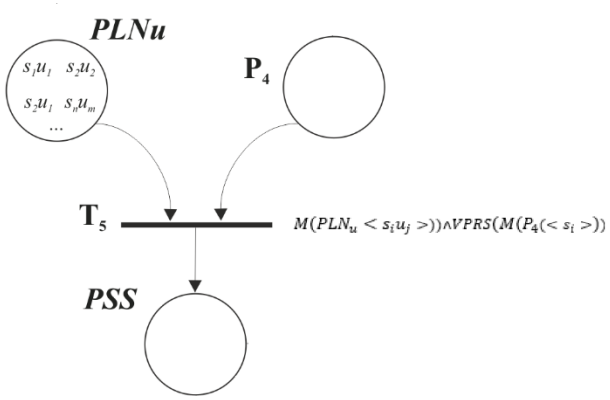


Figura 4. Lugar *PLNu*
Fuente: Autores

$$> M(PSS(< s_i u_j >))$$

Donde $s_i\, u_j$ será la lista de proveedores para ofrecer el servicio requerido por la empresa focal.

3.1.3. Lugar de anidamiento *PSS*

En el lugar de selección de proveedores *(PSS)* en compras verdes se presenta una propuesta desde la modelación matemática involucrando la lógica difusa, de manera que se pueda mejorar la incertidumbre en algunos datos cuantitativos y los juicios subjetivos de los elementos cualitativos.

La lógica difusa se ha aplicado en diferentes áreas, una de ellas es en la cadena de suministro sostenible entre las cuales se encuentra la selección y evaluación de proveedores verdes [23,24].

Las etapas para el diseño de un sistema difuso según [25] son: i) Identificación del tipo de problema y el tipo de sistema difuso que mejor se ajusta a los datos. ii) Definición de variables de entrada y salida, sus valores difusos y sus funciones de pertenencia (borrosificación o parametrización de variables de entrada y salida). iii) Definición de la base de conocimiento o reglas difusas. iv) Obtención de salidas del sistema mediante la información de las variables de entrada utilizando el sistema de inferencia difuso, v) Traslado de la salida difusa del sistema mediante un sistema de defusificación. vi) Ajuste del sistema validando los resultados.

La definición de los criterios usados en el proceso de evaluación y selección de proveedores se establecieron en el apartado 2.1 utiliza funciones de pertenencia de la forma µA(x), para establecer el grado de cumplimiento de los proveedores con los criterios de compras verdes. Para [26] un conjunto difuso A, se asigna a cada uno de sus elementos x un número real no negativo a través de la función de pertenencia µA(x), tal que µA(x) [0,1]

Un número difuso A trapezoidal se denota con cuatro elementos A=(a,b,c,d), con una función de pertenencia representada así:

$$\mu_A(x,a,b,c,d) = \max\left\{min\{\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-c}\}, 0\right\} \quad (8)$$

En el modelo de compras verdes pueden utilizarse los criterios de selección de proveedores sostenibles que se basan en variables lingüísticas; varios de ellos de naturaleza cualitativa. El nivel de importancia está determinado por medio de apreciaciones lingüísticas tales como: Muy baja, baja, media, alta o muy alta. La asignación de las ponderaciones o pesos a cada uno es adaptable a las preferencias y necesidades de cada empresa focal.

Para el proceso de selección de proveedores se establecieron tres dimensiones de entrada para dar una única salida que se considere la recomendación final. Las características de los grupos se describen a continuación:

Grupo 1 contiene las variables que tienen que ver directamente con el criterio económico: costos ambientales, calidad, entrega, tecnología, flexibilidad, cultura, innovación, relaciones comerciales y planeación y evaluación de riesgos. Nombramos a la salida de este grupo Cr.Econ.

El Grupo 2 consiste en las variables que tienen que ver directamente con el criterio ambiental: ecoeficiencia de la producción, eco-diseño, cumplimiento legal, relaciones de imagen y capacitación. Nombramos a la salida de este grupo de Cr.Amb.

El Grupo 3 contiene las variables que tienen que ver directamente con el criterio social: comunidad, política anticorrupción, equidad en los colaboradores y bienestar de los colaboradores. Nombramos a la salida de este grupo de Cr.Soc.

El Grupo 4 tiene las salidas de los tres grupos anteriores como los insumos y los procesa para dar una única salida. Esta única salida es el nombre de Índice sostenibilidad por proveedor (ISP).

Se utilizó para la modelación el software de Matlab, este software permite la incorporación de las variables de salida resultantes de cada una de las reglas, y a través del método de defusificación del centro de gravedad, se obtiene un valor una variable de salida para cada proveedor sostenible para un servicio (S_i), se ordenan los valores numéricos de mayor a menor de los proveedores, y el proveedor que obtenga la mayor calificación se selecciona para brindar el producto o servicio a la empresa focal.

Para el lugar PSS se toman en consideración los siguientes supuestos: a) No se tienen en cuenta restricciones de capacidad para los proveedores. b) Se aceptan requisiciones de un servicio sin tener periodos de tiempo. c) El resultado o solución del modelo, viene representado por las cantidades que se deseen ordenar a cada uno de los proveedores evaluados, de modo que la no asignación de cantidades a ordenar a un proveedor en particular, significará la no selección del mismo. d) El modelo de selección desarrollado tiene en consideración la evaluación de diferentes proveedores sostenibles frente a un solo cliente. e) La caracterización por medio de parámetros sostenibles de proveedores y del cliente, dependen del caso particular que se esté evaluando, dependiendo de los atributos que se consideren para cada criterio de sostenibilidad.

$$PSS = MP = max = ISP_1, ISP_2, ISP_3 \ldots ISP_j \quad (9)$$

El objetivo es seleccionar al mejor proveedor para la empresa focal. Para la RdPCCV, la transición T_7 puede ser disparado cuando un proveedor es seleccionado se lleva a cabo el proceso de contratación.

$$T_7/\big(M(PSS < ISP >)\big) > M(P_5(< MP >)) \quad (10)$$

Por el contrario, en el caso los valores que tengan un impacto que no cumple el ideal de la empresa focal, es disparada la transición T_6.

$$PSS: [T_6 > P_8 \quad (11)$$

4. Conclusiones

Las compras verdes están recibiendo cada vez más atención como consecuencia de un aumento de las problemáticas ambientales, sociales y económicas en los

países desarrollados y en vías de desarrollo.

En el artículo se fundamenta en la representación de un modelo para el proceso de compras verdes, basada en una herramienta para la modelación de sistemas de eventos discretos donde se encuentran las Redes de Petri Coloreadas. Las Redes de Petri Coloreadas, permiten representar gráficamente comportamientos de sistemas que facilitan a tomar decisiones oportunas y eficientes sobre el sistema modelado.

El modelado del proceso de compras con RdPC se caracteriza por su alta concurrencia presentando evoluciones paralelas y sincronización, exclusiones mutuas y conflictos que son típicos en los entornos distribuidos. Por tal motivo debe ser analizado desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo. El cualitativo busca comprobar el correcto funcionamiento del sistema, apoyándose en propiedades como ausencia de bloqueos, exclusiones mutuas, recursos compartidos, entre otros. El cuantitativo busca analizar y evaluar la eficiencia del sistema, además, la RdP, contribuyen a la capacidad de aplicar técnicas de fusión de lugares que permiten reducir el tamaño de los modelos resultantes.

Bibliografía

[1] Sarkis, J., A boundaries and flows perspective of green supply chain management. Supply Chain Management: An International Journal, 17(2), pp. 202-216, 2012. DOI: 10.1108/13598541211212924

[2] Sarkis, J., Zhu, Q. and Lai, K.H., An organizational theoretic review of green supply chain management literature. International Journal of Production Economics, 130(1), pp. 1-15, 2011

[3] Seuring, S. and Gold, S., Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. Supply Chain Management: An International Journal, 17(5), pp. 544-555, 2012. DOI: 10.1016/j.ijpe.2010.11.010

[4] Guevara, O., Rodríguez, U., Gómez, G. and Chenet, J., Green procurement model using petri nets: a perspective developed from the models applied to the supply chain. 6th International Conference on Energy and Sustainability, ISSN: 1743-3541, pp. 267-280, 2015. DOI: 10.2495/ESUS150231

[5] Rodríguez, L., García, E., Morant, F., Correcher, A. and Quiles, E., Hybrid analysis in the latent nestling method applied to fault diagnosis. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 10(99), pp. 1-16, 2013. DOI: 10.1109/TASE.2012.2229706

[6] Srivastava, S.K., Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. International Journal of Management Reviews, 9(1), pp. 53-80, 2007. DOI: 10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x

[7] Recuero, A. and Álvarez, M., Aplicaciones de las redes de Petri en la construcción. Informes de la Construcción, 48(447), pp.15-23, 1997.

[8] Alvarado, Ó.A.R., Gómez, Á., Tumbajoy, L. y Velasco, J.M., Modelado dinámico del proceso de trazabilidad de producto con redes de Petri para WorkFlow (WF-Net). Épsilon, 19, pp. 117-144, 2012.

[9] Billington, J. et al., The Petri net markup language: Concepts, technology, and tools. In: van der Aalst W.M.P., Best E. (eds), Applications and Theory of Petri Nets. ICATPN 2003. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2679, 2003. DOI: 10.1007/3-540-44919-1_31

[10] Murata, T., Petri nets: Properties, analysis and applications. Poceedings of the IEEE, 77(4), pp. 541-580, 1989. DOI: 10.1109/5.24143

[11] Jensen, K., Coloured Petri nets 1: Basic concepts, analysis methods and practical use. EATCS Monographs on Theoretical Computer Science. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp 150-220, 1992.

[12] Hsu, C.H., Wang, F.K. and Tzeng, G.H., The best vendor selection for conducting the recycling material based on a hybrid MCDM model combining DANP with VIKOR. Resour. Conserv. Recycl, 66, pp. 95-111, 2012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.02.009

[13] Seuring, S. and Muller, M., From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. Journal of Cleaner Production, 16(15), pp. 1699-1710, 2008. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.04.020

[14] Hanifan, G., Sharma, A. and Mehta, P., Why a sustainable supply chain is good business, 2012.

[15] Sarkis, J. and Talluri, S., A model for strategic supplier selection, Journal of Supply Chain Management, 38(4), pp. 18-28, 2002 DOI: 10.1111/j.1745-493X.2002.tb00117.x

[16] Simpson, P.M., Siguaw, J.A. and White, S.C., Measuring the performance of suppliers: an analysis of evaluation processes. Journal of Supply Chain Management, 38(4), pp. 29-41, 2002. DOI: 10.1111/j.1745-493X.2002.tb00118.x

[17] Bai, C. and Sarkis, J., Green supplier development: analytical evaluation using rough set theory. Journal of Cleaner Production, 18(12), pp. 1200-1210, 2010. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.01.016

[18] Amin, S.H. and Zhang, G., An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: multi-objective approach, Expert Syst. Appl, 39, pp. 6782-6791, 2012. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.12.056

[19] Amindoust, A., Ahmed, S., Saghafinia, A. and Bahreininejad, A., A. sustainable supplier selection: A ranking model based on fuzzy inference system, Applied Soft Computing, 12(6), pp. 1668-1677, 2012. DOI: 10.1016/j.asoc.2012.01.023

[20] Lee, A.H.I., Kang, H.-Y., Hsu, C.-F. and Hung, H.-C., A green supplier selection model for high-tech industry, Expert Systems with Applications, 36(4), pp. 7917-7927, 2009. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.11.052

[21] Govindan, K., Khodaverdi, R. and Jafarian, A., A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. Journal of Cleaner Production, 47, pp. 345-354, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.04.014

[22] Guevara, L.M., Criterios de sostenibilidad en la selección de proveedores verdes, caso de estudio en empresas de servicios. The Fourteen LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Engineering Innovations for Global Sustainability. January – 2016. DOI: 10.18687/LACCEI2016.1.1.140

[23] Govindan, K., Khodaverdi, R. and Jafarian, A., A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. Journal of Cleaner Production, 47, pp. 345-354, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.04.014

[24] Kannan, D., de Sousa Jabbour, A.B.L. and Jabbour, C.J.C., Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company. European Journal of Operational Research, 233(2), pp. 432-447, 2014. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.07.023

[25] Kasabov, N., Evolving fuzzy neural networks-algorithms, applications and biological motivation. Methodologies for the conception, design and application of soft computing, World Scientific, 1, pp.271-274, 1998. DOI: 10.1234/12345678)

[26] Kumar, D., Singh, J. and Singh, O.P., A fuzzy logic based decision support system for evaluation of suppliers in supply chain management practices. Mathematical and Computer Modelling, 57(11), pp. 2945-2960, 2013.

L.M. Guevara-Ortega, es MSc. en Ing. Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Docente asociada de la Universidad EAN, Bogotá, Colombia, en las áreas de investigación de operaciones y alineación estratégica y gestión de procesos. Actualmente es candidata a Dra. en Ingeniería de Procesos de la Universidad EAN, Bogotá, Colombia.
ORCID: 0000-0002-9883-4964

L. Rodríguez-Urrego, es PhD., Ing. en Mecatrónica de la Universidad San Buenaventura Sede Bogotá. Ing. en Automática y Electrónica Industria de la Universidad Politécnica de Valencia, MSc. en Automática, Robótica e Informática Industrial, MSc. en Tecnología Energética para el Desarrollo y Doctorado en Automática, Robótica e Informática Industrial de la misma Universidad española. En su realización profesional e investigadora cuenta con 14 años de experiencia en el área de automatización industrial y energías renovables, control de sistemas de eventos discretos, control de sistemas híbridos, sistemas de diagnóstico y recuperación de fallos y sistemas de supervisión y control. Actualmente es profesor titular de la Universidad EAN, Colombia.
ORCID: 0000-0001-6973-1280

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Indicators of energetic performance: A path to sustainability. "A case study of a high-roasting industry of coffee"

Jenny Lorena Ibarguen-Valverde, Jorge Eduardo Angulo-López, Judith Rodríguez-Salcedo & Omar Prías-Caicedo

Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. ylibarguenv@unal.edu.co, jeangulol@unal.edu.co, jrodriguezs@unal.edu.co, jrodriguezs@unal.edu.co

Received: May 29th, 2017. Received in revised form: September 14th, 2017. Accepted: October 11th, 2017.

Abstract
The result of the massive production of goods and services; has led our civilization to deal a major challenge: turning industrialized economies into sustainable industrial systems. The indicators of energetic performance achieve to improve the productive-energetic capacity of any organization and contribute to generate economic value, to reach the competitiveness and to mitigate the environmental impact. In the present research established the indicators of thermal energetic performance in one of nine high-roasting industry of coffee which cover more 90% of market in Colombia. The methodology used was based on the integral model of energy management. This study allowed to identify factors that affect directly the use and consumption of energy as the maintenance, the leaks of heat and lack of pressure and air calibration according to required power and to determine the scale of savings and expense in excess of thermal energy and CO2 amounts.

Keywords: Indicators of energetic performance; sustainability; high-roasting industry of coffee.

Indicadores de desempeño energético: Una ruta hacia la sustentabilidad. "Caso de estudio una industria torrefactora de café"

Resumen
El resultado de la producción masiva de bienes y servicios; ha llevado a nuestra civilización a enfrentar un importante reto: convertir las economías industrializadas en sistemas industriales sustentables. Los indicadores de desempeño energético logran mejorar la capacidad energético-productiva de cualquier organización, contribuyen a generar valor económico, alcanzar la competitividad y mitigar el impacto ambiental. En el presente trabajo se establecieron indicadores de desempeño de energía térmica en una de las nueve industrias torrefactora de café que cubren el 90% del mercado nacional. La metodología empleada se basó en el modelo de Gestión Integral de la Energía. Se Identificaron como variables que impactan negativamente en el uso y consumo de energía: el mantenimiento, fugas de calor y falta de calibración de la presión y aire en el quemador conforme a la potencia requerida; y se determinó la magnitud del ahorro y/o gasto en exceso de energía térmica y toneladas de CO_2.

Palabras Claves: Indicadores de desempeño energético; sustentabilidad; industria torrefactora de café.

1. Introducción

El desarrollo económico basado en la producción masiva de bienes y servicios, ha traído consigo severos daños al ambiente, producto del crecimiento demográfico y el excesivo uso y/o consumo de recursos frente a la capacidad de carga mundial. Dicha situación ha llevado a nuestra civilización a enfrentar un importante reto en el que se deben replantear los procesos de producción e implementar prácticas orientadas a la sustentabilidad [1,2].

Los indicadores de desempeño energético, son las expresiones y valores usados para monitorear, controlar y/o supervisar cambios en el rendimiento de la energía, y reducir pérdidas energéticas en cualquier proceso productivo lo que permite, a cualquier organización a través de gestión, establecer planes estratégicos para alcanzar metas a corto, mediano y largo

How to cite: Ibarguen-Valverde, J. L., Angulo-Lopez, J. E., Rodríguez-Salcedo, J. and Prías-Caicedo, O., Indicadores de desempeño energético: Una ruta hacia la sustentabilidad "Caso de estudio una industria torrefactora de café" DYNA, 84(203), pp. 184-191, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

plazo, así como obtener y mantener altos niveles de eficiencia energética [3,4]; pueden expresarse como una simple medida, un cociente o un modelo más complejo [5].

Dado que el desempeño energético se relaciona con la manera en que la energía es empleada, la cantidad de energía que es consumida, y la eficiencia con la que la energía se usa para lograr un resultado deseado, es importante notar que rara vez este puede ser representado con un solo valor o medida. La aplicación de indicadores de desempeño energético en industrias tales como el cemento, ha permitido identificar ahorros en el área de trituración de 18.346 KWh.día [3]

Los indicadores de desempeño energético deben contar con las siguientes características i) Estar basado en información confiable, ii) Ser transparente y verificable, iii) Estar basado en información específica con relación al proceso/sistema y el tiempo, iv) Poder medir cambios en una condición o situación a |través del tiempo, v) Facilitar observar de cerca los resultados de iniciativas o acciones y vi) Ser instrumentos valiosos para determinar cómo se pueden alcanzar mejores resultados en proyectos de desarrollo [6].

Aplicando este concepto en el ámbito ambiental, los indicadores son una importante herramienta de medida, que permiten expresar los resultados relativos al desempeño ambiental y acompañar la evolución de las empresas en la implementación de acciones que conllevan a mejorar en el camino de la sustentabilidad [7].

El concepto de sustentabilidad ha sido ampliamente discutido, analizado y definido, La Comisión Mundial del Ambiente y Desarrollo define el desarrollo sustentable como aquel que permite a la generación actual satisfacer sus necesidades sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus necesidades propias (World Commission on Environment and Development, 1987) [8] dado su difícil delimitación y definición absoluta, a pesar de ello las múltiples discusiones ha contribuido, al menos, a la aceptación de que el desarrollo sustentable constituye un concepto multidimensional que involucra, como mínimo, dimensiones económicas, sociales y ambientales, es decir, se trata de una idea amplia y compleja, que desborda el constructo teórico tradicional de las ciencias, y que deberá abordarse desde un ángulo interdisciplinario y de intercambio racional de ideas [9].

Las empresas en el escenario actual, han venido enfrentando diferentes presiones ciudadanas, que abarca aspectos no solo económico-financiero y de compromiso social; sino que además precisa de un análisis de los distintos grupos de interés y de la visión de las generaciones futuras en la gestión del compromiso ambiental, como parte del eje de la que hoy se hace llamar “empresa sustentable” [10].

En Colombia, los retos del desarrollo sustentable difieren de sector a sector por la naturaleza misma de su actividad económica; sin embargo, en todas las ramas es posible encontrar y destacar algunos ejemplos de compañías comprometidas con la sustentabilidad, tal es el caso de: Colcafe, Cartón de Colombia, Aerorepublica, indupalma, Bavaria y Alpina, quienes han logrado incluir prácticas que contribuyen al desarrollo mediante el compromiso ambiental [11].

En consonancia con estas iniciativas, se ha buscado generar modelos que de manera visual y sencilla puedan revelar el deterioro o las mejoras ambientales provocadas por las empresas, los procesos o los productos, bajo una óptica de disminución del impacto y del riesgo ambiental y máximo aprovechamiento de energía y recursos naturales [12]; y frente a este panorama se plantea los indicadores de desempeño energético como una ruta hacia la sustentabilidad. Dado que estos no requieren una alta inversión, permiten mejorar la capacidad energética productiva de cualquier organización, contribuyen a: generar valor económico, alcanzar la competitividad y mitigar el impacto ambiental [4].

En el presente trabajo: se establecieron indicadores de desempeño en el portador energético térmico en una de las diez industrias torrefactora de café que abarcan el 90% del mercado interno. La industria de Café representa parte importante en la economía de Colombia, como motor potencial para reducir la pobreza y distribuir el ingreso en la población rural, en el hecho de que esta actividad genera hoy uno de cada tres empleos [13]. El café está presente en casi el 90% de los hogares colombianos; y a pesar de que se registran mayores crecimientos en el consumo de cafés instantáneos debido a su practicidad y al rápido ritmo que la vida moderna impone, la tradición y el rito de preparación del café tostado y molido siguen siendo el preferido; se registran consumos a escala: mundial del 76% (incluye lo consumido en los países productores) [14]; y nacional del 86% (por cada 100 kilos de café consumidos) [15].

2. Metodología

La presente investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Optimización Energética en el Proceso Productivo del Café y Valoración del Impacto Ambiental” [16]; el cual está adscrito al Programa Estratégico Nacional en Gestión Energética-PEN: SGIE [17].

2.1. Selección de la empresa piloto

La empresa piloto, se seleccionó de acuerdo a los siguientes criterios:

- La industria torrefactora debía pertenecer a las empresas que manejan el 90% del mercado interno, según información suministrada por el Programa Toma Café; y por [18].
- Debía estar adscrita ante la Federación Nacional de Cafeteros y procesar café 100% colombiano.
- La industria debía aceptar los compromisos y obligaciones correspondientes a las actividades de diagnóstico, caracterización energética y establecimiento de medidas de optimización.

Una vez establecidas las empresas más representativas del sector torrefactor a nivel nacional, se inició el acercamiento con los jefes de producción o mantenimiento de cada empresa. Durante esta fase se realizaron visitas de diagnóstico de recorrido al proceso productivo.

2.2. Cálculo de la huella de carbono

Se estimó la huella de carbono en la industria torrefactora de café en CO_2 equivalente, resultado de la combustión de



Figura 1. Metodología para construcción de indicadores de desempeño energético.
Fuente: Autores

Tabla 1.
Límites del coeficiente de correlación-r^2

Descripción	*Límites de r^2*
Correlación Perfecta	r=1
Correlación Excelente	0,90< r<1
Correlación Aceptable	0,80<r<0,90
Correlación regular	0,60< r<0,80
Correlación Mínima	0,30< r<0,60
No hay correlación	0< r<0,30

Fuente: Tomado de [24]

Gas Natural, siguiendo la metodología PAS 2050:2011. [19]. El análisis se limitó al proceso de transformación del café verde a café tostado. El factor de emisión empleado para el gas natural fue de (2.1908 kgCO2/m3), que proviene de Cusiana (Dato tomado de la Unidad de Planeación Minero Energética-UPME, disponible en: http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/calculadora.html).

2.3. Propuesta de indicadores de desempeño energético como ruta hacia la sustentabilidad

Partiendo del concepto teórico de sustentabilidad definido por [20-23]; se planteó el postulado: indicadores de desempeño energético: una ruta hacia la sustentabilidad; esta premisa se enmarco dentro de tres dimensiones: I) Económico; concebido desde el ámbito lucrativo de la empresa o de viabilidad técnico-económica., II) Social donde prevalece la integridad y el bienestar del ser humano y III) Ambiental que está ligada a la preservación de los recursos productivos; a la administración eficiente y racional de los recursos naturales y perpetuidad del ecosistema.

2.4. Construcción de indicadores de desempeño energético

Los indicadores de desempeño energético, se establecieron siguiendo la metodología descrita en la Fig. 1.; el cual está basada en la metodología de Rodríguez. et al., 2014 [4]

2.4.1. Diagnóstico energético e identificación actual de la estructura energética-productiva de la empresa

En esta etapa se estudió la distribución, el uso y/o consumo de la energía térmica en el proceso productivo y se analizó el costo del energético en el año 2014. Esto con el fin de establecer el punto de partida de plan de medidas de uso eficiente de la energía. Se realizaron visitas técnicas al proceso productivo y entrevistas al personal de la empresa.

2.4.2. Establecimiento del modelo matemático

El modelo matemático que correlaciona el consumo de Energía en función de la producción, fue definido tomando datos de consumo de Energía térmica y producción diarios desde el mes de julio a diciembre de 2014, se filtró el 15% de datos atípicos que presentaron mayor grado de dispersión o variabilidad absoluta entre las variables, por el método estadístico de residual estandarizado (eliminar residuales estandarizado por fuera de 1,1/-1,1); y se generó el gráfico de dispersión y la función eq. (1) que expresa el consumo real de energía frente a la producción. La línea de tendencia se aprobó con un nivel de correlación significativo es decir r^2 >60 (observar la Tabla 1.).

$$E_t = mP + E_o \quad (1)$$

De donde:

E_t = Consumo de Energía teórico en el periodo de estudio

m = Pendiente de la recta, que representa la razón de cambio medio del consumo de energía respecto a la producción.

P = Producción en el periodo de estudio

E_o =Intercepto del eje X, que corresponde a la energía no asociada a la producción.

mP = Es la energía utilizada en el proceso productivo.

2.4.3. Generación, análisis y seguimiento de indicadores

Una vez se obtuvo la línea de tendencia o línea base conforme al periodo de estudio, se establecieron los indicadores de desempeño energético: Índice de Consumo-IC, Tendencia o Sumas Acumulativas-CUSUM e Indicador base 100, estos se representaron a través de gráficas que simbolizan diferentes comportamientos que impactan la eficiencia energética, según como se detalla en las Figs. 2-4. Finalmente se realizó un seguimiento al rendimiento energético en los meses de enero y febrero del 2015.

Los indicadores en este estudio fueron expresados en unidades de MBTU/kg.

- Índice de Consumo-IC:

Este indicador que mide el nivel de eficiencia y/o ineficiencia asociado a la producción, se determinó sustituyendo la eq. (2).

La curva de referencia con asíntota en el eje de las abscisas (x); se construyó con valores de consumo de energía teórico hallado en la eq. (1).

$$IC = \frac{E}{P} = m + \frac{E_o}{P} \quad (2)$$

- Tendencia o Sumas Acumulativas-CUSUM

Este indicador que evalúa la variación del consumo de energía conforme a la producción en un periodo base, se elaboró empleando la eq. (3). La magnitud de energía sobre-consumida o dejada de consumir se cuantificó con el valor del gas natural actual que corresponde a $1.065,97

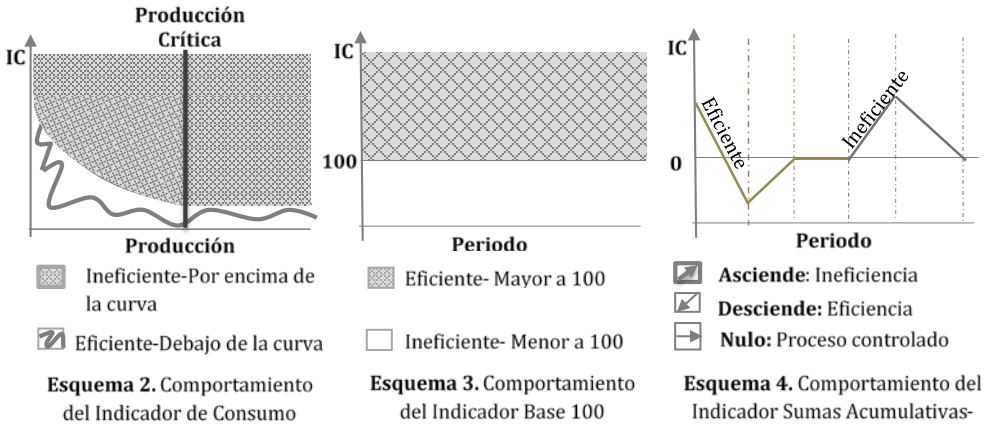


Figura 2. Comportamiento de los indicadores de desempeño energético
Fuente: Autores

$$\text{CUSUM} = \left[\left(\text{E}_{\text{r}_\text{i}} - \text{E}_{\text{t}_\text{i}}\right) + \left(\text{E}_{\text{r}_{\text{i}-1}} - \text{E}_{\text{t}_{\text{i}-1}}\right)\right] \quad (3)$$

De donde:

E_r=Consumo de energía real

E_t=Consumo de Energía teórico para una producción dada.

- Indicador Base 100

Esta herramienta de gestión que permite analizar el uso de energía en un periodo determinado; tomando como referencia y/o cumplimiento el valor de 100, se obtuvo aplicando la eq. (4).

$$\text{B100} = \frac{\text{E}_\text{t}}{\text{E}_\text{r}} \times 100 \quad (4)$$

3. Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados de la investigación.

3.1. Diagnóstico de energético e identificación actual de la estructura energética-productiva de la empresa

La industria piloto, comercializa café tostado y molido y tiene un promedio de producción diaria de 3000 kg. La energía térmica que proviene del gas natural, es utilizada solo en el proceso de tostado en los quemadores que calientan el aire para tostar el café. (Ver Fig. 3). Se cuenta con 1 medidor de gas natural, a partir del cual es posible obtener de manera general, los consumos de energía térmica asociados a las dos tostadoras. El consumo promedio del energético es de 391.98 MBTU/día, que equivale a 858,75 Kg de CO_2 emitidos, este constituye: el 88% del consumo total de Energéticos y el 77% del gasto económico estimado en $ 139.624.925 anuales; por tal razón se estudió. Es importante destacar que en el año 2014 la empresa de servicios de gas natural incrementó el precio en un 1.2 %, esto debido a los cambios de presión, solicitados por la industria para el mejoramiento del desempeño productivo. La empresa registra la producción en lotes y tienen definido como unidad equivalente: 62 kg equivale a un lote.

3.1.1. Descripción del proceso (Fig. 3.)

Antes de iniciar el proceso de tostado se realizan las mezclas de café en el laboratorio y posteriormente se efectúan en la tolva a donde ingresan todas las variedades de grano verde.

- ✓ **Monitoreo:** Los sacos de café pergamino proveniente de la trilladora, se pasan por el Monitor de almendra, el cual realiza la limpieza a los granos. El equipo dispone de imanes que sirven para retirar las impurezas y residuos de hierro aún presentes.

Los granos de café que han sido monitoreados, caen a unas tolvas hasta completar lotes de 62 kilos y luego son transportados por medio de una banda de cangilones hasta las dos tostadoras con capacidad de 62 a 72 kilos por bache.

- ✓ **Tostado:** El tostado es un proceso complejo que implica cambios principales de los granos verdes de café en términos de peso, densidad, color y sabor; y que involucra la transferencia de energía (del tostador al grano) y la transferencia de masa (vapor de agua y compuestos volátiles desde el grano al medio ambiente). Los granos verdes son tostados a altas temperaturas (160-240 ° C) en tiempos comprendidos entre 8 y 20 min; a través del flujo forzado de gases calientes producidos mediante la combustión del gas natural, en esta etapa se le otorga al grano las características de tostado de acuerdo al tipo de café que se procesa. El operario de forma visual determina cuando está listo para continuar en proceso.

Las dos tostadoras de cilindro cuentan con un sistema de inyección de agua (3 litros de agua de acueducto por lote) y aire comprimido, que se encargan de enfriar y/o bajar la temperatura a los granos tostado.

- ✓ **Molienda:** Mediante un elevador de cangilones; los granos son llevados a la sección de molienda o a la sección de empaque en el caso del café tostado tradicional en grano, los granos tostados son empacados en una máquina que tiene una tolva con un sensor que facilita el llenado automático del café tostado en las bolsas.

El café que va hacer molido, sube por el elevador hasta el molino de marca Med Brasilero, el cual tiene un par de rodillos y motores de 10 hp y 15 hp que logran una mayor

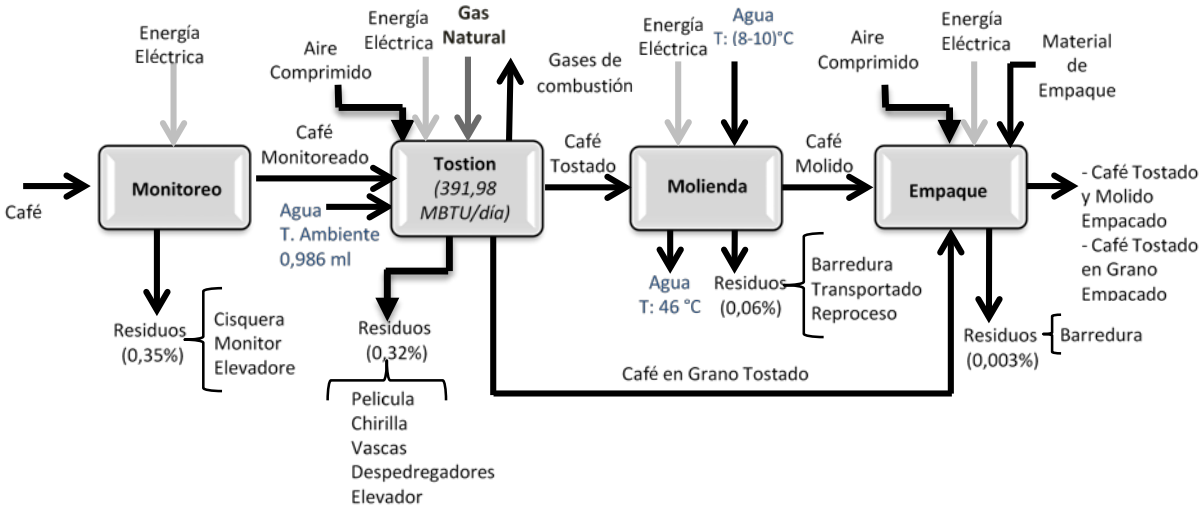


Figura 3. Diagrama energético - productivo industria torrefactora de café
Fuente: Autores

fineza en los granos, en el primer rodillo se da la separación o ruptura del café y en el segundo se homogeniza los cortes y se hace el ajuste. La mezcla de aire y material particulado que se genera en el proceso, son absorbidos por una campana de extracción.

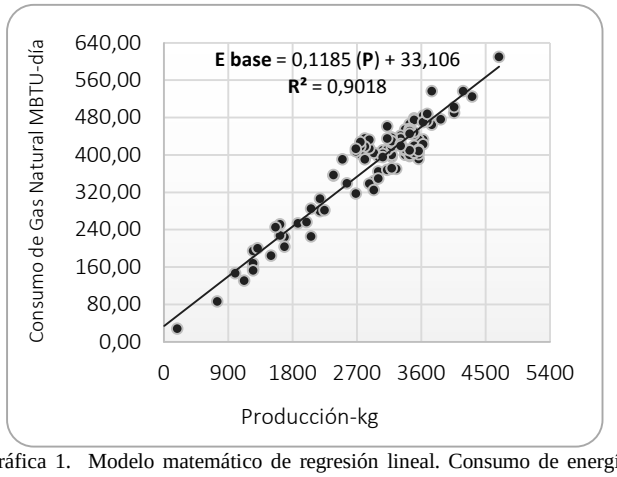
Empaque: Luego de la molienda, el café molido es transportado hasta las empacadoras. Los empaques tienen un calibre de 3 láminas.

En todo el proceso se extraen muestras de agua, café pergamino, café molido y tostado para verificar la calidad.

3.2. Modelo matemático

La línea base de consumo de energía térmica vs. Producción (ver Gráf. 1), presenta un excelente grado de correlación entre las variables-r^2 =0,9018.

Para ajustar el r^2, es decir r^2>90; es importante: I) Registrar y adicionar la cantidad de los residuos diarios a la producción. II) Consignar el peso exacto de cada lote de producto procesado.



Gráfica 1. Modelo matemático de regresión lineal. Consumo de energía térmica vs producción.
Fuente: Autores

3.3. Indicadores de desempeño energético

Conforme a las ventajas que ofrecen los indicadores de desempeño energético para el mejoramiento de la eficiencia energética en un equipo, proceso, área y/o planta, se presentan los indicadores tomando como caso de estudio la industria torrefactora de café.

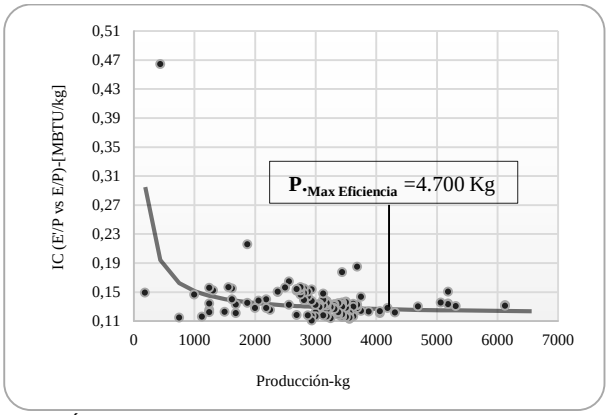
3.3.1. Índice de consumo

Los índices de consumo establecen la relación óptima entre la energía y la producción. De este modo el índice de consumo es una herramienta que contribuye a la programación de la producción [12].

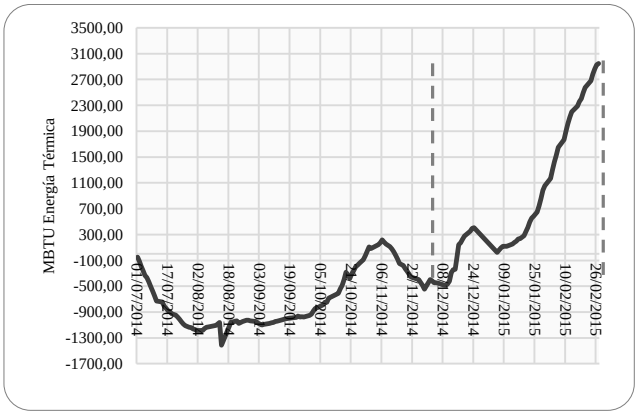
En el análisis de estas dos variables es importante considerar que la variación en los volúmenes de producción impacta positivamente o negativamente el consumo de energía. Se observa que a medida que la producción disminuye es posible que aumente el consumo total de energía, como se aprecia en la ecuación de la línea recta: E_t=m (P)+E_0, porque el gasto energético por unidad de producto aumenta, esto debido a que se incrementa el peso relativo de la energía no asociado a la producción respecto a la energía productiva. Autores como Castrillón, R. *et al.*, 2014; Monteagudo, J. & Gaitán, O. 2005 [3,25]; manifiestan que, para lograr mejorar el desempeño energético, se deberá establecer el índice de consumo mínimo alcanzable, que se obtiene cuando se trabaja a niveles productivos iguales o superior a la producción a la máxima eficiencia-PME o producción crítica.

En el caso de la industria piloto, el comportamiento general del energético en relación al índice de consumo real, reflejó que el 48,12 % de los puntos se localizaron por debajo de la curva, lo que evidencia un alto grado de ineficiencia asociada a la producción; (ver Gráf. 2).

El índice de consumo promedio registrado en el proceso fue de 0,13 MBTU/Kg, este valor deberá ser ajustado a 0,12 MBTU/kg que equivale a producir igual o mayor a 4.700 kg



Gráfica 2. Índice de consumo de energía térmica en industria torrefactora de café.
Fuente: Autores



Gráfica 3 Indicador de tendencia o sumas acumulativas-CUSUM en la industria torrefactora de café
Fuente: Autores

día. Por tanto, para mejorar el comportamiento energético, la organización deberá plantear nuevos esquemas de producción, en relación a la planificación.

3.3.2. Tendencia o sumas acumulativas (CUSUM) de energía térmica

El indicador CUSUM monitorea la tendencia de consumo energético en el proceso y determina la magnitud del ahorro o las pérdidas producidas en un periodo actual en relación a un periodo base. [3]. Esta herramienta sirve para establecer los rangos en los cuales debe permanecer variables de proceso que impactan el consumo, para ello es importante graficar en un eje secundario vertical los valores obtenidos de las variables a las que se les efectuó el seguimiento durante el tiempo de estudio del indicador [4].

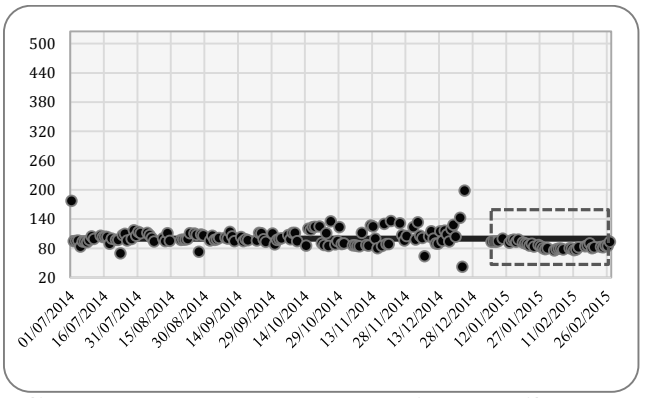
En el proceso de torrefacción de café, es posible identificar lo siguiente: (ver Gráf. 3).

I. En el mes de Julio el proceso operó de forma eficiente y luego entre el 04 y 28 de noviembre de 2014 se presentó el mismo comportamiento.
II. Los periodos entre: i) el 06 de agosto hasta el 04 de noviembre y ii) el 03 de diciembre de 2014 hasta el 26 de febrero de 2015, se ha sobre consumido el energético.

Desde enero hasta febrero del año 2015; se presentó un sobreconsumo en el energético de 2.947 MBTU que equivale en pesos a unos $3.141.413 y un valor de emisión de 6.456,29 Kg de CO_2.

Los períodos de ineficiencia presentados en las diferentes fases de tiempo fueron analizados y evaluados; de acuerdo a los registros de fallas, planes de mantenimiento y conceptos técnicos. Los bajos rendimientos energéticos se relacionaron con (ver Gráf. 4):

- Deficiencias en el aislamiento de los equipos de tostado.
- Falta de mantenimiento de equipos, a causa de los altos volúmenes de producción que se presentaron en los últimos meses; a raíz de que la empresa no disponía de personal suficiente para cubrir al 100% las actividades
- Desgaste de los equipos a causa de la antigüedad de los equipos (> 30 años).
- Variabilidad operacional, resultado de la falta de sistemas de regulación y control, principalmente en la temperatura y tiempos de tostado; y la rotación o flujo de gases tostados.



Gráfica 3. Indicador base 100 en industria torrefactora de café.
Fuente: Autores

Estudios realizados por Serna., C (2010), han demostrado que un buen mantenimiento en los equipos, procesos y/o áreas, mantendría el consumo de energía dentro de un límite razonable. Citado en [26]. Los tiempos muertos o en vacío de equipos como molinos, y ventiladores, reprocesos, condiciones de continuidad operacional, desgastes, fugas de aire y materia prima; y fallas en los aislamientos térmicos; impactan en el consumo energético. [3] Rodríguez et al (2014) [4] al evaluar variable de gestión sobre el desempeño energético de una caldera bagacera, concluyeron que después de los periodos de mantenimiento la tendencia del índice de desempeño es hacia el ahorro.

3.3.3. Indicador base 100 energía térmica

El indicador base 100, genera alertas en cuanto a variaciones positivas o negativas de la eficiencia del proceso, facilitando el análisis y generación de planes de acción en función de las mejores prácticas energética, los cuales permiten interacciones analíticas entre la producción y el consumo energético con miras a un mejoramiento continuo [3]

En la industria piloto, es posible afirmar que el 52,27% de los días trabajados en el periodo de julio a febrero de 2015, se operó de forma ineficiente la energía térmica. Las posibles causas están asociadas a: Inadecuada relación aire-combustible, falta calibrar la presión y aire conforme a la potencia requerida.; y pérdidas de calor.

Otros casos de aplicación del indicador se evidencian a continuación: Perea, N., & Rodríguez, J. (2013) citado en [4]; estudiaron el impacto de la humedad del Bagazo que alimenta a la caldera a partir del indicador Base 100, dicha humedad oscila entre 45% a 50%, sin embargo, identificaron que después de 48% de humedad la eficiencia de la caldera comienza a verse afectada.

4. Conclusión

Los indicadores de desempeño energético contribuyen alcanzar un crecimiento económico sostenido en las organizaciones, bajo la temática de uso racional de recursos energéticos y económicos; y disminución de gases de efecto invernadero, es posible hacer comparaciones de indicadores respecto a estándares nacionales o internacionales para los mismos productos o usos, en áreas o equipos.

En la industria piloto se evidenció a través de la verificación de indicadores energéticos que el proceso está operando de forma ineficiente en un 60% y que es importante verificar continuamente la gestión de los energéticos, planear la producción basada en el punto crítico de producción dado por el análisis del índice de consumo, logrando así definir niveles de producción que contribuyan a disminuir los gastos por unidad de producto.

La aplicación de la gestión total eficiente de la energía en numerosas industrias empleando indicadores de desempeño ha logrado demostrar la efectividad de estos, como sistemas de monitoreo y control energético; permitiendo: i) detectar potenciales de ahorro de energía y ii) establecer e implementar medidas técnico organizativas sin inversión con rápida recuperación, así como también diseñar e desarrollar programas de concientización, motivación y capacitación especializada para el personal, redundando todo ello en una reducción significativa de los consumos y costos energéticos.

Agradecimientos

Los Autores expresan los agradecimientos A Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia por el financiamiento, Al Programa Estratégico Nacional de Gestión Integral de la Energía-PEN: SGIE [27] por el apoyo y contribución. A la Industria Torrefactora de Café por permitirnos desarrollar la investigación y asumir los compromisos y obligaciones; y A la Sra. Ana María Sierra, Coordinadora Ejecutiva del Programa de Promoción de Consumo de Café de Colombia, por toda su colaboración en el acercamiento con las industrias.

Referencias

[1] Bustillo, L. y Martínez, J.P., Los enfoques del desarrollo sustentable Interciencia, [en línea]. 33(5), 2008, pp. 389-395, [Consultado 18 de octubre de 2016]. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000500014&lng=es&tlng=es

[2] Cervantes, M.G., Sosa, R., Rodríguez, G. y Robles, F., Ecología industrial y desarrollo sustentable. Ingeniería, enero-abril, pp.63-70, 2009.

[3] Castrillón, R., Quispe, E., González, A., Urhan, M. y Fandiño, D., Metodología para la implementación del sistema de gestión Integral de la energía: Fundamentos y casos prácticos, 1ra. edición, Universidad Autónoma de Occidente - Cali, pp.119-136, 2014.

[4] Rodríguez, J., Prías, O., Perea, N., Ibarguen, J. y Gutiérrez, M, Guía para la identificación de áreas, procesos y equipos críticos energéticamente e implementación de indicadores de desempeño energético. 1ra. Edición, Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira, pp. 24-25, 29-40, 50, 2014.

[5] Carretero, A. y García, J.M., Gestión de la eficiencia energética: Cálculo del consumo, indicadores y mejora. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR ediciones, 2012.

[6] Pinzón, J.D., Corredor, A., Santamaría, F., Hernández J.A. y Trujillo, C.L., Implementación de indicadores energéticos en centros educativos. Caso de estudio: Edificio Alejandro Suárez Copete - Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Revista EAN, [en línea]. (77), pp.186-200, 2014. [Consultado 31 agosto de 2015]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602014000200010&lng=en&tlng=es.

[7] Moraes, J., Torres, E. and Kiperstok, A., Aplicação da ferramenta SIG para obtenção de indicadores energéticos em edifícios. XII encontro Nacional de Tecnologías do Ambiente Construido-ENTAC Geração de valor no ambiente construido: Inovação e Sustentabilidade, [online]. 2 P., 2014. Available at: http://teclim.ufba.br/site/material_online/publicacoes/pub_art76.pdf.

[8] Mercado, A. y Cordova, K., Desarrollo sustentable – industria: Más controversias menos respuestas. Ambiente & Sociedade, [en línea]. VIII (1), 2005. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31780103

[9] Ramírez, A., Sánchez, Núñez, J. y García, A., El desarrollo sustentable: interpretación y análisis. Revista del Centro de Investigación. Universidad La Salle, julio-diciembre, [en línea]. pp.55-59, 2004. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34202107

[10] Suárez, A., Sustentabilidad empresarial, seguridad energética y ética ambiental en Chile. Acta Bioethica, 19(2), pp. 199-208, 2013. DOI: 10.4067/S1726-569X2013000200004

[11] Empresas sostenibles: Del dicho al hecho. [en línea]. [Revisado 08 de agosto de 2015]. Disponible em: http://www.dinero.com/edicion-impresa/especial-comercial/articulo/empresas-sostenibles-del-dicho-hecho/77403

[12] Salazar, C., Pamplona, O. y Vidal, J., La Eficiencia energética como herramienta de gestión de costos: Una aplicación para la identificación de inversiones en eficiencia energética, su evaluación económica y de riesgo. Revista del Instituto Internacional de Costos, Edición Especial XII Congreso, [en línea]. 50 P., 2012. Disponible en: http://www.revistaiic.org/articulos/numesp/articulo3_esp.pdf

[13] Cano, G., Vallejo, C., Caicedo, E., Amador, J. y Tique, Y., El mercado mundial del café y su impacto en Colombia. [en línea]. pp. 14-15, 2012. [Revisado 11 de mayo de 2015]. Disponible en: http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/be_710.pdf

[14] Centro de Comercio Internacional. Demanda de café tostado y molido. [en línea]. [Revisado: 08 de agosto de 2015]. Disponible en: http://www.laguiadelcafe.org/guia-del-cafe/los-mercados-del-cafe/Demanda%e2%80%93Cafe-tostado-y-molido/?menuID=2919

[15] Federación Nacional de Café. Edición N°27 colombianos tomando café. [en línea]. [Revisado: 16 de agosto de 2015]. Disponible en: http://www.federaciondecafeteros.org/algrano-fnc-es/index.php/comments/colombianos_tomando_cafe

[16] Ibarguen, J., Angulo, J. y Rodríguez, J., Optimización energética en el proceso productivo de café y valoración del impacto ambiental. Proyecto Joven Investigador Colciencias 2014-2015. Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira, Colombia.

[17] Sistema de Gestión Integral de la Energía SGIE. Universidad Nacional de Colombia. Programa para la consolidación de la red colombiana de conocimiento en eficiencia energética RECIEE. Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2015.
[18] Chaves, L., El café tostado y molido: Caracterización de la industria torrefactora nacional. Umbral Científico. [en línea]. 14, pp. 98-106, 2009. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30415059009
[19] PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. [online]. Recuperado de http://shop.bsigroup.com/upload/Shop/Download/PAS/PAS2050.pdf
[20] Cervantes, B., Pelayo, M. y Castañón, A., Sustentabilidad ambiental, del concepto a la práctica. Una oportunidad para la implementación de la evaluación ambiental estratégica en México. Gestión y Política Pública. [en línea]. XXI(2), pp. 292, 2012. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792012000200001&lng=es&tlng=es.
[21] Sachs, I., Desenvolvimento includente, sustentável, Capitulo: Desenvolvimento é ética para onde ir na America Latina, Rio de Janerio, Editorial Garamond, 2008, pp. 13-23.
[22] Almeida, F.O., Bom négocio da sustentabilidade, Rio de Janeiro: Nova Fronteira, [en línea]. 2008. [Consultado: 12 de agosto de 2015]. Disponible en: http://www.fernandoalmeida.com.br/livros/livro-fernando-almeida-sustentabilidade.pdf
[23] Siche, R., Agostinho, F., Ortega, E. é Romeiro, R., Índices versus indicadores precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. Revista Ambiente & Sociedade. Campinas X(2), pp. 137-148, 2007. DOI: 10.1590/S1414-753X2007000200009
[24] Martínez, C., Estadística básica aplicada, Cuarta Edición., Bogotá: Ecoediciones. 219 P., 2011.
[25] Monteagudo, J. y Gaitán, O., Herramientas para la gestión energética empresarial. Scientia Et Technica, [en línea]. XI(29), pp. 169-174, 2005. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911948015
[26] Rodríguez, J., Ibarguen, J. y Angulo, J., Gestión energética: Una alternativa para la producción de alimentos ecoeficientes. Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín, 67(II), pp.404-406, 2014.
[27] Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente, Universidad Pontificia Bolivariana y Universidad Industrial de Santander. Informe Proyecto PEN-SGIE entregado a Colciencias. Programa estratégico para la innovación en la gestión empresarial mediante la asimilación, difusión y generación de nuevos conocimientos en gestión energética y nuevas tecnologías e implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía en empresas de cinco regiones del país. Código: 1101-454-22024-Contrato RC No. 700-2008, 2014.

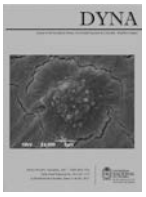
J.L Ibarguen-Valverde, recibió el título de Ingeniera Agroindustrial en 2012 de la Universidad Nacional de Colombia. Certificada como líder Energético por el Consejo Mundial de Energía y el Consejo Mundial de Energía Colombia en el año 2016; Gestora Energética de la Universidad del Valle, Nacional de Colombia y Autónoma de Occidente y Auditora en las Normas de Eficiencia Energética ISO 50001 del INCONTEC y Sistemas de Gestión Ambiental basado en la NTC ISO 14001:2004 de la Universidad Nacional de Colombia, Joven investigadora COLCIENCIAS 2013-Convocatoria No. 617. Desde el año 2010 es miembro del grupo de investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas-GEAL de la Universidad Nacional de Colombia y ha trabajado en proyectos de eficiencia energética en el sector industrial y de servicios con: la Universidad Nacional de Colombia para el PROGRAMA ESTRATÉGICO NACIONAL SISTEMAS DE GESTIÓN INTEGRAL DE LA ENERGÍA PEN-SGIE y la Universidad Autónoma de Occidente.
ORCID: orcid.org/0000-0003-4051-8501.

J.E. Angulo-López, Ingeniero Agroindustrial (2010) Universidad Nacional de Colombia; Tecnólogo en Alimentos (2008) Universidad del Valle, Especialización Tecnológica en Producción y Consumo Sostenible–Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (2017). De 2010 a 2017 trabajó en proyectos de investigación aplicados al área de eficiencia energética, energías alternativas, uso de residuos agroindustriales, biotecnología, fermentación alcohólica y láctica, probióticos; y alimentos funcionales en la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, en los grupos de investigación: Eficiencia Energética y Energías Alternativas–GEAL y Bacterias Ácido Lácticas; y sus Aplicaciones Biotecnológicas-Industriales-GIBALABI. Beneficiario de la Beca pasantía Joven Investigador–Colciencias (Convocatoria 525-2011 y 617-2013). En el Ingenio Manuelita (2016/4 -2016/9) lideró el proyecto de actualización, validación y valoración de descripciones de posición en diferentes gerencias. Actualmente es instructor del programa Técnico en Agroindustria Alimentaria en el SENA. Sus intereses de investigación incluyen: Alimentos funcionales, Biotecnología, Energías Alternativas, Uso eficiente de la energía, residuos agroindustriales.
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2909-0743

J. Rodríguez-Salcedo, Ingeniera Química de la Fundación Universidad de América en 1984. Especialista en Ecología, Medio Ambiente y Desarrollo de la Universidad INCCA de Colombia en 1997. Especialista y Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle en 2002 y 2004 respectivamente; Candidata a Doctorado en Agroecología de la Universidad Nacional de Colombia, Palmira. Se ha desempeñado como, docente adscrita al Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira desde 1999; en docencia, investigación y extensión en el tema de Energía. Coordina el Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas-GEAL. Áreas de desempeño académico incluyen: Termodinámica; Balance de Masa y Energía en sistemas productivos; Energía y Ambiente, Energía y Desarrollo, Biocombustibles, Eficiencia Energética y Valoración de flujos de Energía en Agroecología. Miembro activo de la Red Colombiana de Conocimiento en Eficiencia Energética-RECIEE. Miembro del Comité 186 de Combustibles líquidos y biocombustibles de-ICONTEC.
ORCID: orcid.org/0000-0001-5308-375X

O.F. Prías-Caicedo, recibió el título de Ingeniero Electricista en 1989, Especialización en Gerencia de Tecnología en 1997 de la Escuela de Administración De Negocios - E.A.N.; Maestría en Eficiencia Energética en 2005 de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. Ha trabajado como consultor con el BID, PNUD, USAID, con especial interés en: la formulación del Programa Nacional para el Uso racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales PROURE 2008, 2009-2015 2009-2010; el marco regulatorio Uso Racional de Energía-URE; para el Ministerio de Minas y Energía; y la Unidad de Planeación Minero Energética-UPME. Director proyecto BID-CCB, OPEN Promoción de Oportunidades de Mercado para Energías Limpias y Eficiencia Energética, se ha desempeñado como jefe del Programa Nacional de Investigaciones en Energía y Minería del Ministerio de Minas y Energía de Colciencias ; y en la actualidad es profesor Asociado adscrito al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia desde 2008, director del Grupo de Investigación del Sector Eléctrico Colombiano-GRISEC; y director de la Red Colombiana de Conocimiento en Eficiencia Energética-RECIEE.
ORCID: orcid.org/0000-0001-9764-0677

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Survey on IoT solutions applied to Healthcare

Diego Castro, William Coral, José Cabra, Julián Colorado, Diego Méndez & Luis Trujillo

Centro de Excelencia y Apropiación en Internet de las Cosas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. diegocastro@javeriana.edu.co, jcabra@javeriana.edu.co, william.coral@gmail.com, coloradoj@javeriana.edu.co, diego-mendez@javeriana.edu.co, trujillo.luis@javeriana.edu.co

Received: May 2nd, de 2017. Received in revised form: August 23th, 2017. Accepted: October 12th, 2017

Abstract
The Internet of Things (IoT) is a new technological paradigm that allows any object or thing to be connected to other things, services or people through the Internet. IoT brings tools for empowering working areas such as health, logistics, industry, security, agriculture and environment. In this paper, we introduce a comprehensive survey of IoT technologies, methods, statistics and success cases applied to healthcare. In the last section its talked about the work done in this subject on the Colombian context, including successful applications and current projects.

Keywords: Internet of things; e-Health; healthcare.

Revisión del estado del arte de soluciones IoT en salud

Resumen
El internet de las cosas, también conocido como IoT por sus siglas en inglés (Internet of Things), es un nuevo paradigma tecnológico que permite la interconexión de objetos (las cosas), servicios y/o personas por medio de internet. IoT introduce nuevas herramientas que enriquecen el trabajo en diferentes sectores industriales. Este artículo presenta un estudio del trabajo desarrollado en todo el mundo en tecnologías con base en el concepto de IoT en el marco de la industria del cuidado de la salud, incluyendo métodos, estadísticas y casos de éxito. En la última sección, se discute sobre el trabajo realizado en este ámbito en el contexto colombiano, incluyendo aplicaciones exitosas y proyectos que se encuentran en desarrollo.

Palabras clave: Internet de las cosas; e Health; cuidado en la salud.

1. Introduction

This survey focuses on applications regarding the health-care industry and *IoT*. Here, our goal is to highlight applications, studies, statistics and products that are derived from the healthcare *IoT* technological sector. To this purpose, we have followed the methodology presented by [1] and [2], in which the entire *IoT* sector applied to healthcare has been arranged into five categories and three sub-categories that allow us to identify potential trends. The results of this survey give to the reader a broader view of the state-of-the-art applications and methods used within the healthcare *IoT* industrial sector and future opportunities of growth.

The structure of this survey is composed by the sections shown in Fig. 1. Firstly, we start by providing a simple definition and ground work on *IoT* and eHealth concepts relevant to the subsequent sections. Secondly, we carry out an in-depth review of the main categories found in the literature.

This article is organized as follows: in chapter 3 *Personalized Care*, presents cases that are related to the trend called *Internet of Me*, this are applications such as the user can have a virtual doctor, its own health information available 24 hours. In chapter 4 *Health-wearables*, are studies that revolve around wearables devices that focus on gather health information. This can be either as commercial products or prototypes. In chapter 5 *eHealth and Colombian Applications*, we cover some cases where eHealth solutions have been implemented in Colombia and the impact of those solutions on the target community. Finally, in chapter 6 *IoT and health: Tomorrow*, we conclude this survey by presenting some tendencies and key factors on the future of eHealth.

2. Health-care and internet of things

We will start the discussion on the Internet of things with a brief description of *IoT* and some examples of past projects in that area.

How to cite: Castro, D., Coral, W., Cabra, J., Colorado, J., Méndez, D. and Trujillo, L., Survey on IoT solutions applied to Healthcare DYNA, 84(203), pp. 192-200, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

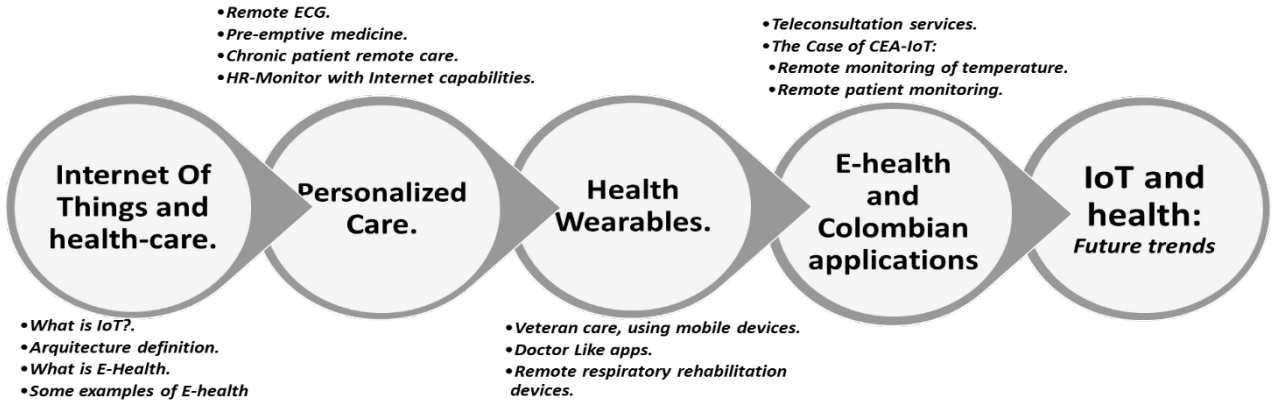


Figure 1. Survey chart.
Source: The authors.

Table 1.
Most relevant works on IoT architectures.

Layers	In [4]	In [5]	In [6]	In [7]	In [8]
Sensing Component	Sensors	Perception Layer	Perception Layer	Node level	Sensor management
In-site data processing	Acquisition system	-	Translator	-	Identification management
Communication management	Data transition	Network layer	Network layer	Link level	Network Access management
User/machine interface	Big Data	Application layer	Application layer	-	Intelligent Application
Error management	-	-	-	Network level	-
Power and security	-	-	-	-	Power and security management

Source: Summary of the authors of [4-8].

1.1. IoT

Brendan O'Brien, Chief Architect & Co-Founder, Aria Systems says: '*If you think that the Internet has changed your life, think again. The IoT is about to change it all over again*!'. We see it as a revolutionary, visionary and new technological paradigm that connect, gather information and react accordingly to events on the world.

The *IoT* is a concept of a world-wide network that is composed of any object (thing) that can be embedded into any environment with the aim of measuring variables (either physical, electrical, etc.) and sending this information through the internet to some other location for storage and/or analysis. This is a huge definition; accordingly to the Forbes magazine [3], in 2014 there were 16 billions of Internet connected devices and for 2020 estimations goes as high as 40.9 billion devices, all capable of internet connection and inter-device communication.

Some examples of previous works, [4-8], present in some measure the definition of how a basic IoT architecture should be composed. We took those definitions and in Table 1, we compare and summarize them as base for the upcoming work on this section and some of the prototypes on projects ahead.

With a basic architecture defined, next we need to see what have been done in IoT. There are several surveys that include a recompilation of applications, history, protocols and technologies according to the *IoT* paradigm [9-15]. In these studies, there are clear explanations on every aspect of the concept by presenting and explaining some of the latest protocols related to *IoT*. Lastly from a business perspective, [16], focus in an analysis of the transitions times between the conventional work flow process into the enterprises, when there is an inclusion of any *IoT* and/or Big Data solutions.

1.2. eHealth

This work will focus on the *IoT* solutions applied to the health care industry, or most commonly known as eHealth. EHealth is one of topics involving *IoT* with the most potential, being one of the main sectors where *IoT* can have the most relevant economic and social impact [9,14].

This is further discussed in [17], which present an analysis of the economic impact for *IoT* applications including eHealth solutions. This study concludes that eHealth has the highest percentage of investment with 40% of the total expenses done in *IoT*-related subjects. The approximate market share is presented on more detail in Fig. 2.

As any topic as broad and complex as *IoT*, or even the smaller eHealth, is needed to organize the information on a few selected categories. We start by selecting 3 key fields that will be the main trends to change and improve with *IoT*-based innovations following the analysis made by [1]. These three fields are:

1) Personalized service and product in healthcare.
2) Wearables revolving around healthcare.
3) Cases, products or experiences on Colombia.

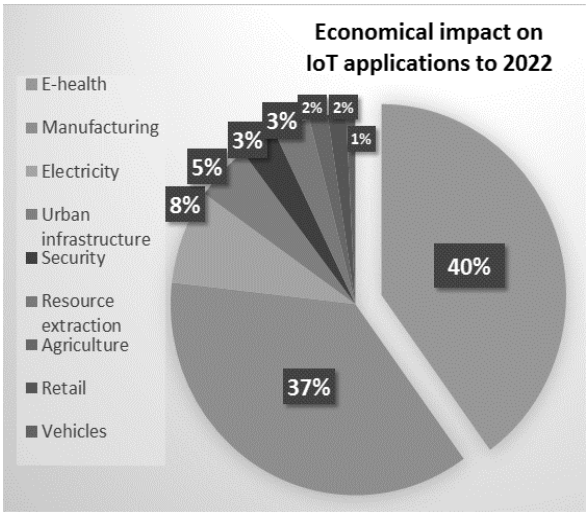


Figure 2. Economic Impact of IoT for 2022.
Source: [3].

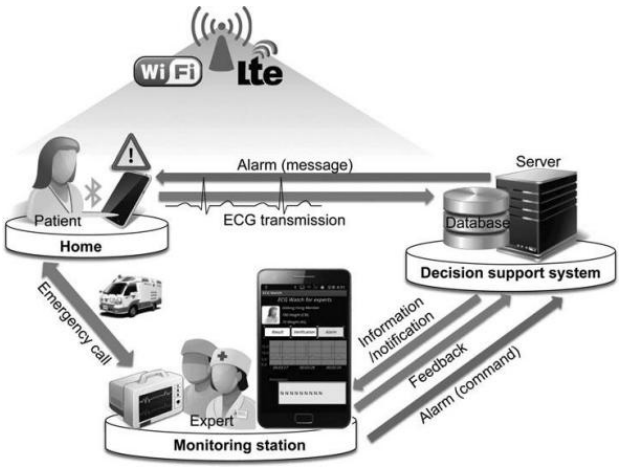


Figure 3. Monitoring system implemented in [19].
Source: [19].

3. Personalized care

The first trend we will discuss is the Internet of Me, or personalized care. This trend focus on products or services in which the patient can have a 24/7 doctor on his care and can access multiple diagnostics, etc. In the forthcoming sections, we explore the research behind this area, products on the market, statistics and impact on the health sector.

3.1. Research

In this subsection, we will talk about 2 studies of cases where the medic-patient gap was meant to be decreased, both on deceases where constant medical supervision was required.

According to the first case report, [18], in 2013 there were 9 million patients living with a chronic health condition in Canada, and 75% of the seniors have one or two chronic conditions. This program was implemented on the Stanford Chronic Disease Self-Management Program via telehealth (tele-CDSMP) with the purpose of the education on chronic condition management. This aimed those communities that live on rural areas, especially on those in Northern Ontario.

This is a 6-week health education program that helps people develop effective self-management skills to handle with the physical and emotional challenges of living with a chronic disease. Through the development of the research was evidenced an improvement on health-related attitudes. This lead to a positive change on the life styles of those patients.

The second study case, [19], present a preemptive approach to hearth disease management. This is based on the thought that any heart condition has multiple symptoms that can go from arrhythmia, pain, fainting or straight a heart attack. Being the case that some of these symptoms do not result on a consultation. And worst of all, there is a high chance that these symptoms won't manifest during the medical appointment.

A constant monitoring device that uses remote electrocardiography (ECG) and a cloud-based system was implemented to inform the patient about a possible heart condition. This kind of implementation generated a massive amount of data, bringing a new issue: assigning personnel to do a constant monitoring job will be expensive and inefficient. The solution presented was a trained a system to constantly analyze the data and notify the expert to generate an emergency call to the patient. This scheme is shown in Fig. 3.

The assessment of this system had 234 test footage, taken from the MIT-BIH Arrhythmia Database, with a final sensitivity of 97.22%, specificity of 96.89% and 97.06% accuracy.

3.2. Products

The first product, [20], is a model to perform the 6-Min Walk Test without the use of expensive and numerous devices. This is accomplished by performing an estimator based on a correlation between walking patterns and SpO2 levels of the patient. An estimation of the SpO2 levels is performed using real-time data of the integrated accelerometer, and embedded sensors on a smart-device. The data gathered from these sensors are the input of a support vector machine (SVN) trained to evaluate the SpO2 levels from the movement information of a patient. This method was tested on patients with an obstructive respiratory pathology to predict the SpO2 levels during the test. The results made a prediction with an accuracy of 87.96% to 92.99%, compared to results of conventional test protocols.

Another example of *IoT* solutions to improve the patient-medic relationship, are those which monitor the patient at home. Although is a great approach, these implementations have some challenges, especially on hardware required to setup a homecare system. It tends to be expensive, not very user-friendly and not open source to build custom-made solutions. In [21] was proposed and implemented a hybrid system with local and cloud data analysis of several environmental and physiological variables of the patient.

This hybrid method of data analysis reduces the hardware requirements, time to access the information and facilitates to access to the platform. The system architecture can be seen in Fig. 4.

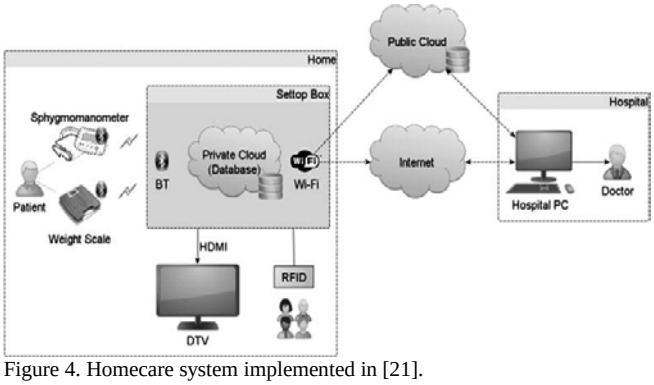


Figure 4. Homecare system implemented in [21].
Source: [21].

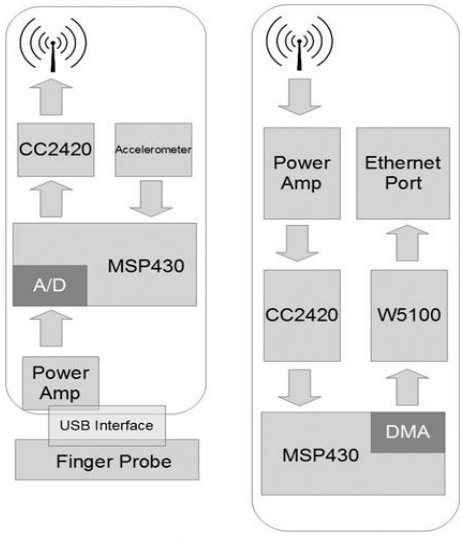


Figure 5. System topology for the Internet-enabled heart rate monitor implemented in [22].
Source: [22].



Figure 6. Heart rate monitor prototype implemented in [22].
Source: [22].

The next study is another approach, to change the current device status, with a special interest on increase the patient comfort of an Internet-enabled heart rate monitor, [22]. This monitor was implemented on a finger probe reducing its size and weight. Fig. 5 shows the topology and the reference of the parts used to build the working prototype (Fig. 6 shown the prototype).

This system was compared to a high-end commercial electrocardiogram sensor (Nellcor NPB-4020), for simulated heart rates from 30 to 240 BPM, with astonishing results of 100% accuracy. Later was performed a year-long trial, with a total, 32 seniors are wearing the sensors, 24 of whom have suffered from a stroke or have Parkinson's disease, resulting on an average of availability 99.48%.

3.3. Statistics and impact

The previous cases were products or services that were tested on a focus group that agreed on the usage of the technology. But one of the biggest issues that face *IoT* and eHealth is the access to the solutions by the patients. The study in [23] presents the acceptance percentage of the use of eHealth services by patients suffering from bronchial asthma and other chronic respiratory conditions via a questionnaire, consisting of 73 different questions distributed among 200 patients remaining under the care of a tertiary-care pneumology centers in Krakow, Poland.

Similar to the previous work, in [24] is presented a case of study to assess the willingness to use information systems among 286 patients over 60 years register in southwest Poland's Lower Silesia Province. This questionnaire asks about the current usage of information technologies by the patients, and their willingness of usage of services based on this kind of technologies. These studies resulted on a low reception of the technologies, 41%, and discourages the implementation of this kind of services on elderly population.

The access and acceptance of a service is a consumer point of view statistic, on the next case we presented a case of the viability of a specialized test performed using tele consultations. The test performed was a diabetic retinopathy examination, a test that must be performed regular on diabetic patients to avoid eyesight lost, usually performed by a trained professional, but in this case performed by tele-medicine with a non-mydriatic camera, [25].

This study resulted that only 20 % of the cases studied by the tele-consultation service needed a follow up checkup, with 86% of these cases being redirected because mad image quality, proving that in this kind of examination can be time and money saver to the health provider and patient. Not only specialized test can be replaced using *IoT*-enabled technologies, in Arizona, United States, [26], was made a study to evaluate the effects of constant remote monitoring to patients suffering from a heart condition from December 12, 2011 to December 12, 2012. The results of this study can be seen in Fig. 7, where the comparison between the start of the program and the end clearly indicate better results of the patients using the *IoT* system, with decrease of the evaluated factors of at least 40%.

4. Health wearables

The next trend we will discuss is the Health wearables (H-wearables). On this trend, it will be a special focus on all systems, prototypes or studies that involves a wearable or change the value creation of a certain system, program or procedure. In the forthcoming sections, we explore the research behind this area, products on the market, statistics and impact on the health sector.

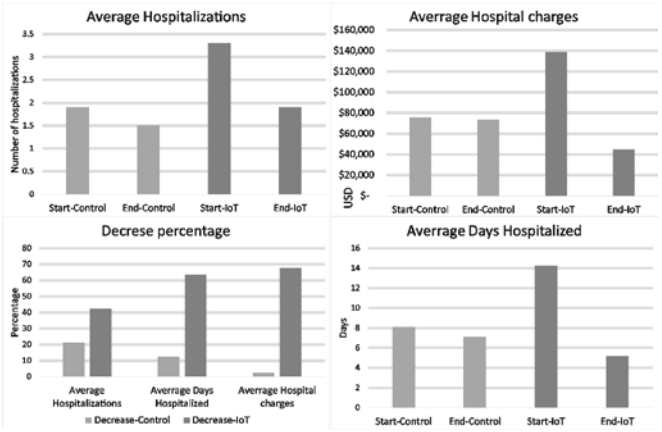


Figure 7. Results of the implementation on [26].
Source: [26].

4.1. Research

The first case of study presented on this section is a study of the acceptance of a tele intensive care unit (Tele-*ICU*), [27]. This study made a survey to gather the usage perceptions of this kind of systems across several health institutions. This kind of system employs several *IoT*-enabled sensors to be on the patient location. The results presented that the average feels comfortable using the system and had positive feedback about it. Among other responses, highlighted that this kind of systems increasing quality of service and decrease response times in case of emergency.

Finally, is concluded that the use of this kind of services help to decrease the personnel required and the amount of work needed at an Intensive Care Unit (*ICU)*.

Another medical service that could use a solution on *IoT*, is the pharmacy section. Implementations aimed to improve in one aspect or other are presented in [28-30]. The first one developed a temperature and humidity *IoT* registry with cloud access, the second is inventory centered, how to establish a better inventory management system.

The last one is a system to aimed to decrease the number of medication error due to the lack in staffs, with a special consideration on those entities that have an inability to follow procedures designed to avoid this kind of errors but are for large hospitals. It was prototype implemented between the University of California Davis Health System and six rural hospitals. After this implementation, it was reduced 30% the errors of medication delivery with only a 19% of errors reported across the medication orders received during the trial.

Finally, a study of the viability of establishing any tele consultation service on third world countries from the connection stability is the focus in [31]. This was a study made on health clinics in rural KwaZulu-Natal, South Africa. The tele services that were tested were: database access, e-mail, and tele-clinics. After several tests, quality of service examination and package loss analysis, the study conclude that it was not possible to provide this kind of clinical services in a reliable way with the Internet access available at that location.

4.2. Products

From a hardware point of view, in [32] is presented a development of a low-cost body inertial-sensing network, composed by a base station, three wearable inertial measurement nodes, and a wireless communication protocol. Every node contains one three-axis accelerometer, one three-axis magnetometer, and one three-axis gyroscope. This study proved that the body inertial sensing network can provide a viable approach for a wearable system to capture biomotion statistics.

Other application are solutions to improve the life quality, [33], especially those patients with chronic obstructive pulmonary disease (*COPD*). This solution was a tele-platform that increase the information access to the patients with this condition and more so to those in areas where access to a specialist is relatively hard. But all solutions that are implemented must consider the interaction between the service, product or platform and the final user. Finally, was performed an analysis from an expert point-of-view on how accessible, reliable and friendly was the platform for *COPD* patients in rural areas.

To improve the quality of life from the perspective of the improvement the subjects eating patterns and the quality and size of the food ingest, as well as changing the exercise routines, [34]. To fulfil this, there was implemented a web page to control the dietary intake information. By photo upload into the platform the users of the app received professional feedback on the dietary intake and could log all their meals, either by a new upload or selecting from a previous entry.

The study lasted for 12 weeks from September to November 2011. This study compared that method of logging of the dietary intake information and classic ones, in which the best results are seen on the system developed, in fat reduction, waist ratio and weight loss.

4.3. Statistics and impact

One of the main benefits of a telehealth service is the reduction of travel associated expenses. For the Veterans Affairs (VA) offices was performed a study, [35], to analyze the travel expenses during the 2005 and 2013-time frame. The study calculated the travel distance and time saved because of tele-medicine, which resulted in an average travel savings of 145 miles and 142 min per visit. Which led to an average travel payment savings of $18,555 per institution per year.

In a similar problematic but under the secondary care expenses on an established telehealth program at the NHS Birmingham East and North, the Birmingham Own-Health [36]. The results of a comparative study between a control and a focus group concluded that was present a reduction of 27% of the expenses on the focus group, equivalent in a reduction from $1,678 to $1,305.

Another kind of patients that beneficiate from reduction on travel expenses are maternal, newborn, and child health (MNCH), [37] . This study was performed in Malawi, during 2013 to 2015. The implemented system of tele-consultations and remote assistance concluded on a decrease of the cost

associated of $29.33 per patient and $4.33 per successful use, with an average cost for each patient being expected from $67 to $355, meaning a minimum expense decrease of 19%.

Lastly is a study of the impact of 12 apps running on a clinic environment. This study ([38]), made analytics over the time on the application, discrimination between users, interaction with the data services, interaction between medical staff and patients, and data demand from these users. On average the medical staff apps (administrative, nurses and doctor apps), were accesses 452 times per day, especially on the inter-communication departments. On the patient point the average access was 222 times per day, being appointments and test results being the main categories.

5. Colombian cases of ehealth applications

On the local context, there are 2 main examples of eHealth developments. The first case is presented as a 2-part study of the impact of a consultation service called *Doctor Chat*. This tool was created with the aim of improving access to health care services in Colombia, especially in rural areas. The purpose of the first part of this study was to analyze the different queries that were submitted between May 2007 and June 2009. This analysis was focused on three parameters: trend issues, demographics and the scope of the service. There were 1624 consultations within this time frame, with a tendency of the users asking about information on sexual and reproductive health issues. With these results a more specialized research can be done to accurately measure the impact of this kind of services. The second part [39], focused the sexual risk behaviors associated with poor or miss-information on sexuality asked through the usage of the app and the impact of its continuous use.

To evaluate the effectiveness of the app a comparative and well recognized survey was implemented prior the use. After a 6-month period, the same survey was made. The results prove an increase of 22 % in the correct answers and moreover, 4 behaviors were pin pointed as major sexual risks in the population. These were:

- Homosexual intercourse.
- Non-use of condoms.
- Sexual intercourse with non-regular and commercial partners.
- Use of psychoactive substances.
- Lack of knowledge on symptoms of sexually transmitted diseases and HIV transmission.

The second example of eHealth developments on Colombia, is the work done by a novel research center founded on 2016, The Excellence and Adoption Center in Internet of Things (Centro de Excelencia y Apropiación en Internet de las Cosas [CEA-IoT]) [40,41].

The CEA-IoT it's a governmental initiative with the collaborative efforts of top notch technological enterprises, Intel, Microsoft and HP enterprise as well as local and well established enterprises such as Hospital Universitario San Ignacio, Logika, Totto, among others and finally several of the top-notch universities of the country including, Pontificia Universidad Javeriana, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Universidad Santo Tomas and the Universidad Tecnológica de Bolivar.

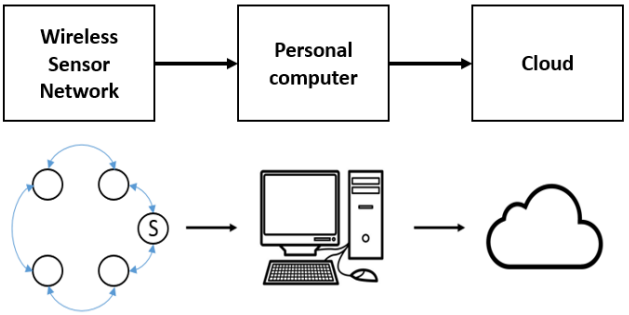


Figure 8. Architecture of the first project at CEA-IoT
Source: The Authors

The aim of the center is to motivate the creation, transference and appropriation of knowledge in IoT related subjects, this is accomplished by designing different projects for enterprises by work teams created on an educational environment and with the guidance and assistance of the of top notch technological enterprises.

During the first year, the CEA-IoT on eHealth have been developed 2 projects, both associated with the Hospital Universitario San Ignacio; and a stand-alone prototype. Following we present and summarize these projects.

5.1. An IoT approach for wireless sensor networks applied to eHealth environmental monitoring

The first project, is the development and implementation of a wireless sensor network (WSN) of temperature and relative humidity for hospital infrastructure. This project had an 9-month development time, in which a WSN was implemented on 11 locations for continuous remote monitoring. Using the architecture of Fig. 8, we implemented a cloud-based monitoring system on which we have an easy-to-read graphic system accessible by any web browser and an internet connection.

Each node composing the WSN is an embedded hardware of reference MTM-CM5000-MSP of Advanticsys. This node has an embedded temperature and relative humidity sensor, wireless connectivity on the 2.4 GHz band and is powered by 2 AA batteries. Likewise, the node supports the 6LoWPAN protocol and it has embedded the Contiki Operating System.

The WSN is composed by 3 types of node software configuration, maintaining a single hardware standard. These configurations are:

1) Sink node: Is the node connected to the computer to receive all the data for the network.
2) Sensing node: Is a node located on the site of interest in which is needed to sense temperature and/or humidity.
3) Link node: Is a node located to ensure the point-to-point communication across the whole network. Does not sent data of its own sensor.

The system uses a local computer to create a local log report of the data gathered by the sink node, and upload any new data to the cloud service. The system is set-up to measure temperature and humidity once every hour.

After a trial period of 9 months after to the project implementation a reliability metric was extracted by analyzing

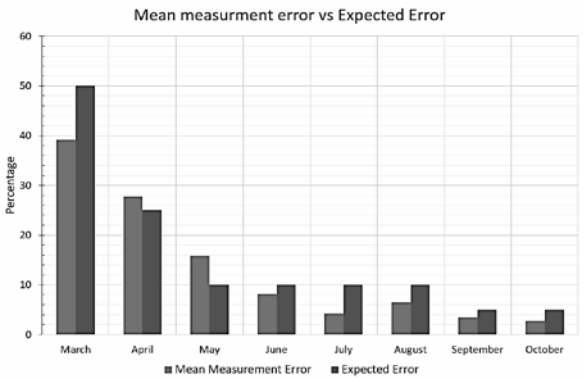


Figure 9. Mean error percentage vs the expected error each month.
Source: The Authors

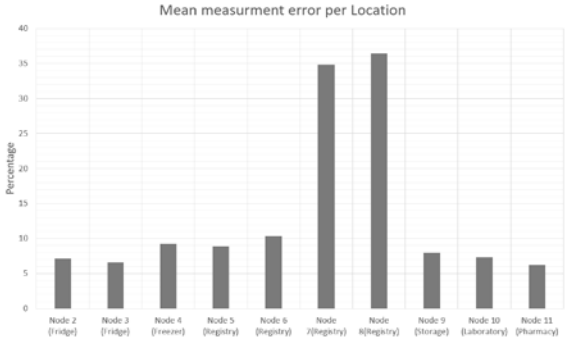


Figure 10. Mean error percentage by location.
Source: The Authors

missing messages from local log and from the cloud service. This metric was calculated for each node location evaluating the whole trial period and each month for the whole system.

The Fig. 9, resumes the mean error of the whole system (light grey) and the expected error for each month (dark grey). For most of the months the expected error was less compared to the error presented. On the first 3 months of the trial, we expected a high error due to the non-familiarity between the staff and the system, causing disconnections that where left unattended for long periods of time (4-7 days). The Fig. 10, present the mean error of the messages that arrive either on the log reports on the computer or the cloud platform. The larger error presented where on nodes 7 and 8, which was an expected result. This greater error was due to the late inclusion of theses nodes, almost 2 months after the start of the trial. The system remains presenting a mean error during the whole trial around 10%, meaning less than 140 messages (from a total of 1400 messages) lost each month.

During and after the system deployment there was positive feedback form the staffs in-charge of the system, whom previously had to do this record manually. This kind of system frees up to 60-minute each day to those in-charge of the records, recovering 1.25 days per month and 15 days every year. Also, the remote visualization make the process more accurate and faster.

5.2. Remote monitoring of patients

The second, and still undergoing, project, is for remote monitoring of non-critical patients with a heart failure. This project aims to reduce or avoid the expense of time consumed by the medical staff when they visit the patient at home for a medical consultation. During this consultation, the medical staff register the current state of the patient while gathering information of vital signs such as heart rate, respiration rate, temperature, weight, blood pressure and oxygen saturation levels. This information later (next day) must be manually logged to a clinical information service. Likewise, and due to the delay reporting the information gathered from the patient, the medical staff will never know the current state of the patient avoiding to carry out a preventive medicine.

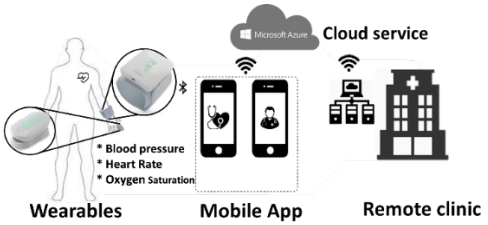


Figure 11. System Architecture.
Source: The Authors.

For this project, we developed a cloud-based system, using Microsoft Azure suite, and a mobile application to integrate 3 wearables to remote measure the vital signs from the patient on designated hours. This improves the time management, increases the amount of measurements done and decreases the expenses associated to the measurement procedures. Also, this kind of system allow to increase the capacity of the health program without needing to invest on recurring expenses and decreases de amount of work associated to each professional.

The developed app is meant to have multiple purposes, it serves as a gathering point of all the data, is a tool to communicate the medical staff with the patient. This app also, gather quantitative and qualitative information on the well-being of the patients and have important information about their treatments, such as therapies and indications of well-being changes that could mean an alarm.

This project is being developed from 3 fronts (Fig. 11), the first one takes care of the identification and connection of the wearables, the app development and cloud back-end. The second one the patient management and ethics approval to deal with the well-being of any patients, guaranteeing that the system won't generate any risk to the patients. The last front is the patient trail to validate the system integrity and applicability on a real test.

In this project, we have 3 wearables (all approved by the FDA and tested in real patients), that measure hearth rate, respiration rate, skin temperature, blood pressure and oxygen saturation. The ethics committee from a Hospital (Hospital Universitario San Ignacio) had approved the patient and information management protocol. The next step is to start the trial, that at the moment of this work remains under preparation stage.

6. Iot and ehealth: future trends and upcoming work

IoT and the health care system today are getting more and more interest, on the previous sections was a clear tendency on surveys and studies of feasibility of these technologies with positive results on all cases, and the success cases impact over a 30-60% the economy associated with the services it's related.

Today the technology is still undergoing the development phase, with large gaps between the leading countries and those with similar conditions of Colombia. Although this gap exists, Colombia is starting the process of education and public acceptance towards this new paradigm.

One of the biggest issues that the eHealth is facing is the acceptance of the most relevant users, the elderly, the technological shift this population faces it's a challenge that the technology struggle with, and reduces the times and resources invested on these services; but this challenge will disappear as a new generation emerge, giving the opportunity to be massive implemented and developed. Likewise, a clear future on each of the trends discussed on this article.

1. The Internet of Me or personalized care: The future points to a common and shared database where all the medical information from the patients will be cloud-storage, with unique identifications for each doctor, nurse or any health professional.
2. Outcome Economy or H-wearables: We will have the today's equivalent of health sensors on us the whole time, without these to interfere with our day-to-day activities, sending, analyzing and anticipating with all the data.

As single trends these are the futures that accordingly to the today we can expect, but in a near future might appear a ground-breaking technology that changes these perceptions. The tendency is to close gaps, in training, in technology, in time, in space, even on people.

References

[1] Hu, F., Xie, D. and Shen, S., On the application of the internet of things in the field of medical and health care. Proceedings - 2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing, GreenCom-iThings-CPSCom 2013, pp. 2053-2058. 2013. DOI: 0.1109/GreenCom-iThings-CPSCom.2013.384

[2] Qi, J.,Yang, P., Fan, D. and Deng, Z., A survey of physical activity monitoring and assessment using internet of things technology. 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing, pp. 2353-2358, 2015. DOI: 10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.348

[3] Press, G., Internet of things by the numbers: Market estimates and forecasts. [Online]. [date of reference October 10th of 2017]. Available at: https://www.forbes.com/sites/gilpress/2014/08/22/internet-of-things-by-the-numbers-market-estimates-and-forecasts/#3d7f9f60b919.

[4] Zhao, K. and Ge, L., A survey on the internet of things security. 2013 Ninth International Conference on Computational Intelligence and Security, pp. 663-667, 2013. DOI: 10.1109/CIS.2013.145

[5] Jingjing, Y., Shangfu, H., Xiao, Z., Benzhen, G., Yu, L., Beibei, D. and Yun, L., Family health monitoring system based on the four sessions internet of things. TELKOMNIKA (Telecommunication Compututing, Electronics and Control.), 13(1), pp. 314-320, Mar. 2015. DOI: 10.12928/telkomnika.v13i1.1265

[6] Chen, M., Wan, J. and Li, F., Machine-to-machine communications: Architectures, standards and applications. KSII Transactions on Internet and Information Systems., 6(2), pp. 480-497, 2012. DOI: 0.3837/tiis.2012.02.002

[7] Venkatasubramanian, K.K. and Gupta, S.K.S, Physiological value based efficient usable security solutions for body sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), V, 2010. DOI: 10.1145/1777406.1777410

[8] Lee, B.M. and Ouyang, J., Intelligent healthcare service by using collaborations between IoT personal health devices. International Journal of Bio-Science and Bio-Technology, 6(1), pp. 155-164, 2014. DOI: 200.3.154.187

[9] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. and Ayyash, M., Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 17(4), pp. 2347-2376, 2015. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095

[10] Gluhak, A., Krco, S., Nati, M., Pfisterer, D., Mitton, N., Razafindralambo, T. and Gluhak, A.T.R., A survey on facilities for experimental internet of things research, IEEE Communications Magazine., 49 November, pp. 58-67, 2011. DOI: 10.1109/MCOM.2011.6069710

[11] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. and Palaniswami, M., Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems., 29(7), pp. 1645-1660, 2013. Doi: 10.1016/j.future.2013.01.010

[12] Khan, R., Khan, S.U., Zaheer, R. and Khan, S., Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges. Proceedings - 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2012, pp. 257-260, 2012. DOI: 10.1109/FIT.2012.53

[13] Lopez, P., Fernandez, D., Jara, A.J. and Skarmeta, A.F., Survey of internet of things technologies for clinical environments. Proceedings - 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA 2013, pp. 1349-1354, 2013. DOI: 10.1109/WAINA.2013.255

[14] Perera, C., Liu, C.H.I.H., Jayawardena, S. and Chen, M., A survey on internet of things from industrial market perspective. IEEE Access, 2, pp. 1660-1679, 2014. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2389854

[15] Sheng, Z., Yang, S., Yu, Y., Vasilako, A.S, McCann, J. and Leung, K., A survey on the ietf protocol suite for the internet of things: Standards, challenges, and opportunities. IEEE Wireless Communications., 20(6), pp. 91-98, 2013. DOI: 10.1109/MWC.2013.6704479

[16] Kaivo-Oja, J., Virtanen, P., Jalonen, H. and Stenvall, J., The effects of the Internet of things and big data to organizations and their knowledge management practices. vol. 224. Cham: Springer International Publishing, 2015.

[17] Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P. and Marrs, Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy, McKinsey Global Insitute, 0(May), 163 P., 2013.

[18] Guilche, S.J.T.R, Bereket, T., Voth, J., Haroun, V.A. and Jaglal, S.B., Spanning boundaries into remote communities: An exploration of experiences with telehealth chronic disease self-management programs in rural northern Ontario, Canada. Telemedicine and e-Health, 19(12), pp. 904-909, 2013. DOI: 10.1089/tmj.2013.0057

[19] Park, J. and Kang, K., Intelligent classification of heartbeats for automated real-time ECG monitoring. Telemedicine Journal and e-Health: The official Journal of the American Telemedicine Association., 20(12), pp. 1069-1077, 2014. DOI: 10.1089/tmj.2014.0033

[20] Cheng, Q., Juen, J., Hsu-Lumetta, J. and Schatz, B., Predicting transitions in oxygen saturation using phone sensors. Telemedicine and e-Health, 22(2), pP. 132-137, 2016. DOI: 10.1089/tmj.2015.0040

[21] Lin, B.-S., Hsiao, P.-C., Cheng, P.-H., Lee ,I.-J. and Jan, G.E., Design and implementation of a Set-Top Box–Based homecare system using hybrid cloud. Telemedicine and e-Health, 21(11), pP. 916-922, 2015. DOI: 10.1089/tmj.2014.0244

[22] Huang, J.-H., Su, T.-Y., Raknim, P. and Lan, K., Implementation of a wireless sensor network for heart rate monitoring in a senior center. Telemedicine and e-Health, 21(6), pp. 493-498, 2015. DOI: 10.1089/tmj.2014.0081

[23] Duplaga, M., The acceptance of e-health solutions among patients with chronic respiratory conditions. Telemedicine Journal and e-Health: The OFFICIAL JOURNAL of the American Telemedicine Association., 19(9), pp. 683-691, 2013. DOI: 10.1089/tmj.2012.0306

[24] Bujnowska-Fedak, M.M. and Pirogowicz, I., Support for e-Health services among elderly primary care patients. Telemedicine Journal and e-Health: the Official Journal of the American Telemedicine Association., 20(8), pp. 696-704, 2013. DOI: 10.1089/tmj.2013.0318

[25] Mansberger, S.L., Gleitsmann, K., Gardiner, S., Sheppler, C., Demirel, S., Wooten, K. and Becker, T.M., Comparing the effectiveness of telemedicine and traditional surveillance in providing diabetic retinopathy screening examinations: A randomized controlled trial. Telemedicine Journal and e-Health: The Official Journal of the American Telemedicine Association., 19(12), pp. 942-948, 2013. DOI: 10.1089/tmj.2012.0313

[26] Riley, W.T., Keberlein, P., Sorenson, G., Mohler, S., Tye, B., Ramirez, S., and Carroll, M., Program evaluation of remote heart failure monitoring: Healthcare utilization analysis in a rural regional medical center.

Telemedicine Journal and e-Health: The Official Journal of the American Telemedicine Association., 21(3), pp. 157-162, 2015. DOI: 10.1089/tmj.2014.0093

[27] Ward, M.M., Ullrich, F., Potter, A.J., MacKinney. A.C., Kappel, S. and Mueller, K.J., Factors affecting staff perceptions of Tele-ICU service in rural hospitals. Telemedicine Journal and e-Health: The Official Journal of the American Telemedicine Association., 21(6), pp. 459-466, 2015. DOI: 10.1089/tmj.2014.0137

[28] Mambou, E.N., Nlom, S.M., Swart, T.G., Ouahada, K., Ndjiongue, A.R. and Ferreira, H.C., Monitoring of the medication distribution and the refrigeration temperature in a pharmacy based on Internet of Things (IoT) technology. Electrotechnical Conference (MELECON), 2016 18th Mediterranean, pp. 18-20, 2016. DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495412

[29] Essoussi, I.E., A performance evaluation of some collaborative inventory management practices in the healthcare supply chain. 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM) , Seville, pp. 277-284. 2015. DOI: 10.1109/IESM.2015.7380171

[30] Cole, S.L., Grubbs, J.H., Din, C. and Nesbitt, T.S., Rural inpatient telepharmacy consultation demonstration for after-hours medication review. Telemedicine and e-Health, 18(7), pp. 530-537, 2012. DOI: 10.1089/tmj.2011.0222

[31] Clarke, M. and Mars, M., An investigation into the use of 3G mobile communications to provide telehealth services in rural KwaZulu-Natal. Telemedicine Journal and e-Health: The Official Journal of the American Telemedicine Association., 21(2), pp. 115-119, 2015. DOI: 10.1089/tmj.2014.0079

[32] Guo, Y., Wu, D., Liu, G., Zhao, G., Huang, B. and Wang, L., A low-cost body inertial-sensing network for practical gait discrimination of hemiplegia patients. Telemedicine Journal and e-Health: The Official Journal of the American Telemedicine Association., 18(10), pp. 748-754, 2012. DOI: 10.1089/tmj.2012.0014

[33] Stellefson, M., Chaney, B. and Chaney, D., Heuristic evaluation of online COPD respiratory therapy and education video resource center. Telemedicine and e-Health, 20, pp. 972-976, 2014. DOI: 10.1089/tmj.2014.0009.

[34] Chung, L.M.Y., Law, Q.P.S., Fong, S.S.M. and Chung, J.W.Y., Teledietetics improves weight reduction by modifying eating behavior: A randomized controlled trial. Telemedicine Journal and e-Health: The Official Journal of the American Telemedicine Association., 20(1), pp. 55-62, 2014. DOI: 10.1089/tmj.2013.0104

[35] Russo, J.E., McCool, R.R. and Davies, L., VA Telemedicine: An Analysis of cost and time savings. Telemedicine Journal and e-Health: The Official Journal of the American Telemedicine Association., 22(3), pp. 209-215, 2016. DOI: 10.1089/tmj.2015.0055

[36] Nymark, L.S., Davies, P., Shabestari, O. and McNeil, I., Analysis of the impact of the Birmingham OwnHealth program on secondary care utilization and cost: A retrospective cohort study. Telemedicine and e-Health, 19(12), pp. 949-955, 2013. DOI: 10.1089/tmj.2013.0011

[37] Larsen-Cooper, E., Bancroft, E., Rajagopal, S., O'Toole, M. and Levin, A., Scale matters: A cost-outcome analysis of an m-Health intervention in Malawi. Telemedicine and e-Health, 22(4), pp. 317-324, 2016. DOI: 10.1089/tmj.2015.0060

[38] Park, J.-Y., Lee, G., Shin, S.-Y., Kim, J.H., Han, H.-W., Kwon, T.-W., Kim, W.S. and Lee, J.H., Lessons learned from the development of health applications in a tertiary hospital. Telemedicine Journal and e-Health: The Official Journal of the American Telemedicine Association., 20(3), pp. 215-222, 2014. DOI: 10.1089/tmj.2013.0192

[39] Lopez, C., Ramirez, D.C., Valenzuela, J.I., Arguello, A., Saenz J.P., Trujillo S., Correal D.E., Fajardo R. and Dominguez, C., Sexual and reproductive health for young adults in Colombia: Teleconsultation using mobile devices. JMIR mHealth uHealth, 2(3), pp. e38, 2014. DOI: 10.2196/mhealth.2904.

[40] Rodriguez, C., Castro, D., Coral, W., Cabra, J.L., Velasquez, N., Colorado, J., Mendez, D. and Trujillo, L.C., IoT system for human activity recognition using BioHarness 3 and smartphone. In Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS '17). ACM, New York, NY, USA, Article 49, 7 P., 2017. DOI: 10.1145/3102304.3105828.

[41] Velasquez, N., Medina, C., Castro, D., Acosta, J.C. and Mendez, D., Design and development of an IoT system prototype for outdoor tracking. In Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS '17). ACM, New York, NY, USA, Article 48, 6 P. 2017. DOI: 10.1145/3102304.3105575

D.M. Castro, received the BSc. Eng. in Electronical Engineering in 2015 from the Pontificia Universidad, Bogotá, Colombia. Since 2016 to the current date he is a research in training at the Centro de Excelencia y Apropiación en Internet de las Cosas (CEA-IoT), he is undergoing his master degree at the same university. His research interests include: simulation, modeling and implementation of autonomous robotics, control theory, biomimetic robotics and unmanned drone development.
ORCID: 0000-0003-0022-8868.

J.L. Cabra, received the BSc. Eng. in Electronical Engineering in 2011 from the Universidad Nacional de Colombia, Colombia and the MSc. in Electronical Engineering in 2015 from the Pontificia Universidad, Bogotá, Colombia. Since 2016 to the current date he is a senior research in training at the Centro de Excelencia y Apropiación en Internet de las Cosas (CEA-IoT), he is undergoing his doctorate degree at the Pontificia Universidad, Bogotá. His research interests include: Software development, embedded hardware and software design, IoT and biomedical embedded systems.
ORCID: 0000-0002-5269-6148.

W. Coral, receive the PhD. in Automation and Robotics in 2015 from the Universidad Politécnica de Madrid, Spain. The MSc. in Electrical and Control Systems Engineering in 2010 from the University of Technology of Belfort-Montbèliard, France. The BSc. in Electrical and Control Systems Engineering in 2010 from the University of Technology of Belfort-Montbèliard, France. The BSc. in Electronic Engineering from the Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia. Since 2016 to the current date he is a senior research and project manager of the eHealth division at the Centro de Excelencia y Apropiación en Internet de las Cosas (CEA-IoT). His research interests include: soft robotics, bio-inspired and biomimetic robotics, embedded hardware and software design, IoT and biomedical embedded systems.
ORCID: 0000-0002-3971-9536.

J.D. Colorado, is an assistant professor in the Department of Electronics Engineering at Pontificia Universidad Javeriana. He completed his PhD. and MSc. in Robotics at Universidad Politecnica de Madrid, Spain, where he studied the development of novel flight controllers (GNC) for a diverse category of Unmanned Aerial Vehicles, including quad-rotors and highly-articulated morphing wing drones inspired by the biomechanics of bats. He was a visiting research fellow at Brown University, USA (2010-2011), where he studied how to integrate smart-actuators based on Shape Memory Alloys to control wing modulation in a bat-like robot. Julian Colorado research interests include Aerial Robotics, Bio-inspired robotics, GNC. Over the years, he has written a variety of Robotics code for robot dynamics simulation and control. Currently, he is also the head of the eHealth division manager of the CEA-IoT.
ORCID: 0000-0002-6925-0126.

D. Méndez, is an assistant professor in the Department of Electronics Engineering at the Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. He received his PhD. (2012) and his MSc. (2011) in Computer Science from the University of South Florida, Tampa FL, USA, his ME. (2008) from the Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, and his BSc. (2005) in Electronics Engineering from the Universidad Nacional, Bogotá, Colombia. Currently he is the technical manager of the CEA-IoT. Diego's research interests include Internet of Things (IoT), embedded systems, wireless sensor networks, participatory sensing, digital systems design, operating systems and high-level systems design. Currently, he is also the technical director of the CEA-IoT.
ORCID: 0000-0002-9866-4416.

L.C Trujillo, is an assistant professor in the Department of Electronics Engineering at the Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. He received his MSc. (2005) in Telematics from the Universidad del Cauca, Cali, Colombia, his ME. (2008) from the Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, and his BSc. (1992) in Electronics Engineering from the Universidad del Cauca, Cali, Colombia. Currently he is the general manager of the CEA-IoT. His research interests include Internet of Things (IoT), wireless sensor networks, network design and software defined networks. Currently, he is also the general manager of the CEA-IoT.
ORCID: 0000-0002-4160-0841.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Fuzzy index for swine thermal comfort at nursery stage based on behavior

Letícia Cibele da Silva Ramos Freitas [a], Alessandro Torres Campos [b], Leonardo Schiassi [b], Tadayuki Yanagi-Junior [b] & Daiane Cecchin [c]

[a] *Departamento de Engenharia Agrícola, Universidad Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. leticiacibele@yahoo.com.br*
[b] *Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil. campos@deg.ufla.br, leonardo.schiassi@deg.ufla.br, yanagi@deg.ufla.br*
[c] *Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil. daianececchin@yahoo.com.br*

Received: April 01rd, 2016. Received in revised form: August 10th 2017. Accepted: October 9th, 2017.

Abstract
This work aims to develop and test a computational mathematical model, based on the *fuzzy* set theory, to predict the rate of thermal comfort by means of the swine behavior in relation to their age and to the black globe humidity index for two nursery types. Nursery 1 had brick stalls with fully slatted metal flooring, and nursery 2 had wooden stalls with fully slatted plastic flooring. Nursery style 2 presented a higher frequency of behavior in the condition comfort than nursery style 1, respectively 39,32% and 38,16%. The thermal comfort values for the *fuzzy* system were 3,58% for the standard deviation and 72,86% for the coefficient of determination. The developed *fuzzy* model has proven adequate in predicting thermal comfort by means of the animal's behavior.

Keywords: Thermal environment; fuzzy model; swine confinement facilities; frequency of behavior.

Índice fuzzy para confort térmico de cerdos en la fase de pre-ceba con base en su comportamiento

Resumen
Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar y evaluar un modelo matemático computacional, con base en la teoría de los conjuntos fuzzy, para predecir el confort térmico a partir del comportamiento de lechones, en función de su edad y del índice de temperatura de globo y humedad, en dos tipologías de instalación de preceba. La instalación 1 estaba compuesta por corrales de mampostería y piso de malla metálica, y la instalación 2 tenía corrales construidos con tablilla de madera y piso en malla plástica. La instalación 2 presentó una mayor frecuencia comportamental en la condición de confort que la instalación 1, con 39,32% y 38,16% respectivamente. Los valores da tasa de confort térmico estimados por el sistema fuzzy presentaron una desviación estándar media de 3,58% y coeficiente de determinación de 72,86%. El modelo fuzzy desarrollado mostró ser adecuado para la predicción de la tasa de confort térmico a partir del comportamiento de los animales.

Palabras-clave: Ambiente térmico; modelamiento fuzzy; instalaciones para cerdos; frecuencia comportamental.

1. Introduction

The intensive rearing environment influences the comfort and welfare conditions of animals, producing direct effects on its health status and productivity [1]. A way animals demonstrate comfort or discomfort regarding the environment in which they are raised is by their behavior [2], which is a tool utilized to indicate the animal welfare status [3].

The pigs in the nursery stage, particularly in post-weaning early ages have the lower thermal insulation of tissue and fur, suffering from the temperature changes of installation. As a consequence, there is a lower weight gain and feed conversion, affecting the productivity and the permanence time of the animals at this stage [4].

The first reaction of a pig to a temperature variation is a change in its behavior [5]. When in cold thermal conditions, they usually gather up over or near each other. In comfort

How to cite: Freitas, L.C.S.R., Campos, A.T., Schiassi, L., Yanagi Junior, T. and Cecchin, D., Fuzzy index for swine thermal comfort at nursery stage based on behavior DYNA, 84(203), pp. 201-207, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

conditions, when lying, they nearly touch one another, while in heat conditions pigs lie around scattered [6,2]. According to [7] and [8], under thermal stress conditions, pigs show a reduced frequency of feeding, standing, walking, and nuzzling behaviors.

Understanding the animal behavior and their small variations due to environmental thermal changes is necessary in order to develop models that simulate welfare from responses of the animal to the environment [9].

In this regard, mathematical techniques and sensors allow the processing of diversified information about the production process, adding precision to animal production-related actions [10]. The fuzzy sets theory is a mathematical technique that has been adopted to predict situations such as the environmental comfort of facilities [11,12], physiological parameters [13-15], and occupation rate [16].

The Fuzzy Set theory was introduced by Lotfi Asker Zadeh in 1965 as a mathematical theory that generalizes the classical theory of sets. A fuzzy set is defined mathematically by assigning a value, which reflects the degree of the pertinence of the individual to the set. This degree of pertinence varies in the range of 0 to 1 and represents the similarity of this individual the characteristics that give identity to the set [17].

The fuzzy mathematics is a highly flexible structure that allows the integration of different types of information to formulate conclusions. The theory addresses uncertainties through the semantic or linguistic reasoning, providing an analysis of rules or assumptions that can be altered or updated according to the knowledge of the subject matter [18].

Given this scenario, the present study aimed to develop and test a computational mathematical model, based on the fuzzy set theory, to predict thermal comfort by analyzing the behavior of piglets according to age and two thermal variables in two nursery types.

2. Material and methods

2.1. Description of facilities

This study was carried out in two swine nursery facilities of Niterói Farm, located in Lavras-MG, Brazil (21º 14' S latitude and 45º 00' W longitude; 918 m altitude), from August 22 to September 25, 2014. According to the Köppen classification, the climate of the region is a subtropical rainy temperate (mesothermal) Cwa type with dry winters and rainy summers, with an average annual temperature of 20.4 ºC [19].

The farm had a full-cycle swine production system, i.e., animals were confined from birth to slaughter.

Nursing facilities were intended for the production of commercial hybrid swine for 35 days. Animals entered the nurseries at 21 days of age and left them at 56 days of age.

The diet was prepared on the farm according to the nutritional requirements and specific intake of the animals in this production stage, provided in a feeder with automatic distribution. Water was supplied by automatic nipple drinkers with no restrictions to consumption.

Nurseries were oriented in the east-west direction and had the same external structure, with 2.40 m-high metal columns, gable roofing with 30% slope, fibrocement tiles with 6 mm thickness supported by a metal structure without a louver and 0.45 m eaves. The sides were fully covered with yellow canvases with adjustable height.



a) b)

Figure 1. Internal structure of Nursery 1 (a) and Nursery 2 (b)
Source: The authors.

Nurseries had different internal structures. Nursery 1 measured 31.02 × 10.38 m (length × width) and had a 0.90 m-long central corridor with 1.94 × 4.00 m-sided stalls. Suspended 0.50 m above the ground, stalls were made of masonry, with 0.68 m in height, equipped with a 0.32 m-high protective metal grid above the masonry wall and around the stall. Flooring was a metal slatted type, with a 1.00 × 1.50 m central concrete part where the automatic feeder was located. The nipple drinker was located on the left side of the stall. The heating system was provided by 250 W infrared bulbs fixed 0.40 m from the concentrate, at a height of 0.55 m. Nursery 1 was closed at every three stalls up to the roof by translucent corrugated sheets (Fig. 1a) and its housing capacity was 720 animals, with 24 piglets per stall (two litters).

Nursery 2 measured 23.61 × 10.10 m (length × width) and had a 0.90 m-long central corridor with twelve 1.94 × 4.00 m-sided stalls. Stalls were closed with wood laths with 0.80 m in height and slatted polyethylene floor at the level of the central corridor. Below the floor level was a 1.50 m deep ditch for waste. The feeder, the drinker, and the heating system were positioned as in nursery 1. At every three stalls, Nursery 2 was closed by concrete slabs at the same height as the stall (Fig. 1b), and its housing capacity was 576 animals, with 24 piglets per stall (two litters).

2.2. Behavior

To evaluate the behavior of the animals, one sample of six piglets from each nursery was observed in the stalls intended for the experiment. Observations were conducted during 10 non-consecutive days, from 07h00 to 17h00, every 10 min.

The quantified behaviors were based on the ethogram proposed by [20] and [2], as follows: lying (L) - when the animal lay alone, gathering (G) - when the animal lay together with the others, wallowing (W), eating (E), sitting (S), standing/walking (SW), and showing agonistic behavior (AB). Data referring to behavioral variables were analyzed non-parametrically.

To evaluate the comfort condition of the animals, the frequencies of the behaviors named nuzzling (N), eating (E), sitting (S), and standing/walking (SW) were added together, as they represent some of the natural behaviors of these animals [21].

2.3. Environmental parameters

In the nurseries, there was a divider at every set of three stalls, forming a microenvironment between them. To better represent it, thermal comfort, air quality, and sound pressure level data were collected from the central stall of the set. Air temperature, air relative humidity, and black globe temperature were collected automatically using dataloggers (Hobo, U12-013) with an accuracy of ± 0.5 °C, at 10-min intervals, for 24 h, for the 35 days during which the piglets remained in the nurseries.

Sensors were coupled to the dataloggers and placed in the globe for its temperature collection. To prevent interferences from the heat emitted by the heating system in the measurements, the datalogger was installed at a height of 0.80 m and 0.70 m apart from the heating system. For the same reason, the black globe was installed at a height of 0.55 m and placed 0.50 m from the heating system. In the nurseries' external environment, the datalogger and the globe were also installed at the same height as those inside the stalls.

The black globe humidity index (BGHI) was calculated based on the thermal environment data using Eq. 1 below, developed by [22]:

$$BGHI = BGt + 0.36\,DPt - 41.5 \quad (1)$$

Where BGt is the black globe temperature (°C) and DPt is the dew point temperature (°C).

2.4. Fuzzy model

Data pertaining to environment and frequency of behavior in thermal comfort condition were used in the development of a fuzzy mathematical model, in which the age of the animals (days) and the black globe humidity index (BGHI) were used as input variables, as they directly influence the animals' behavioral response. Based on the input variables and using the experimental data collected during field analyses as reference, the fuzzy model predicts the output variable Thermal comfort index of the animals based on their behavior.

Based on the data collected from the field experiment for the two nurseries evaluated, 115 datasets (100%) were selected, in which the characteristic thermal comfort behavior had a direct influence of age and thermal environment conditions. Of this total, 43% (50 datasets) were used in the development of the membership and rule functions and 57% (65 datasets) were used to test the developed model.

The analysis was performed using Mamdani's fuzzy inference method, whose response is a fuzzy set originating from the combination of input values and their respective degrees of membership, by the minimum operator, and then by overlapping the rules by the maximum operator [15].

The input variable Age was adjusted as a function of the period of life of the animals during the experiment (26; 56); this interval was divided into five membership functions (Table 1).

Table 1.
Fuzzy sets for the input variables.

Variable	Fuzzy sets
Age	Age 1 [26.0; 33.5]
	Age 2 [26.0; 41.0]
	Age 3 [33.5; 48.5]
	Age 4 [41.0; 56.0]
	Age 5 [48.5; 56.0]
BGHI	Level 1 [60; 62]
	Level 2 [60; 66]
	Level 3 [62; 70]
	Level 4 [66; 74]
	Level 5 [70; 78]
	Level 6 [74; 82]
	Level 7 [78; 84]
	Level 8 [82; 84]

Source: The authors.

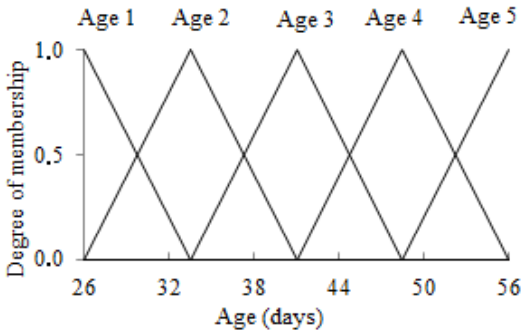


Figure 2. Membership curve for the input variable Age.
Source: The authors.

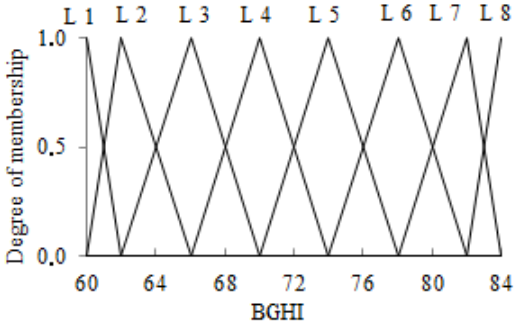


Figure 3. Membership curves for the input variable BGHI.
Source: The authors.

For the BGHI variable, the interval was determined based on the observed thermal data (60; 84), divided into eight levels (L) corresponding to the pertinence functions (Table 1).

The domains in the intervals of the input variables Age and BGHI are presented in Fig. 2 and Fig. 3. The triangular pertinence curve model was adopted, as it fits better the input variables' data.

For the output variable, Thermal comfort index (%), the behavior data were clustered according to characteristic behavioral patterns related to thermal comfort: eat, wallow, sit, and standing/walk. These behavioral traits were quantified in frequencies, and their values determined the intervals for the eight pertinence functions represented by Degree (D) according to Table 2.

Table 2.
Interval of fuzzy sets for the output variable Thermal comfort index (%).

Fuzzy sets	Interval
Degree 1	[0; 14]
Degree 2	[0; 29]
Degree 3	[14; 43]
Degree 4	[29; 57]
Degree 5	[43; 71]
Degree 6	[57; 86]
Degree 7	[71; 100]
Degree 8	[86; 100]

Source: The authors.

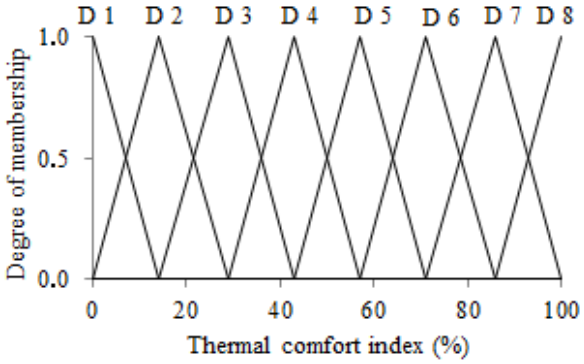


Figure 4. Membership curve for the output variable Thermal comfort index (%).
Source: The authors.

Table 3.
Composition of the rules system as a function of the input variables Age and BGHI

Age \ BGHI	L 1	L 2	L3	L 4	L 5	L 6	L 7	L 8
Age 1	D 4	D 5	D 5	D 3	D 1	D 2	D 4	D 3
Age 2	D 2	D 2	D 4	D 5	D 5	D 2	D 2	D 1
Age 3	D 7	D 7	D 6	D 2	D 3	D 3	D 3	D 2
Age 4	D 1	D 2	D 4	D 2	D 3	D 3	D 3	D 3
Age 5	D 2	D 3	D 4	D 3	D 3	D 4	D 3	D 2

Source: The authors.

After a preliminary adjustment test, the triangular model was used for the pertinence functions of the output variable, according to Fig. 4.

The fuzzy rules system was created based on the set of data obtained experimentally, on information from the literature, and with the aid of experts, in the form of linguistic sentences.

Three experts were selected according to the fuzzy expert selection methodology proposed by [23] and utilized by several authors [24-26]. These experts have experience in ambience and animal behavior, and all have more than 10 years of work in the respective areas, characterizing their mastery of the subject matter. This characteristic is desirable from an expert [27], given their direct influence in the reliability and quality of results [28-29].

According to the combinations of the input data, 40 rules were defined, as described in Table 3. For each rule, the weighting factor of 1 was assigned.

The weighting factor of 1, usually adopted as default, was chosen because it showed to be appropriate for the proposed model based on the response of the results obtained with the simulations. Moreover, this value has been adopted in several fuzzy models reported in the literature [30-33].

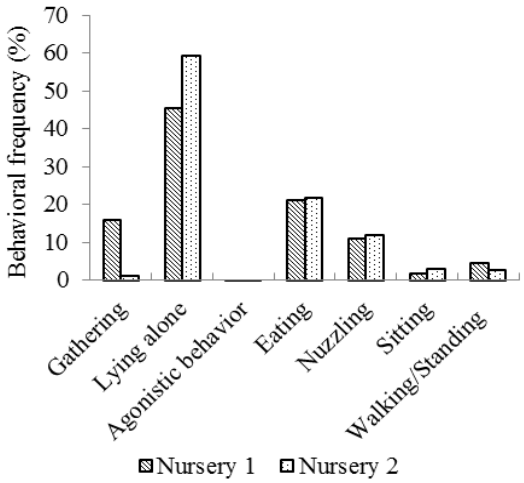


Figure 5. Behavioral frequency (%) of the animals in Nursery 1 and Nursery 2.
Source: The authors.

Based on the rules system will be performed fuzzy inference (example: *SE* Age is Age 2 *AND* BGHI is L3 *THEN* thermal comfort Index is Degree 4). Immediately after the inference, the defuzzification process is performed where the output linguistic variable is converted into a numerical value [34].

3. Results and discussion

The behavioral frequencies of the piglets observed in Nurseries 1 and 2 are shown in Fig. 5. The frequencies of the gathering, lying alone, agonistic behavior, eating, nuzzling, sitting and walking/standing behaviors between the two nurseries were close. The gathering behavior was more frequent in Nursery 1, while lying was more common in Nursery 2.

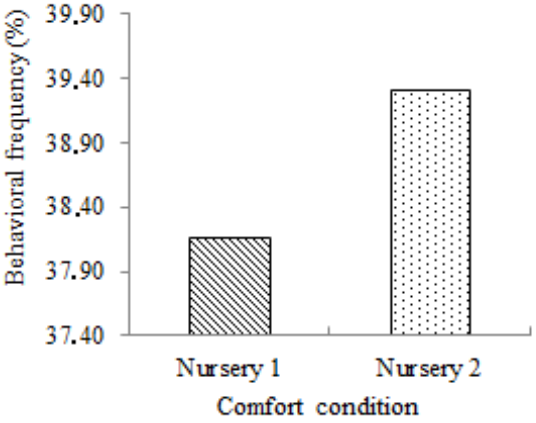


Figure 6. Behavioral frequency (%) in comfort condition in Nursery 1 and Nursery 2.
Source: The authors.

Table 4.
Comparison between thermal comfort indices (%) observed and simulated by the fuzzy model.

Age (days)	BGHI	Thermal comfort index (%)			Age (days)	BGHI	Thermal comfort index (%)		
		Measured	Fuzzy	Std. deviation			Measured	Fuzzy	Std. deviation
26	60	36.11	43.00	30.41	42	76	33.33	28.62	20.23
26	67	52.78	47.74	33.76	47	69	44.44	33.34	23.57
26	71	30.56	24.33	17.21	47	75	27.78	28.65	20.26
26	74	2.78	4.33	3.06	47	78	25.00	28.65	20.26
26	62	55.56	57.00	40.31	47	80	27.78	28.62	20.23
26	75	11.11	9.87	6.98	47	81	27.78	28.65	20.26
26	79	25.00	23.24	16.43	47	82	38.89	28.65	20.26
28	75	22.22	27.76	19.63	49	72	16.67	21.50	15.20
28	78	25.00	14.35	10.15	49	75	38.89	29.99	21.21
28	71	41.67	33.44	23.65	49	81	30.56	29.99	21.21
28	77	25.00	26.90	19.02	49	82	30.56	28.67	20.27
28	81	36.11	33.29	23.54	49	83	36.11	26.95	19.05
33	63	20.00	25.06	17.72	49	73	36.11	24.56	17.37
33	77	38.89	27.49	19.44	49	74	19.44	28.67	20.27
33	78	16.67	14.33	10.14	49	79	19.44	29.99	21.21
33	80	13.89	18.45	13.05	49	78	33.33	29.93	21.16
33	70	58.33	53.63	37.92	54	67	44.44	33.43	23.64
33	81	25.00	17.70	12.52	54	70	22.22	24.34	17.21
35	67	47.22	43.81	30.98	54	73	19.44	24.53	17.35
35	74	47.22	49.04	34.68	54	79	44.44	38.42	27.17
35	71	50.00	43.52	30.77	54	75	33.33	32.68	23.11
35	70	41.67	45.10	31.89	54	66	44.44	43.00	30.41
35	75	36.11	42.05	29.74	54	68	25.00	30.98	21.91
35	72	50.00	41.62	29.43	54	71	36.11	24.34	17.21
40	77	36.11	31.81	22.49	54	74	22.22	28.65	20.26
40	75	33.33	31.81	22.49	54	77	36.11	38.42	27.17
40	74	41.67	34.22	24.20	54	78	38.89	38.42	27.17
40	78	33.33	26.26	18.57	56	72	38.89	28.62	20.23
40	73	33.33	30.04	21.24	56	80	38.89	35.62	25.19
42	72	19.44	21.50	15.20	56	74	30.56	28.67	20.27
42	79	36.11	28.65	20.26	56	81	27.78	32.66	23.09
42	80	36.11	28.62	20.23	56	78	44.44	43.00	30.41
42	73	27.78	24.56	17.37					

Mean = 3.58

Source: The authors.

The comfort condition observed through the eating, nuzzling, sitting, and standing/walking behaviors are illustrated in Fig. 6. Nursery 2 showed a higher percentage of behavioral frequency in the comfort condition than Nursery 1: 39.32% and 38.16%, respectively. These percentage values show that less than 50% of the time during which animals remain in the nursery is comfort conditions.

The thermal comfort index obtained by the fuzzy model, as well as the values observed experimentally and the standard deviation, are displayed in Table 4.

The standard deviation is a measure of the variability or dispersion of the data, and as the deviation increases, so will be the dispersion of the data.

The average standard deviation of the fuzzy model in relation to the values observed experimentally was 3.58%. The highest standard deviation observed was 8.32%, and the lowest was 0.33%.

To measure the quality of the model as regards its ability to correctly estimate the values of the response variable, we calculated the coefficient of determination (R^2, %), as shown in Fig. 7. The R^2 obtained indicated that 72.86% of the variation can be explained by the model.

The fact that the animals from Nurseries 1 and 2 remained most of their time lying without touching each other may be related to the thermal discomfort in the facility, as reported by [6] and [2]. Another aspect to be considered is the frequency of the natural behavior of the animals − eat, wallow, sit and standing/walk −; according to [8], a reduction of these behaviors may be related to discomfort of the animal due to thermal stress.

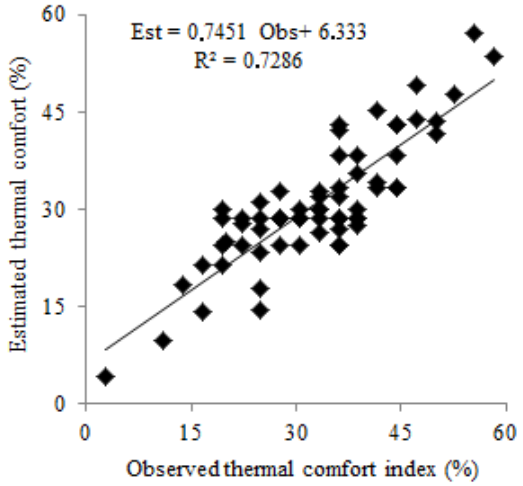


Figure 7. Behavioral frequency (%) for the thermal comfort index.
Source: The authors.

Studies on the occupation rate in dairy cattle facilities conducted by [16] have shown an average standard deviation of 3.93% and a determination coefficient of 75.45%, demonstrating the efficiency of the model developed for the simulated data.

Estimating the weight of Japanese quail eggs, [35] obtained a coefficient of determination of 66.80%. According to these authors, the developed fuzzy model provides a realistic estimate of egg weight.

The fuzzy model for predicting feed intake, weight gain, and feed conversion of broilers developed by [15] found the respective standard deviations: 4.31 g, 4.76 g, and 0.02 g g-1, as well as the following coefficients of determination: 99.8, 99.5, and 97.6%, showing to be adequate for the prediction of the analyzed variables.

The coefficient of determination found in the present study was higher than that found by [35], lower than those obtained by [14], and close to those observed by [16].

Based on the exposed literature and the coefficient of determination found here (72.86%), the developed model satisfactorily estimates the response-variable values and can thus be used to determine thermal comfort in swine nursery facilities.

4. Conclusions

The swine behavior can be used to characterize the thermal comfort condition of facilities.

Based on the behavioral analysis, piglets from both nurseries remained less than 50% of their confinement period under comfort conditions, and Nursery 2 was more comfortable than Nursery 1.

The fuzzy model developed as a function of piglet age and BGHI showed to be suitable for predicting the thermal comfort index based on the animal behavior, displaying low standard deviations and high correlation with the data measured during the field experiment. Therefore, it can be used as an instrument in decision-making regarding alterations in the thermal environment, preventing losses and providing better production rates.

Therefore, new studies aiming at the characterization of the comfort condition, by means of rapid responses of the animal to the thermal stress suffered, being this one, of clear and objective interpretation to the man, is of paramount importance for the animal production that seeks, every day more the adoption of welfare practices.

Acknowledgments

The authors expressed their gratitude to the *Niterói* Farm for the partnership and to *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq) and FAPEMIG for the fellowship grant and financial support.

References

[1] Pandorfi, H., Silva, I.J.O., Guiselini, C. and Piedade S.M.S., Uso da lógica fuzzy na caracterização do ambiente produtivo para matrizes gestantes, Engenharia Agrícola, 27(1), pp. 83-92, 2007. DOI: 10.1590/S0100-69162007000100001

[2] Sabino, L.A., Sousa Júnior, V.R., Abreu, P.G., Abreu, V.M.N., Lopes, L.S. and Coldebella, A., Comportamento suíno influenciado por dois modelos de maternidade, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 15(12), pp. 1321-1327, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011001200015

[3] Penha, N.L., Oliveira, S.C. and Pereira D.F., Análise de correlação entre comportamentos de matrizes pesadas e variáveis ambientais, Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas, 1(3), pp. 209-217, 2007. DOI: 10.18011/bioeng2007v1n3p209-217

[4] Ferreira, R.A., Maior produção com melhor ambiente: Para aves, suínos e bovinos. 3. ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2015.

[5] Huynh, T.T.T., Aarnink, A.J.A., Gerrits, W.J.J., Heetkamp, M.J.H., Canh, T.T., Spoolder, H.A.M., Kemp, B. and Verstegen, M.W.A., Thermal behaviour of growing pigs in response to high temperature and humidity, Applied animal behaviour science, 91(1), pp. 1-16, 2005. DOI: 10.1016/j.applanim.2004.10.020

[6] Xin H., Assessing swine thermal comfort by image analysis of postural behaviors, Journal of Animal Science, 77(supl.2), pp. 1-9, 1999. DOI: 1999.77suppl_21x

[7] Paiano, D., Barbosa, O.R., Moreira, I., Quadros, A.R.B., Silva, M.A.A. and Oliveira, C.A.L., Comportamento de suínos alojados em baias de piso parcialmente ripado ou com lâmina d'água, Acta Scientiarum. Animal Sciences, 29(3), pp. 345-351, 2007. DOI: 10.4025/actascianimsci.v29i3.575

[8] Kiefer, C., Moura, M.S., Silva, E.A., Santos, A.P., Silva, C.M., Luz, M.F. and Nantes, C.L., Respostas de suínos em terminação mantidos em diferentes ambientes térmicos, Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, 11(2), pp. 496-504, 2010. [date of reference June 12th of 2015]. Available at: http://revistas.ufba.br/index.php/rbspa/article/view/1649/985

[9] Pereira, D.F., Bighi, C.A., Gabriel, L.R.A., and Gabriel, C.P., Sistema fuzzy para estimativa do bem-estar de matrizes pesadas, Engenharia Agrícola, 28(4), pp.624-633, 2008. DOI: 10.1590/S0100-69162008000400002

[10] Nääs, I.A., Uso de técnicas de precisão na produção animal, Revista Brasileira de Zootecnia, [on line]. 40(Supl. Especial), pp. 358-364, 2011. [date of reference August 27th of 2015]. Available at: http://www.sbz.org.br/revista/artigos/66291.pdf

[11] Tolon, Y.B., Baracho, M.S., Nääs, I.A., Rojas, M. and Moura, D.J., Ambiência térmica aérea e acústica para reprodutores suínos, Engenharia Agrícola, 30(1), pp. 1-13, 2010. DOI: 10.1590/S0100-69162010000100001

[12] Ponciano, P.F., Lopes, M.A., Yanagi Junior, T. and Ferraz, G.A.S., Análise do ambiente para frangos por meio da lógica fuzzy: uma revisão, Archivos de Zootecnia, [online]. 60(R), pp.1-13, 2011. [date of reference may 05th of 2015]. Available at: http://www.uco.es/organiza/servicios/publica/az/php/img/web/10_13_41_1783REVISIONAnalisePonciano.pdf

[13] Ferreira, L., Yanagi Junior, T., Lopes, A.Z., et al., Desenvolvimento de uma rede neuro-fuzzy para predição da temperatura retal de frangos de corte, Revista de Informática Teórica e Aplicada, 17(2), pp. 221-23, 2010.

[14] Nascimento, G.R., Pereira, D.F., Näas, I.A. and Rodrigues, L.H., Índice fuzzy de conforto térmico para frangos de corte, Engenharia Agrícola, 31(2), pp. 219-229, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000200002

[15] Ponciano, P.F., Yanagi Junior, T., Schiassi, L., Campos, A.T. and Nascimento, J.D., Sistema fuzzy para predição do desempenho produtivo de frangos de corte de 1 a 21 dias de idade, Engenharia Agrícola, 32(3), pp. 446-458, 2012. DOI: 10.1590/S0100-69162012000300004

[16] Campos, A.T., Castro, J.O., Schiassi, L., Yanagi Junior, T., Pires, M.F.Á. and Mattioli, C.C., Prediction of free-stall occupancy rate in dairycattle barns through fuzzy sets, Engenharia Agrícola, 33(6), pp.1079-1089, 2013. DOI: 10.1590/S0100-69162013000600001

[17] Zimmermann, H.J. Fuzzy set theory and its applications: 3.ed. Boston: Kluwer, 1996

[18] Ferraro, D.O., Ghersa, C.M. and Sznaider, G.A., Evaluation of environmental impact indicators using fuzzy logic to assess the mixed cropping systems of the Inland Pampa, Argentina, Agriculture, Ecosystems & Environment, 96(1), pp. 1-18, 2003. DOI: 10.1016/S0167-8809(03)00017-3

[19] Dantas, A.A.A., Carvalho, L.G. and Ferreira, E., Classificação e

tendências climáticas em Lavras, MG, Ciência e Agrotecnologia, 31(6), pp. 1862-1866, 2007. DOI: 10.1590/S1413-70542007000600039

[20] Campos, J.A., Tinôco, I.F.F., Silva, F.F., Pupa, J.M.R. and Silva, I.J.O., Enriquecimento ambiental para leitões na fase de creche advindos de desmame aos 21 e 28 dias, Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 5(2) pp. 272-278, 2010. DOI: 10.5039/agraria.v5i2a660

[21] Hötzel, M.J., Nogueira, S.S.C. and Machado Filho, L,C,P., Bem-estar de animais de produção: das necessidades animais às possibilidades humanas, Revista de Etologia. [online]. 9(2), pp. 1-10, 2010. [date of reference may 05th of 2015]. Available at: http://www.etologiabrasil.org.br/sbet/revista/Vol_9_2_001.pdf

[22] Buffington, D.E., Collazo-Arocho, A., Canton, G.H., Pitt, D., Thatcher, W.W. and Collier, R. J., Black globe humidity index as a comfort equation for dairy cows, American Society of Agricultural Engineers, 24(3), pp. 711-714, 1981. DOI: 10.13031/2013.34325

[23] Cornelissen, A.M.G., Van den Berg, J., Koops, W.J. and Kaymak, U., Eliciting expert knowledge for fuzzy evaluation of agricultural production systems. Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management, [online]. 2002. [date of reference August 23th of 2015]. Available at: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=371055

[24] Escobar, C. and Galindo J., Fuzzy control in agriculture: Simulation software, Industrial Simulation Conference (ISC), Malaga, Spain, 2004. pp. 45-49.

[25] Yanagi Junior, T., Schiassi, L., Abreu, L.H.P., Barbosa, J.A. and Campos, A.T., Procedimento fuzzy aplicado à avaliação da insalubridade em atividades agrícolas, Engenharia Agrícola, 32(3), pp. 423-434, 2012. DOI: 10.1590/S0100-69162012000300002

[26] Schiassi, L., Yanagi Junior, T., Reis, G. M., Abreu, L. H, P., Campos, A.T., Castro, J.O., Modelagem Fuzzy aplicada na avaliação do desempenho de frangos de corte. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 19(2), pp. 140- 146, 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p140-146

[27] Ayyub B.M. and Klir G.J., Uncertainty modeling and analysis in engineering and the sciences. 1ª edição. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2006.

[28] Martino J.P., Technological forecasting for decision making. 3ª edição. New York: McGraw-Hill, Inc., 1983.

[29] Preble, J.F., The selection of Delphi panels for strategic planning purposes, Strategic Management Journal, 5(2), pp. 157-170, 1984. DOI: 10.1002/smj.4250050206

[30] Witt, S.F., and Moutinho L., Tourism marketing and management handbook. – in: Taylor J. Delphi method applied to tourism, 1ª edição. London: Prentice Hall, 1989, pp.95-99.

[31] Ferreira, L., Yanagi Junior, T., Nääs, I.A. and Lopes, M.A., Development of algorithm using fuzzy logic to predict estrus in dairy cows: Part I, Agricultural Engineering International: The CIGR E Journal, [online]. 9, pp.1-16, 2007. [date of reference January 26th of 2015]. Available at: http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/view/898/892

[32] Cremasco, C.P., Gabriel Filho, L.R.A. and Cataneo, A., Metodologia de determinação de funções de pertinência de controladores fuzzy para a avaliação energética de empresas de avicultura de postura, Revista Energia na Agricultura, 25(1), pp. 21-39, 2010. DOI: 10.17224/EnergAgric.2010v25n1p21-39)

[33] Schiassi, L, Melo, N.S.M., Tavares, G.F., Souza, Í.P., Araújo, H.B. and Della-Giustina, C., Modelagem fuzzy em parâmetros de bem-estar humano, Revista Nativa, 1(1), pp. 8-12, 2013. DOI: 10.14583/2318-7670.v01n01a02

[34] Kaur, R. and Rehani, V., Recognition and cure time prediction of swine flu, dengue and chicken pox using fuzzy logic. International Research Journal of Engineering and Technology, 3(6), pp. 1058-1062, 2016.

[35] Castro, J.O., Veloso, A.V., Yanagi Junior, T., Fassani, E.J., Schiassi, L. and Campos, A.T., Estimate of the weight of japanese quail eggs through fuzzy sets theory, Ciência e Agrotecnologia, 36(1), pp. 108-116, 2012. DOI: 10.1590/S1413-70542012000100014

L.C.S.R. Freitas, is BSc in Agricultural and Environmental Engineering from the Federal University of Viçosa-UFV, Brazil in 2010. MSc. in Agricultural Engineering, researching Rural Buildings, Ambience, and Waste Treatment at the Federal University of Lavras-UFLA, Brazil in 2015. She worked for the Mizote Group, a Brazilian agricultural company, as coordinator of the stockroom and administrative processes from 2010 to 2012. Currently a doctoral student in agricultural engineering, line research, ambience, engineering, and architecture of agricultural systems and agribusiness in animal and plant production at the Federal University of Viçosa, UFV and researcher at the Center for Research in Ambience and Systems Engineering Agroindustrial -AMBIAGRO / UFV, Brazil.
ORCID: 0000-0002-9607-4092

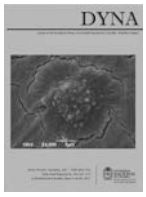
A.T. Campos, is BSc. in Agricultural Engineer from the Federal University of Lavras – UFLA, Brazil (1995), MSc in Agricultural Engineering from the Federal University of Viçosa – UFV, Brazil (1997) and PhD in Energy in Agriculture from the Universidade Estadual Paulista – UNESP, Brazil (2001). He is currently associate professor in the Engineering Department of the Federal University of Lavras, Brazil, has productivity scholarship in research from CNPq and scholarship from FAPEMIG (Pesquisador Mineiro). He is the coordinator of the Graduate Program in Agricultural Engineering UFLA. Leader of the research Group in Buildings and Environment in Biosystems (COAMBI). He has experience in Agricultural Engineering with emphasis on rural buildings and environment, acting on the following subjects: rural buildings, environment, thermal comfort, air quality, treatment and reuse of animal wastes, digesters and biosystems sustainability.
ORCID: 0000-0002-4653-9453

T. Yanagi-Junior, is PhD in Agricultural Engineering (2002), with a specialization in Rural and Ambience Constructions, the Federal University of Viçosa, Brazil with sandwich training at the Iowa State University of Science and Technology, where he served as a visiting researcher. PQ2-CNPq researcher since 2009. He served as a Department Secretary (1996-1998 / 2004-2008), administrative assistant to the DEG / UFLA (2004 and 2008), and coordinator of the Graduate Program in Systems Engineering (2008-2012). He currently serves as associate professor III at the Department of Engineering at the Federal University of Lavras (UFLA) and Deputy Dean of Graduate sense and participates in graduate programs in Agricultural Engineering and UFLA Systems Engineering. He has experience in Agricultural Engineering and systems, especially in the area of buildings and ambience in which it operates, guiding undergraduate students and graduate students in the development of research involving the evaluation and mathematical modeling of biosystems. ORCID: 0000-0001-9653-205X

L. Schiassi, is BSc. in Agricultural Engineering from the Federal University of Lavras, Brazil (2009). MSc. in Systems Engineering (concentration area: Modeling of Biological Systems) at the Federal University of Lavras (2011). PhD in Rural and Ambience Constructions by the Federal University of Lavras, Brazil (2013). He acts as an effective teacher in the Engineering Department of the Federal University of Lavras (UFLA). Researcher in COAMBI - Research Group Construction and Ambience in Biosistemas - DEG / UFLA. Has experience in the area of agricultural engineering, with emphasis on rural construction engineering, working mainly in construction and ambience, building materials, bioclimatology, noise, animal welfare, and human evaluation and building systems modeling and ambience, analysis of fuzzy systems, artificial neural networks, and the accuracy of Animal Science. ORCID: 0000-0002-4181-0611

D. Cecchin, is teacher in Federal University of Fluminense (UFF), Brazil. PhD in Agricultural Engineering line of research Rural Buildings, Ambience and Waste Treatment - Federal University of Lavras – UFLA, Brazil. Acting on the following topics: animal behavior, facilities, animal ambience, treatment and recycling of waste. Member of the Research Group in construction and ambience in Biosystems - COAMBI. Member developer for the ICAAM (Institute of Agricultural and Environmental Sciences Mediterranean) Unit for Research and Development (R & D) of the University of Évora - Portugal.
ORCID:0000-0002-6098-184

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Changes in liquid phase and mechanical properties during osmodehydrofreezing of papaya (*carica papaya L.*)

Alfredo Adolfo Ayala-Aponte & Martha Isabel Sánchez-Tamayo

Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. alfredo.ayala@correounivalle.edu.co, martha.isabel.sanchez@correounivalle.edu.co

Received: October 13th, de 2016. Received in revised form: August 15th, 2017. Accepted: October 5th, 2017

Abstract
The aim of this study was to evaluate the influence of osmotic treatments on the freezing rate, drip loss (DL), elastic modulus (EM) and stress of yield limit (σ_L) of papaya (*Carica papaya* L.) samples stored under freezing conditions. Dehydration was performed using an osmotic sucrose solution with 55 and 45 ºBrix for 30 and 90 min. Osmotically dehydrated papaya samples were frozen at -40°C and stored for 10, 20, 30 and 60 days. Fresh fruit was used as a control sample during freezing storage. The results showed the treated samples exhibited lower drip loss with respect to control samples. It was observed that elastic modulus in treated samples showed higher values compared to control samples. Conversely, σ_L had achieved a decreasing for all treatments during freezing storage and treated samples exhibited higher σ_L values with respect to control samples.

Keywords: Osmotic treatment; freezing; tropical fruits; osmotic solution

Cambios en fase líquida y propiedades mecánicas de papaya (*carica papaya L.*) osmodeshidratada durante la congelacion

Resumen
El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de tratamientos osmóticos sobre la velocidad de congelación, pérdida de fase líquida (PFL), módulo elástico (ME) y esfuerzo del límite de fluencia (σ_L) en muestras de papaya (*Carica papaya* L.) almacenadas en congelación. La deshidratación se realizó con soluciones osmóticas de sacarosa de 45 y 55°Brix durante 30 y 90 min. Las muestras osmo-deshidratadas fueron congeladas a -40°C y almacenadas durante 10, 20, 30 y 60 días. Fruta fresca fue empleada como muestra control (No tratada). Los resultados mostraron que las muestras tratadas presentaron menores pérdidas de fase líquida respecto a las muestras control. El módulo elástico en las muestras tratadas presentó mayores valores en comparación con las muestras control. El esfuerzo del límite de fluencia disminuyó para todos los tratamientos durante el almacenamiento y las muestras tratadas mostraron valores superiores de σ_L respecto a las muestras no tratadas.

Palabras clave: Tratamiento osmótico; congelación; frutas tropicales; solución osmótica.

1. Introduction

Papaya (*Carica papaya* L.) is cropped mainly in tropical and subtropical countries, and is very desirable for its pleasant taste and aroma [1]. It is a source of high nutrient content (vitamin A and C) and minerals such as calcium, magnesium and potassium [2]. Papaya fruits are also transformed into various value-added products as follows: purees, juices, jams, jellies, candy, syrup, among others [3,4]. From a biological point of view, papaya is subjected to high post-harvest losses due to rapid senescence which shortens its shelf life [2]. Due to its high perishability, papaya losses during transportation and storage are estimated at least 25% [3]. To minimize these losses, it is necessary to find alternative methods to extend the shelf life while maintaining its quality properties close to those of fresh fruit. Freezing is an alternative in food preservation, to maintain color, flavor and nutritional characteristics[5,6]. However, after freezing-thawing, food present some drastic changes in quality, mainly shows in drip loss (which is due to cell damage) [7,8]

How to cite: Ayala-Aponte, A. A. and Sánchez-Tamayo, M. I, Changes in liquid phase and mechanical properties during osmodehydrofreezing of papaya (carica papaya l.) DYNA, 84(203), pp. 208-213, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

and abrupt changes in mechanical properties associated with texture changes (loss of turgor during thawing, resulting in flaccidity and shrinking) [9], among other properties. Irreversible damages occurred during freezing, are caused because a portion of the aqueous fraction freezes forming large ice crystals that destroy the cellular structure of fresh fruits and vegetables [10], therefore cell membranes lose their osmotic state and semi permeability [11].

An alternative technique to reduce quality losses during freezing of fruits and vegetables is partially remove freezable water of the food in order to reduce the water content and limit ice crystal damage in foods [12]; In this sense, the osmodehydrofreezing technique is used as a complement to freezing, which consisting an osmotic dehydration(OD) application for the product followed by the freezing process [11]. OD can partially reduce a freezable water quantity of the product, which consists on the extraction of water from a food product that is immersed in a hypertonic osmotic solution (OS) for a specific time and temperature [13]. The OS must be highly concentrated in osmotic solutes and close to room temperature [8]. According to previous studies, osmodehydrofreezing has been used in various fruits and vegetables with positive results, reducing quality losses once defrosted the product, as in melon [14] apples [8], eggplant [6], kiwis and pears [8]. In papaya, no research evidence is available in the scientific literature where OD and freezing are combined, except the work of Ayala et al. 2014 [15], on that research a concentration of sucrose (65 ° Brix) was used different to those of this work.

The aim of this research was to evaluate the influence of osmotic treatments application on freezing rate, drip loss and changes in mechanical properties in terms of elastic modulus (EM) and the stress of yield limit (σL) in papaya samples under freezing storage for 10, 20, 30 and 60 days.

2. Materials and methods

2.1. Sample preparation

Papaya (variety cultivar Maradol) were selected with an uniform soluble solids content (11.30 ± 0.33°Brix).These were prime-quality samples, following Technical Standard NTC 1270 [16]. The fruits were washed, peeled (using a stainless steel knife), and cut into halves to remove seeds from the center of each fruit piece, samples of cut fruit were 20 mm height and 15 mm diameter cylinders using a stainless steel cylindrical hollow punch.

2.2. Osmotic treatments

Osmotic treatments were carried out in sucrose solution of 45 and 55°Brix. Sucrose was used as solute due to its wide use in the dehydration fruit processing [17]. Concentration levels were selected according to previous research on osmotic dehydration in papaya fruits [18,19]. The weight ratio of osmotic solution for papaya was 20:1 to maintain a constant concentration of the osmotic solution during OD [15,20]. The OS was kept at 26.3±0.3°C and constantly stirred at 800 rpm using a mechanical stirrer (Kika Labor Technik Pol Col, USA) to avoid the crusting phenomenon resulting from the presence of sugar on the samples surface.

To partially reduce the freezable water of fruits, papaya samples were removed in two-time periods of OD (30 and 90 min) in both OS to 44 and 55°Brix to get different moisture contents. The moisture content (MC) of treated and non-treated samples was determined by using the method 934.06 of AOAC (1990) and soluble solids were analyzed measuring the refractive index with a refractometer (Abbe Atago, Zeiss, USA), at 20 ° C.

2.3. Freezing-thawing storage

Non-treated samples (NTS) and osmotically treated samples (OTS) were stored at 8°C in resalable plastic bags before freezing for 12 h, to promote an internal equilibration of concentration [7]. Afterwards, they were frozen at -40°C in a freezer (Revco, USA) and stored in a commercial freezer at -18°C during 10, 20, 30 and 60 days. For each storage time, the samples were removed from the freezer and taken a commercial refrigerator at 8°C for 18 h to ensure complete thawing process [17,18]. Once papaya samples were thawed, physical properties were evaluated (freezing rate, DL and mechanical properties in terms of ME and σ_L).

2.4. Determination of physical properties

2.4.1. Freezing rate

The freezing rate of samples was determined following eq.1, for this, the time and freezing temperature were recorded using a Dattalogger Thermometer (Sper Scientific, USA.) coupled with a type thermopar K type, inserted into a geometric center of the fruit. With the data obtained from the product temperature and the freezing time, freezing curves were constructed.

$$FR = \frac{T_o - T_f}{\Delta t} \quad (1)$$

Where *FR* is the freezing rate, T_o is the initial temperature of the sample (°C), T_f is the final temperature of the sample (ºC) and Δt is the freezing time interval (min).

2.4.2. Drip Loss (DL)

The DL was calculated by the weight differences of the samples before and after the freeze-thawing process [17,19], using an analytical balance (Mettler Toledo AE200) with 0.001g accuracy. The eq. 2 was used to calculated DL.

$$DL = \frac{m_f - m_o}{m_o} \quad (2)$$

Where m_o is the weight of the sample before freezing (g) and m_f is the weight of the sample after thawing (g).

2.4.3. Mechanical properties

Mechanical properties of OTS and CS were analyzed through uniaxial compression test using a texturometer (model EZ-Test, Shimadzu, Japan), adapted with a 40mm

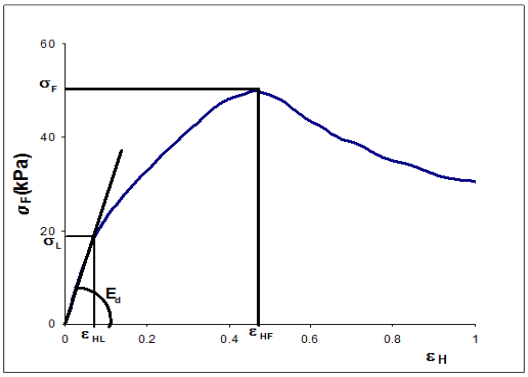


Figure 1. General curve of uniaxial compression curve (Stress and Strain)
Source: Adapted from [7]

diameter cylindrical plate. The measurements were performed at 27.1 ± 0.2°C, at a speed of 30 mm/min, until the sample was compressed to 90% of its initial height. The force-displacement curves obtained in the compression analysis were used to calculate the failure stress $\sigma(t)$ and Hencky strain ε_H from the eq.3 and eq. 4 respectively [20,21]. The typical curve of uniaxial compression is shown in Fig. 1.

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A(t)} = \frac{F(t)}{\pi r_0^2 l_0}(l_0 - d(t)) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{HF}(t) = Ln\left[\frac{l_0}{(l_0 - d(t))}\right] \quad (4)$$

Where $\sigma(t)$ is the failure stress (true stress) (Pa), F is the compression force (N), A is the cross sectional contact area (m^2), εH is the Hencky strain at failure (mm/mm), l_0 is the initial sample length (mm) and d is the sample length of the sample at a time t compression (mm).

The parameters of stress of yield limit (σ_L) and elastic modulus (EM) were analyzed in Fig. 1. The σ_L was determined at the end point of the linear relationship between stress and strain, the EM was obtained from the slope of the linear region before the yield point [21]. Therefore, the samples showed no macroscopic point of fracture, the failure stress (σ_F), wich is defined as the ultimate stress before the material fracture [12], could not be determined.

3. Experimental design

A factorial design 2x2x4 was applied with three factors: Concentration of OS (45 and 55°Brix), immersion time in OS (30 and 90 min) and freezing storage time (10, 20, 40 and 60 days). All of the measurements were performed three times. The results were analyzed using a 95% confidence level variance analysis using the Minitab 15.1 Version (Minitab, Inc., State College, Pennsylvania, 2009).

4. Results

4.1. Moisture content and soluble solids

Initial moisture content (% wet basis) and °Brix of treated and non-treated samples are shown in Table 1. The osmodehydrated samples reached moisture levels from 79.6 to 74.2% (wet basis) with a gain of solids of 17.5 to 22.5 °Brix. Treatments with higher concentration of osmotic solution (55°Brix) showed lower moisture content than those treated at 45°Brix for the same dehydration time. This is because the OS with higher concentration has greater driving force or greater osmotic pressure gradient between the solution of the environment and food, which had achieved an acceleration of the dehydration kinetics [26].

Table 1.
Average values of moisture content for papaya in fresh and osmotically dehydrated at 45 and 55ºBrix.

	NTS	OD45-30	OD45-90	OD55-30	OD55-90
MC %	88.50±0.52	79.60±0.68	76.60±0.29	77.0±0.57	74.22 ±0.46
°Brix	11.30±0.33	17.50±0.72	21.00±0.44	18.0±0.23	22.5±0.43

Source: The authors

4.2. Freezing curve

The freezing curves of the OTS and the NTS samples are shown in Fig. 2. In all treatments the phenomenon of sub cooling typical in food was present (water remains liquid below its freezing point). Ice formation (initial freezing temperature) in the freezing of fresh fruit began at about -1.5°C, while in the osmofrozen samples were lower ranging from -1.71 to 2.43°C (DO45-30 = -1.71 ° C; DO45-90 = -1.92; DO55-30 =-2.0 and DO55-90 = -2.43°C). Similar behavior was presented in yellow pitahaya [27]. The beginning of ice formation is associated with the removal of the latent heat of freezing. The lowest freezing temperatures in OTS are attributed to the solutes concentration (freezing-point depression). Freezing temperatures are reported in some fruits like apple (-2.20 ± 0.38°C to 12.28°Brix) in pear (-1.96 ± 0.24ºC for 9.55ºBrix) and in grape (-3.37 ± 0.35°C to 16.7°Brix) [28]. The freezing rate on fresh samples were slower (0.92°C/min) as compared to the osmotically treated (OD45-30=1.02°C/min;OD45-90=1.05°C/min; OD55-30=1, 21°C/min and OD55-90=1.45°C/min). These freezing rate are considered fast [29], which prevents the formation of large ice crystals within the structure of the food and aid in reducing mechanical damages to the samples.

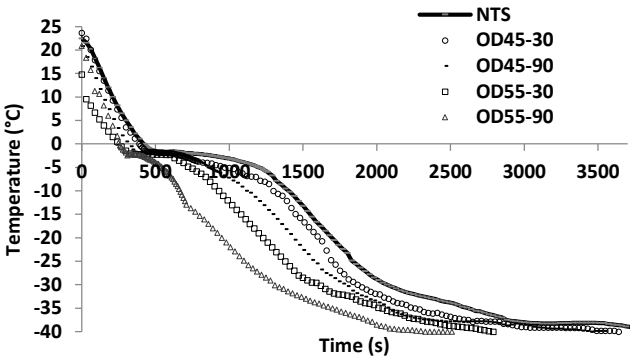


Figure 2. Samples freezing curve of papaya with and without osmotic treatment
Source: The authors

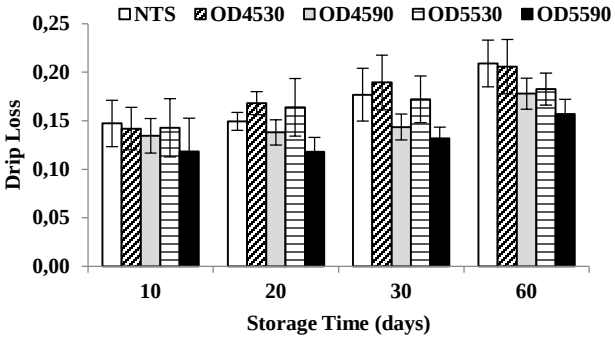


Figure 3. Drip loss in papaya with and without osmotic treatment
Source: The authors

4.3. Drip loss

Dripp loss (DL), also called liquid phase loss. The DL during the freeze-thaw of papaya samples are shown in Fig. 3. The DL increased significantly in all treatments ($p<0.05$) during the frozen storage time. Similar behavior was observed in papaya with osmotic pretreatment at 65°Brix [15], and in other fruits like apple and pear [8], melon [14] and strawberry [7]. It is possible that with increasing storage time in freezing a change arises in the size, number and shape of ice crystals (ice recrystallization), causing the output of the liquid phase or loss of the capacity for water retention of the fruit cell [26,27].

It is noted that the OTS treatments except OD45-30, had significantly ($p<0.05$) lower losses of DL as compared to the NTS. This behavior can be attributed to the lower amount of freezable water in fruit due to the application of OD, reducing the ice recrystallization process during frozen storage, and consequently presenting minor structural damages to the fruit cell matrix. A similar trend has been reported in Kiwi [12] and melon [14]. Otherwise, it can be said that since OTS shows a higher freezing rate, they make smaller crystal sizes within the cellular matrix, reducing structural damages and consequently less loss of liquid phase (drip loss) [9]. This result is an indicator of the cryoprotectant effect of osmotic treatment, previous to the papaya freezing process.

By comparing the drip loss between osmotic treatments, it is noted at lower moisture level, the samples presented lower losses of liquid phase ($p<0.05$), being the treatment DO5590 with the lowest moisture level (74.22 ± 0.43%, wet basis) which showed the lowest DL each time of frozen storage. This result corroborates the lowest freezable water, a decreasing ice recrystallization processing, and a decreasing structural s damage. Similar results were reported in papaya treated at 65°Brix [15] and Kiwi [23]. By comparing the osmotic solution concentration level, it is clear that for the same dehydration time, the dehydrated treatments at 55°Brix showed lower DL as compared to those of 45ºBrix, due to the lower moisture content reached in dehydrated samples.

4.4. Mechanical properties

A typical force-deformation curve (obtained from compression test) for treated and non-treated papaya samples are shown in Fig. 4. A typical fracture curve was not shown as described in Fig. 1. Curves were presented without showing a failure stress point (macroscopic break). This behavior means that the matrix of the papaya is flaccid, is not rigid as to present a breakpoint or macroscopic rupture [7], similar behavior has been observed in strawberries and kiwis [32].

For this reason, the mechanical properties of elastic modulus (EM) and stress of yield limit (σ_L), were analyzed, which are also suitable to characterize mechanical or viscoelastic food properties, which are associated with food hardness. The EM is associated with the feeling of hardness or resistance when a food is chewed [33]. The σ_L is associated to the linear elastic behavior change (solid) to nonlinear elastic or plastic (liquid), thus, a greater σ_L means a stronger or harder behavior [34].

4.5. Elastic modulus and stress of yield limit

Changes in elastic modulus of the different papaya treatments are shown in Fig. 5. It is noted that the EM decreases significantly ($p<0.05$) in all treatments during frozen storage, possibly due to structural damages to the matrix cell by the formation of ice crystals during storage [35]; however, when comparing the OTS and NTS, it is observed that the ones treated showed significantly ($p <0.05$) higher EM (harder), this behavior can be attributed to minor structural damages to contain less freezable water. Similar results have been investigated in mango [7] apple [8] and in tomato [36].

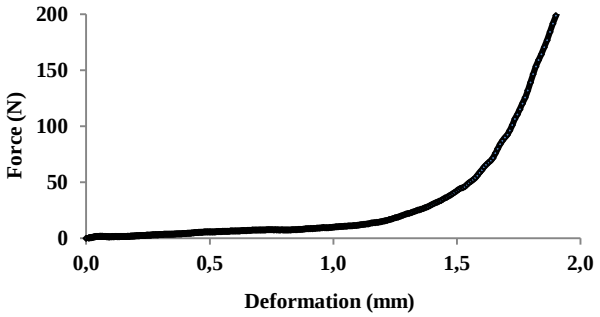


Figure 4. Typical curve of stress and strain by uniaxial compression test in papaya.
Source: The authors

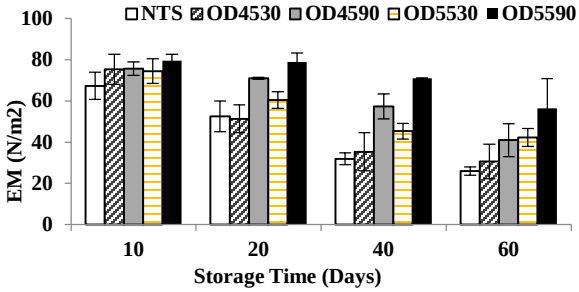


Figure 5. Evolution of the elastic modulus in osmotically treated and untreated papaya samples during frozen storage.
Source: The authors

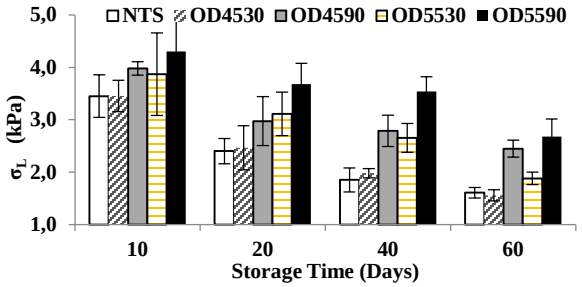


Figure 6. Evolution of the stress of yield limit in osmotically treated and non-treated papaya samples during frozen storage.
Source: The authors

When comparing the values of EM between osmotically treated samples, it is seen that the dehydrated samples performed the longest (90 min) for both treatments at 45 and at 55°Brix showed higher value of the elastic modulus. This behavior may be associated with lower moisture content reached. It is also noted that the samples treated at higher concentration (55°Brix) showed a higher elastic modulus than those of the less concentration (45°Brix) when compared to the same time of OD, also due to the lower moisture content and greater °Brix reached .

Therefore, the treatment with lower water level (DO55-90 with 74.22%±0.46) and higher content of soluble solids (22.5±0.43°Brix) was the one that presented the highest values of EM with 79.47±3.10,78.88±4.32, 70.97 0.22 and 56.40±14.43 43_N/m^2 at 10, 20, 40 and 60 days respectively frozen storage. Similar behavior was observed at the osmo-freezing of papaya [37]. These results indicate that when papaya with less freezable water is frozen, the structural changes are affected to a lesser extent in the cell matrix, possibly because of presenting lower re-crystallization of ice [38]. According to [33], by reducing the moisture content of food in osmotic dehydration, the product reaches higher hardness in the osmo-freezing, due to the higher gain of solids and increased water loss. Fig. 6 shows the changes of the stress of yield limited in the different papaya treatments during frozen storage.

Behavior of σ_L was similar to the modulus of elasticity above mentioned, it was also observed that σ_L decreased significantly ($p<0.05$) in all treatments during under freezing storage, which is an indicator of loss of hardness or softening of fruit by the effect of freezing-thawing process. This behavior is also due to cell damage caused by the ice recrystallization which weakening the mechanical strength of the fruit. However, the OTS showed significantly ($p<0.05$) higher values of σ_L as compared to NTS, this result indicates the positive effect of reducing the freezable water by the process of the OD to reach higher hardness or more solid fruit behavior. In fact, among samples osmotically treated it was also observed that treatment DO55-90 showed the highest value σ_L during storage, due to the less amount of freezable water.

5 Conclusions

The application of osmotic pretreatments followed by freezing process (osmo-freezing) had a cryoprotectant effect on papaya samples in terms of mechanical properties and drip loss. This provides more accurate and reliable estimates of papaya samples with lower content of freezable water and higher content of soluble solids have higher freezing rates, lower drip loss and higher hardness (firmness) than the non-treated samples during freezing storage, a possible explanation for this is due to less recrystallization ice. The freezing storage time influenced significantly ($p<0.05$) in the loss of papaya quality, are thought to contribute to ice recrystallization during storage, causing loss of cell contents. These results demonstrate that the osmo-freezing technique is effective in reducing quality loss in papaya samples during freezing storage.

References

[1] Ocoró-Zamora, M. and Ayala-Aponte, A., Influence of thickness on the drying of papaya puree (carica papaya l.) through refractance windowtm technology. DYNA, 80(182), pp. 147-154, 2013.

[2] Udomkun, P., Nagle, M., Argyropoulos, D., Mahayothee, B. and Müller, J., Multi-sensor approach to improve optical monitoring of papaya shrinkage during drying. Journal of Food Engineering, 189, pp. 82-89, 2016. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.05.014

[3] Upadhyay, R. and Mishra, H., Predictive modeling for shelf life estimation of sunflower oil blended with oleoresin rosemary (Rosmarinus officinalis L.) and ascorbyl palmitate at low and high temperatures. LWT - Food Science and Technology, 60(1), pp. 42-49, 2015. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.09.029

[4] Kurozawa, L., Terng, I., Hubinger, M. and Park, K., Ascorbic acid degradation of papaya during drying: Effect of process conditions and glass transition phenomenon. Journal of Food Engineering, 123, pp. 157-164, 2014. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.039

[5] James, C., Purnell, G., and James, S.J., A critical review of dehydrofreezing of fruits and vegetables. Food Bioprocess Technology, 7(5), pp. 1219-1234, 2014. DOI: 10.1007/s11947-014-1293-y

[6] Wu, L., Orikasa, T., Tokuyasu, K., Shiina, T. and Tagawa, A., Applicability of vacuum-dehydrofreezing technique for the long-term preservation of fresh-cut eggplant: Effects of process conditions on the quality attributes of the samples. Journal of Food Engineering, 91(4), pp. 560-565, 2009. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.10.021

[7] Chiralt, A., Martínez-Navarrete, N., Martínez-Monzó, J., Talens, P., Moraga, G., Ayala, A. and Fito, P., Changes in mechanical properties throughout osmotic processes. Journal of Food Engineering, 49(2-3), pp. 129-135, 2001. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00203-X

[8] Marani, C.M., Agnelli, M.E. and Mascheroni, R.H., Osmo-frozen fruits: Mass transfer and quality evaluation. Journal of Food Engineering, 79(4), pp. 1122-1130, 2007. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.03.022

[9] Chassagne-Berces, S., Poirier, C., Devaux, M.F., Fonseca, F., Lahaye, M., Pigorini, G., Girault, C., Marin, M. and Guillon, F., Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing. Food Research International, 42(7), pp. 788-797, 2009. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.03.001

[10] Xin, Y., Zhang, M., Xu, B., Adhikari, B. and Sun, J., Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: A review. International Journal of Refrigeration, 57, pp. 11-25, 2015. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.04.015

[11] Tregunno, N.B. and Goff, H.D., Osmodehydrofreezing of apples : Structural and textural effects. Food Research International, 29(5), pp. 471-479, 1996. DOI: 10.1016/S0963-9969(96)00056-7

[12] Talens, P., Escriche, I., Martínez-Navarrete, N. and Chiralt, A., Influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of kiwi fruit. Food Research International, 36(6), pp. 635-642, 2003. DOI: 0.1016/S0963-9969(03)00016-4

[13] Ayala-Aponte, A.A., Serna-Cock, L. and Giraldo-Cuartas, C.J., Efecto de la agitación sobre la deshidratación osmótica de pitahaya amarilla (selenicereus megalanthus s.) Empleando soluciones de sacarosa. Interciencia, 34(7), pp. 492-496, 2009.

[14] Bermúdez, A., Narváez, M., Cadena, M. and Ayala-Aponte, A., Reducción de pérdida de calidad de melón (cucumis Melo) durante la congelación mediante aplicación previa de deshidratación osmótica. Alimentos Hoy, 30, pp. 23-29, 2013.
[15] Ayala, A., Sánchez, M. and Rodríguez, H., Influencia de la osmocongelación en algunas propiedades físicas de la papaya (Carica papaya L .), U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica, 12(2), pp. 487-494, 2014.
[16] Instituto Colombiano de Normas Ténicas y Certificación (ICONTEC), Norma Técnica Colombiana NTC 1270: Industria Alimentaria. Papaya. 1993.
[17] Osorio, C., Franco, M.S., Castaño, M.P., González-Miret, M.L., Heredia, F.J. and Morales, A L., Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 8(3), pp. 353-359, 2007. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.03.009
[18] El-Aouar, Â.A., Azoubel, P.M. and Murr, F.E.X. Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (Carica papaya L.). Journal of Food Engineering, 59(1), pp. 85-91, 2003. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00434-X
[19] Pereira, L.M., Ferrari, C.C., Mastrantonio, S.D.S., Rodrigues A.C.C. and Hubinger, M.D., Kinetic aspects, texture, and color evaluation of some tropical fruits during osmotic dehydration., Drying Technology, 24(4), pp. 475-484, 2006. DOI: 10.1080/07373930600611968
[20] Rózek, A., Achaerandio, I., Güell, C., López, F. and Ferrando, M., Grape phenolic impregnation by osmotic treatment: Influence of osmotic agent on mass transfer and product characteristics, Journal of Food Engineering, 94(1), pp. 59-68, 2009. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2009.02.030
[21] Sriwimon W. and Boonsupthip, W., Utilization of partially ripe mangoes for freezing preservation by impregnation of mango juice and sugars, LWT - Food Science and Technology, 44(2), pp. 375-383, 2011. DOI: 10.1016/j.lwt.2010.08.012
[22] Moraga, A., Martinez, G., Chiralt, N., Compositional changes of strawberry due to dehydration, cold storage and freezing-thawing processes. Journal of Food Processing and Preservation, 30(4), pp. 458-474, 2006. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2006.00079.x
[23] Talens, P., Martínez-Navarrete, N., Fito, P. and Chiralt, A., Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. Innovative food science emerging technologies, 3(2), pp. 191-199, 2002. DOI: 10.1016/S1466-8564(02)00027-9
[24] Mayor, L., Cunha, R.L. and Sereno, A.M., Relation between mechanical properties and structural changes during osmotic dehydration of pumpkin. Food Research International, 40(4), pp. 448-460, 2007. DOI: 10.1016/j.foodres.2007.02.004
[25] Calzada, M., Peleg, J.F., Mechanical interpretation of compressive stress-strain relationships of solids food. Journal of Food Science, 43, pp. 1087-1092, 1978. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1978.tb15240.x
[26] Brochier, B., Marczak, L.D.F. and Noreña, C.P.Z., Osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes: Water effective diffusivity evaluation. Food Bioprocess Technology, 8(3), pp. 623-636, 2014. DOI: 10.1007/s11947-014-1432-5
[27] Ayala, A., Serna, L. and Mosquera, E., Liofilizacion de pitahaya amarilla (Selenicereus megalanthus). Vitae, 17(2), pp. 121-127, 2010.
[28] Jie, W., Lite, L. and Yang, D., The correlation between freezing point and soluble solids of fruits. Journal of Food Engineering, 60(4), pp. 481-484, 2003. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00081-5
[29] Delgado, A.E. and Rubiolo, A.C., Microstructural changes in strawberry after freezing and thawing processes. LWT, 38(2), pp. 135-142, 2005. DOI: 10.1016/j.lwt.2004.04.015
[30] Goncalves, C. Abreu, E., Brandao, M. and Silva, T., Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (Brassica oleracea L. ssp. Italica) during storage at isothermal and non-isothermal conditions. International Journal of Refrigeration, 34(8), pp. 2136-2144, 2011. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.06.006
[31] Sutton R.L. and Wilcox, J., Recrystallization in ice cream as affected by stabilizers. Journal of Food Science, 63(1), pp. 104-107, 1998. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1998.tb15686.x, DOI: 10.1111/j.1365-2621.1998.tb15663.x
[32] Chiralt, P., Talens, A., Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. Journal of Food Engineering, 67(1-2), pp. 167-177, 2005. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.05.055
[33] Blankenship, J.M. and Dole, S.M., 1-Methylcyclopropene: A review. Postharvest Biology and Technology, 28(1), pp. 1-25, 2003. DOI: 10.1016/S0925-5214(02)00246-6
[34] Steffe, J.F. Rehological methods in food process engineering. East Lansing: Freeman Press, 1996.
[35] Cock, L.S., Torres, L. and Ayala, A., Changes in mechanical properties of minimally- processed yellow pitahaya treated with 1-MCP. DYNA, 174, pp. 71-78, 2012.
[36] Olatidoye, O., Sobowale, O.P. and Akinlua, S.S., Effect of osmodeydrofreezing on the quality attributes of frozen tomato. Electronic Journal of Enviromental, 9(4), pp. 780-789, 2010.
[37] Moyano, F., Vega, P.C., Bunguer, R.E., Garretón, A. and Osorio, J., Effect of combined processes of osmotic dehydration and freezing on papaya preservation. Food Science and Technology International. 8(5), pp. 295-301, 2002. DOI: 10.1177/1082013202008005183
[38] Van Buggenhout, M., Messagie, S., Maes, I., Duvetter, V., Van Loey, T., Hendrickx, A., Minimizing texture loss of frozen strawberries: effect of infusion with pectinmethylesterase and calcium combined with different freezing conditions and effect of subsequent storage/thawing conditions. European Food Research and Technology, 223(3), pp. 395-404, 2006. DOI: 10.1007/s00217-005-0218-4

A. Ayala-Aponte, received the BSc. Eng. in Agricultural Engineering in 1993, from the Universidad del Valle, Cali, Colombia, and the PhD degree in Science and Food Technology in 2011, form the Universidad Politécnica de Valencia, España. He is a professor in the area of food technology and engineering, Universidad del Valle, Colombia. His research interests include: preservation and food processing.
ORCID: 0000-0003-0310-3577

M.I. Sánchez-Tamayo, received the BSc. Eng. in Food Engineering in 2010 from the Universidad del Valle, Cali, Colombia, the MSc degree in Food Engineering in 2015, fron the Universidad del Valle, Cali, Colombia.She is a PhD student at Universidad del Valle. Her research interests include food emulsions, edible coatings and postharvest technology
ORCID: 0000-0002-8381-9171



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Química e Ingeniería de Petróleos

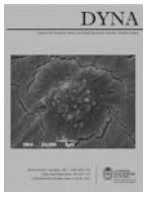
Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Gaussian processes in ball bearing prognostics

Juan Fernando López-López [a], Jhouben Janyk Cuesta-Ramirez [b] & Hector Fabio Quintero-Riaza [c]

[a] *Programa de Diseño Industrial, Universidad Católica de Pereira, Pereira, Colombia, juan5.lopez@ucp.edu.co*
[b] *Ciencias Administrativas y Contables, Corporación Universitaria Minuto de Dios, Pereira, Colombia, jycuesta@utp.edu.co*
[c] *Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, hquinte@utp.edu.co*

Received: March 23th, de 2016. Received in revised form: October 19th, 2017. Accepted: November 7th, 2017

Abstract
In this work, vibration analysis and Gaussian Processes techniques are used in useful life prognostics of ball bearings. The database is provided by The Prognostics Data Repository from NASA, and shows the failure evolution in ball bearings. The data basis also provides training and validation data sets for ball bearing useful life prediction. Several time and frequency characteristics are extracted from ball bearing vibration signals for trending analysis, and finally one of these is taken as input for the Gaussian process and describe, with a probabilistic strategy, the failure evolution system. No dimensionality reduction algorithm is used in this paper, only the evaluation of trends in failure evolution is taken for decision.
This data basis was used in 2012 IEEE classification contest. Several participants used classification techniques based on time-frequency transformation and Artificial Intelligence algorithms but none of them used Gaussian Processes in a classification scheme. Although, the present work does not have the best results in classification it does show a major simplicity in formulation and implementation than most of the classification schemes.

Keywords: Mechanical vibrations; ball bearings; gaussian processes; prognostics

Procesos gaussianos en el pronóstico de vida útil en rodamientos de bolas

Resumen
Este trabajo combina el análisis de vibraciones con la regresión gaussiana para realizar el pronóstico de vida útil en rodamientos de bolas. La base de datos es suministrada por "The Prognostics Data Repository" de la NASA, esta base de datos muestra la evolución de falla en rodamientos de bolas. Se extraen múltiples características en tiempo y en frecuencia a partir de la señal de vibración, y finalmente una de ellas es empleada como entrada del proceso Gausiano y se describe, mediante una estrategia probabilística, la evolución de la falla en el sistema. En este trabajo no se utilizan algoritmos de reducción de la dimensionalidad, solamente se evalúa la tendencia de las características en función de la evolución de la falla como método de selección.
Esta base de datos fue usada en el 2012 en un concurso de clasificación organizado por la IEEE. Aunque este trabajo no tiene los mejores resultados de clasificación, si presenta una metodología de análisis mucho más simple que la mayoría de los concursantes y aplicable a un esquema de análisis y clasificación on-line.

Palabras clave: Vibraciones mecánicas; rodamientos de bolas; procesos gaussianos; pronóstico

1. Introduction

Machine Prognosis according ISO 13181 – 4 [1] "is the convenient process that allows to estimate the Remaining Useful Life (RUL) of the system and thus taking appropriate decision".

In recent years research in machine component prognosis has been increasing due to the understanding of the importance of prognosis in Condition Based Maintenance (CBM). Beyond corrective and preventive maintenance there is a wide research field in predictive maintenance where the Remaining Useful Life (RUL) of machine components is calculated based in data from the normal operation or through system mathematical modeling.

There are three principal techniques in machine prognosis

How to cite: López-López, J.F., Cuesta-Ramirez, J.J. and Quintero-Riaza, H.F., Gaussian processes in ball bearing prognostics DYNA, 84(203), pp. 214-219, December, 2017.
© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

[2,3]. The first one is based in vibration data or any measure data from the component studied, this variable permits the formulation of a data-based model which could be probabilistic or AI based. The second technique is model-based prognosis, here a residual is calculated from the real signal and the mathematical model of the system and there must be a degeneration modelling of the material or the machine component. The third technique is experience-based. Different reliability models are used as Weibull, exponential or another probability distribution which estimates the RUL of the component studied.

The Prognostics Data Repository from NASA was used in IEEE contest in 2012 which rewarded the team with the minor error percentage in ball bearing RUL estimation. Sloukia et al. [4] used Mixture of Gaussians-Hidden Markov Models (MoG-HMM) and Support Vector Machine (SVM) with accuracy superior to 99%. Another approach used by Mosallam et al [5], is Empirical Mode Decomposition (EMD) to discover the trend in the failure evolution with an absolute error of 0.0751. Li and Wang used Logistic Regression Model (LRM) to define a reliability model. The error from the RUL estimation is 4.77%. Most of these techniques are mathematical and time computing demanding. The aim of this work is the RUL estimation based in the simplest as possible GP implementation. This permits the future implementation in online industrial schemes.

The Gaussian Processes (GP) technique shows an interesting application, establishing a probabilistic model over data, adjusting an underlying function for posterior bearing prognostics. This procedure is simplest than most of the previous works, showing an elevate accuracy in bearing RUL and speed in computing.

In section 2 the mathematical formulation of Gaussian Processes for regression and classification is briefly explained.

In section 3 the application of GP's technique in prognosis is shown comparing the RUL estimation error with the actual RUL results from the full data basis.

Finally, Section 4 discusses the results of the methodology applied to mechanical vibration signals of ball bearing failure.

Table 1.
Nomenclature.

$\boldsymbol{x}$	Data vector
$\boldsymbol{X}$	Data vectors matrix
σ	Standard deviation
σ^2	Variance
σ_n^2	Noise variance
Σ	Covariance matrix
$\bar{x}$	Mean value from data vector $\boldsymbol{x}$
$\mathbb{E}[f(\boldsymbol{x})]$	Expected value of function f
$k(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}')$	Kernel function of $\boldsymbol{x}$
$K(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X})$	Covariance function of evaluated in X
K_v	Bessel function
$N(0, \sigma_n^2)$	Normal or Gaussian distribution
$m(\boldsymbol{x})$	Mean function of $\boldsymbol{x}$
Nvs	Number of vibration signals
Tba	Time between data acquisition
Tbl	Total bearing life
$GPRUL$	Gaussian Process RUL estimation
$ARUL$	Actual data basis RUL
N	Number of elements in data vector $\boldsymbol{x}$

Source: The authors

2. Time – frequency features

Several time-frequency features can be used in a prognostics scheme. The aim of this part in methodology is the identification of the process most defining characteristics. However there are many dimensionality reduction methods e.g. Principal Components Analysis (PCA) or Independent Component Analysis (ICA), the purpose of this work is use all the amount of features in RUL identification.

Table 2 shows the time domain features with their formulae and Table 3 shows the features in frequency domain which consist in energy by frequency bands. The bands are related to the defects in rotating machinery. First band is associated with misbalance, alignment problems and cage deterioration. Second and Third band are associated with the harmonics of alignment problems and mechanical looseness. The Fourth band encloses outer race problems (BPFO) and the Fifth band is used to detect inner race problems (BPFI) [10]. The frequency bands are especially calculated in relation with analyzed ball bearing.

Table 2.
Time domain features

Standard deviation	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_m)^2}{N-1}}$
Root Mean Square	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i)^2}{N}}$
Crest Factor	$\frac{Peak\ Value}{RMS}$
Skewness	$\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3}{(N-1)\sigma^3}$
Kurtosis	$\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4}{(N-1)\sigma^4}$
Impulse Factor	$\frac{Peak\ Value}{\bar{x}}$
Shape Factor	$\frac{RMS}{\bar{x}}$
Energy in time domain	$\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\lvert x_i \rvert}}{N}\right)^2$
Entropy in time domain	$-\sum_{i=1}^{N} x_i \log x_i$
Clarence factor	$\frac{Peak\ Value}{Energy}$
Mean	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}$
Variance	σ^2
Maximum Value	$min(\boldsymbol{x})$
Minimum Value	$max(\boldsymbol{x})$

Source: The authors

Table 3.
Frequency domain features

Energy by frequency Band	Frequency boundaries
1	0 – 50 Hz
2	50 Hz – 80 Hz
3	80 Hz – 110 Hz
4	110 Hz – 160 Hz
5	160 Hz – 300Hz

Source: The authors

3. Gaussian processes

A Gaussian Process can describe a system response or stochastic process according to a normal distribution or Gaussian distribution, where the mean and covariance function depends of the training data. "Gaussian process is a collection of random variables, any finite number of which have a joint Gaussian distribution" [6]. This means that any function sample from the GP has a Gaussian distribution.

A Gaussian process is completely defined by its mean function $m(x)$ and covariance function $k(x,x')$. Furthermore, a Gaussian process is a probability distribution over functions, whereas a Gaussian distribution is a distribution over vectors.

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x,x')) \tag{1}$$

If $f(x)$ refers to a real process the mean and covariance functions can be defined as

$$m(x) = \mathbb{E}[f(x)] \tag{2}$$

$$k(x,x') = \mathbb{E}[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x'))] \tag{3}$$

$$k(x,x') = cov(f(x), f(x')) \tag{4}$$

A prior probability function over the GP is defined. This prior probabilities define what kind of functions are expected to be observed, before seen any data and are chosen in advance. After adding training points the mean and covariance chance and the probability distribution is called the posterior over functions and is again Gaussian.

A covariance function is a semi-positive definite function that measures the similarity between pairs of points over the input space D. Such functions are used to compute the so-called Gram matrix or kernel matrix. Some covariance functions are the Squared Exponential (RBF kernel) expressed as

$$k(x,x') = \exp\left(-\frac{\|x - x'\|^2}{2l^2}\right) \tag{5}$$

Where l corresponds to the length-scale; and the Mátern Class given by

$$k(r) = \frac{2^{l-v}}{\Gamma(v)}\left(\frac{\sqrt{2v}r}{l}\right)^{v} K_v\left(\frac{\sqrt{2v}r}{l}\right) \tag{6}$$

where $r = \|x - x'\|$, v and l are positive parameters and K_v is a modified Bessel function. Common cases of v are $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$ In the case of $v = 1/2$ and $D = 1$ (x dimension) this kernel function is called Ornstein Uhlenbeck kernel (OU-kernel).

Using $N(0,K)$ as GP prior over the functions $f(x)$ and a likelihood function given by $y(x) = f(x) + \epsilon$ (where $\epsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$) and using Bayes theorem, it is possible to obtain a predictive distribution for a set of new inputs X_*,

$$f_*|X, y, X_* \sim \mathrm{N}(\bar{f_*}, \mathrm{cov}(f_*)) \tag{7}$$

where

$$\bar{f_*} \triangleq \mathbb{E}(\mathrm{f}_*[\mathrm{X}, y, X_*]) = K(X_*, X)[K(X,X) + \sigma_\mathrm{n}^2\mathrm{I}]^{-1} \tag{8}$$

and the covariance

$$\mathrm{cov}(f_*) \triangleq \mathrm{K}(\mathrm{X}_*, \mathrm{X}_*) - \mathrm{K}(\mathrm{X}_*, \mathrm{X})[\mathrm{K}(\mathrm{X}, \mathrm{X}) + \sigma_\mathrm{n}^2\mathrm{I}]^{-1}\mathrm{K}(\mathrm{X}_*, \mathrm{X}) \tag{9}$$

Here $K(X,X)$ is the covariance function evaluated on the training set X, $K(X_*, X)$ is the covariance of the training and test sets, $K(X_*, X_*)$ is the covariance of the new inputs and the parameter σ_n^2 represents the variance of the noise.

The estimation of the covariance function parameters is performed by maximizing the marginal likelihood by a gradient-descent algorithm. The log marginal likelihood is given as

$$\log p(y|\mathrm{X}, \emptyset) = -\frac{1}{2}\mathrm{y}\Sigma^{-1}\mathrm{y} - \frac{1}{2}\log|\Sigma| - \frac{\mathrm{N}}{2}\mathrm{D}\log(2\pi) \tag{10}$$

Where y are the outputs corresponding to the inputs X, $\emptyset$ represents the parameters and $\Sigma = K(X,X)$.

4. Experimental setup

Data sets were provided by FEMTO-ST Institute. Experiments were carried on PRONOSTIA, an experimental set up designed to implement an accelerated degradation of ball bearings, under some constant operation conditions [7].

The datasets consists basically in two groups: one for training, with ball bearing vibration signals from health to failure and a second group with a truncated sequence of ball bearing vibration from health to failure.

Additionally there are three different operation conditions with different motor speed and radial load. Condition 1 consists in 1800 rpm and 4000 N, condition 2, 1650 rpm and 4200 N and condition 3, 1500 rpm and 5000 N.

Table 4.
Tested bearings characteristics

Characteristic	Value
Outside race diameter	32 mm
Outer race diameter	29.1 mm
Inner race diameter	22.1 mm
Inside diameter	20 mm
Thickness	7 mm
Number of rolling elements	13
Ball diameter	3.5 mm

Source: The authors

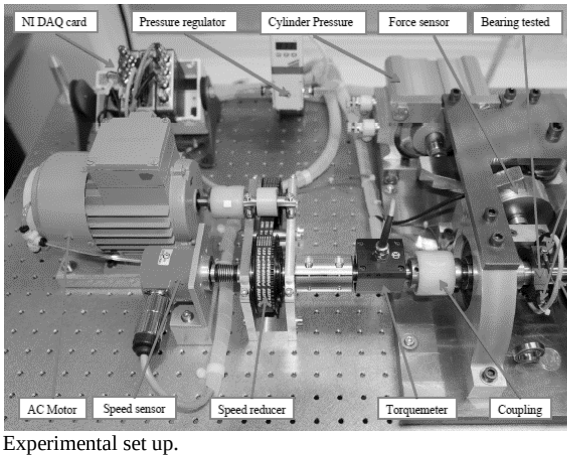


Figure 1. Experimental set up.
Source: PRONOSTIA set up [8]

The ball bearing characteristics are described in Table 4. Additional information about the set-up, e. g. transducers, data acquisition systems are found in [8]. Fig. 1 shows the PRONOSTIA set up.

4. Final comments

The aim extracting several characteristics from data basis is the search of trending in bearing vibration signals. In this work features in time and frequency domain has been extracted. Fig. 2 and Fig. 3 shows the features for every vibration signal in the training set for Bearing 1_1. It means the first bearing with the load condition number 1 from health to failure. The Bearing 1_1 data set counts with 2803 vibration signal. It can be shown some trending in some features like kurtosis, RMS value, Clarence factor, max value, min value and the fourth and fifth energy frequency bands, which increase its magnitude with operation time. This is the base for the Gaussian Process regression that permits the RUL estimation.

To keep the methodology simple, one of the features extracted is chosen for modelling the bearing degradation. The Gaussian Regression is done for all the features, and the chosen one, is which better fits the GP model with the minimum variance in the regression.

The regression model input is the feature vector, and the output is the normalized vector with the number of the signal in the sequence of degradation bearing i.e. number 0 for the first healthy bearing signal and 1 for the last signal with the

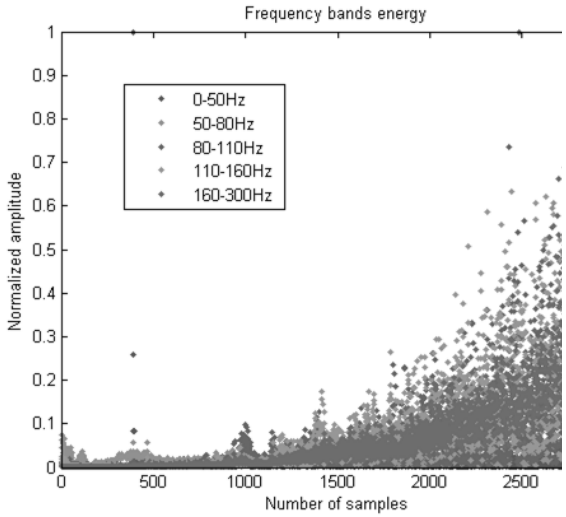


Figure 2. Frequency characteristics
Source: The authors.

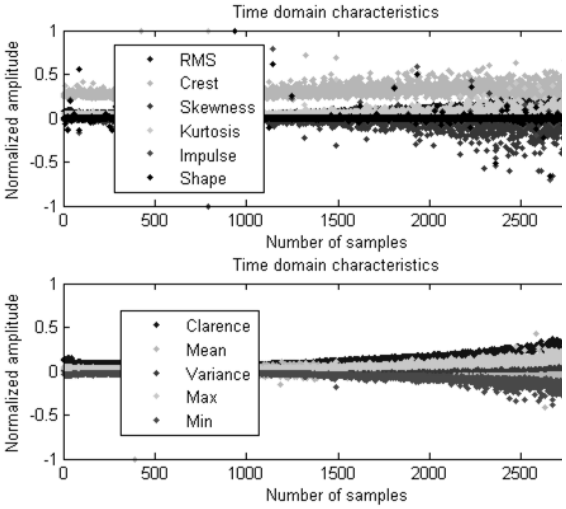


Figure 3. Time domain characteristics
Source: The authors.

bearing in failure. Thus, in the abscissa axis the feature value is shown and the ordinate axis shows the number of the signal from health to failure.

Fig. 4 shows the GP regression for data basis maximum value. The last values show an enormous variance which makes the model poor and gives mno confidence to the RUL estimation.

Fig. 5 shows the kurtosis GP regression, chosen because the model fits the data basis trending.

For RUL estimation the model for training data basis set, is established in every bearing. Subsequently, the test data basis set is evaluated taking care of operation conditions. It means that the ball bearings with operation condition number 1 are evaluated with the GP model of operation condition number 1. For this data basis there are three operation conditions which change the motor speed and radial load. Full data basis description can be shown in [8].

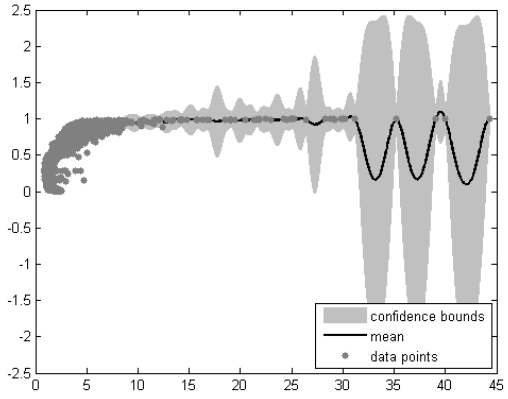


Figure 4. GP regression for maximum value
Source: The authors.

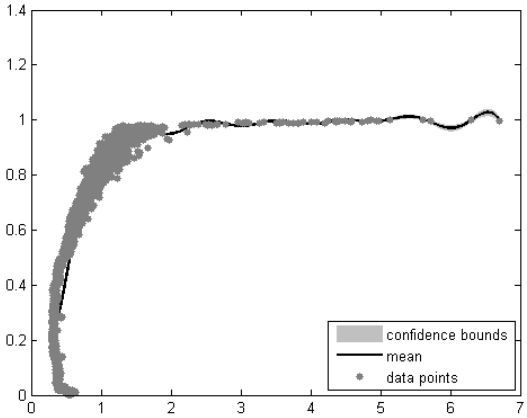


Figure 5. GP regression for kurtosis
Source: The authors.

Once the test data is passed through the model, the RUL is calculated considering the output as a percentage of the bearing life. Every value from the input feature vector gives a percentage value, for this work, the RUL is calculated by two ways. First using the mean of the output last values, and second with maximum output value. Later, the total bearing life time is calculated with the number of vibration signals Nvs and the elapsed time between data acquisitions Tba over the value extracted from the GP regression vector. The best estimate is chosen from those two values.

$$Tbl = \frac{Nvs * Tba}{\max(GPregression)} \tag{11}$$

The bearing RUL estimation is

$$RUL = (1 - \max(GPregression)) * Tbl \tag{12}$$

The error percentage is calculated using the GP RUL estimation and the actual RUL from the complete data basis.

$$\%Error = \frac{GPRUL - ARUL}{ARUL} \tag{13}$$

Table 5.
RUL results from GP regression

Bearing test set	Actual RUL	GP model RUL	% Error
1-3	5730 s	5689 s	0.71
1-4	339 s	398 s	17.4
1-5	1610 s	2416 s	50.0
1-6	1460 s	-	-
1-7	7570 s	7434 s	1.79
2-3	7530 s	7521 s	0.11
2-4	1390 s	1703 s	22.51
2-5	3090 s	-	-
2-6	1290 s	1634 s	26.66
2-7	580 s	611 s	5.34
3-3	820 s	1279 s	55.97

Source: The authors

The squared exponential kernel (SE kernel) or Gaussian kernel is defined by

$$k(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}') = \exp\left(-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}')^T \sum^{-1} (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}')\right) \tag{14}$$

If $\sum$ is diagonal, this can be written as

$$k(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}') = \exp\left(-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{D} \frac{1}{\sigma_j^2}(x_j - x'_j)^2\right) \tag{15}$$

We can interpret the σ_j as defining the characteristic length scale of dimension j. If $\sigma_j = \infty$, the corresponding dimension is ignored; hence this is known as the Automatic Relevance Determinator ARD kernel.

5. Conclusions

The study of machinery prognostics is an important issue in this work due to the impact of maintenance in industry

costs. This work gives a step towards the on line ball bearing prognosis, developing a simple and fast computing methodology.

In this paper we have provided a methodology for ball bearing prognosis using Gaussian Processes. To keep the methodology simple one of the time frequency features is selected, which better fix the GP regression. A deeper issue using all calculated features is the computing time and the loss of accuracy in the RUL estimation. One possible approach to this problem could be the use of a dimension reduction algorithm such as Principal Component Analysis (PCA) or Linear Discriminant Analysis (LDA) due to many calculated features are mathematical combination of others. Thus, this methodology is applicable to this kind of ball bearing but more research adjusting parameters like the kernel function or feature selection can be done to improve the RUL estimation.

Acknowledgments

We acknowledge to Universidad Tecnológica de Pereira and Colciencias for support this research and Colciencias with the Colombian doctorate program for support this research.

References

[1] Hongkun, L. and Yinhu, W., Rolling bearing reliability estimation based on logistic regression model. In: 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), 2013.

[2] Inman, D., Farrar, V., Lopes, V. and Steffen, V., Damage prognosis for aerospace, civil and mechanical systems. John Wiley and Sons, Ltd, 2005. DOI: 10.1002/0470869097

[3] Heng, A., Zhang, S., Tan,A.C. and Mathew, J., Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities, Mechanical Systems and Signal Processing, (23), pp. 724-739, 2009. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.06.009

[4] Sloukia. F., El Aroussi, M., Medromi, H. and Wahbi, M., Bearing prognostic using Gaussian hidden Markov model and support vector machine, Computer Systems and Applications (AICCSA), 2013 ACS International Conference on. 27- 30 May, 2013, pp. 1-4.

[5] Mosallam, A., Medjaher, K. and Zerhouni, N., Nonparametric time series modelling for industrial prognostics and health management. The International Journal of Advance Manufacturing Technology, 69(5-8), pp 1685-1699, November 2013.

[6] Rasmussen, C.E. and Williams, C.K.I., Gaussian processes for machine learning. The MIT Press, 2006, ISBN 026218253.

[7] Nectoux, P., Gouriveau, R., Medjaher, K., Ramasso, E., Morello, B., Zerhouni, N. and Varnier, C., PRONOSTIA: An experimental platform for bearings accelerated life test, IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, Denver, CO, USA, 2012.

[8] Patel, J., Patel, V. and Patel, A., Fault diagnosis of rolling bearing based on improve time frequency domain features using artificial neural networks, International Journal for Scientific Research & Development, 1(4), pp.781-788, 2013.

[9] Quintero, H.F. y López, J.F., Vibraciones mecánicas: Un enfoque teórico práctico. Editorial Universidad Tecnológica de Pereira, 2016, 350 P., ISBN 9789587222609

J.F. López-López, is Ph.D, full time professor at the Industrial Design Department at Universidad Católica de Pereira, Colombia. He received his BSc in Mechanical Engineering in the Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia in 2005, his MSc. degree in 2009 and his Ph.D in Engineering at Universidad Tecnológica de Pereira in 2017. His research interests include: mechanical vibrations, signal processing, and analysis of mechanisms.
ORCID: 0000-0001-7500-5154

H.F. Quintero-Riaza, is Ph.D, is full professor at the Mechanical Engineering Department, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. He received his BSc. in Mechanical Engineering in the Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Colombia, in 1995, his MSc. degree in Mechanical Engineering in the Universidad de los Andes, Bogotá Colombia, in 2000, and his PhD. degree in Mechanical Engineering in Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain, in 2006. His research interests include: mechanical vibration, design and analysis of mechanisms. and parallel manipulators.
ORCID: 0000-0002-4275-739X

J.J. Cuesta-Ramírez, is MSc, he received his BSc. in Electrical Engineering in the Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Colombia, in 2013 and his MSc. degree in Electrical Engineering in the Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia in 2015. His research interests include: machine Learning, stochastic processes, big data, signal processing, gaussian processes.
ORCID: 0000-0003-1365-025X

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Productive development model of the fisheries chain Spanish

Carmenza Luna-Amaya [a], Wilson Nieto-Bernal [b], Hugo Mercado- Cervera [c] & Javier Pajares- Gutiérrez [d]

[a] *Industrial Engineering Program, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. cluna@uninorte.edu.co*
[b] *Systems Engineering Program, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. wnieto@uninorte.edu.co*
[c] *Industrial Engineering Program, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. hmercado@unimagdalena.edu.co*
[d] *Industrial Engineering School, Universidad de Valladolid, Valladolid, España. pajares@insisoc.org*

Received: March 10th, 2016. Received in revised form: July 19th, 2017. Accepted: September 30th, 2017

Abstract
This article provides a productive development model, based on an analysis of the productive chain of Spanish fishing sector in general. It is constructed from the behavior diagnostic of each of the chain links and the different organizations of the Science and Technology. The model determines theoretically, optimal quantities, prices and economic benefits, using game theory, the Nash equilibrium and Pareto optimality, following the criteria of the Cournot and Bertrand models for products poorly differentiated and with similar business sizes. The results show that each fishing production unit has to capture, process and sell on average 280 kilograms per day, in order to maximize economic efficiency.

Keywords: Productive development model; Nash equilibrium; Pareto optimality.

Modelo de desarrollo productivo de la cadena pesquera española

Resumen

El artículo, presenta un modelo de desarrollo productivo basado en un análisis de la cadena productiva del sector pesquero español. Está construido gracias a un diagnóstico del comportamiento de cada eslabón de la cadena de diferentes organizaciones de ciencia y tecnología. El modelo determina teóricamente cantidades óptimas, precios y beneficios económicos usando la teoría de juegos, el equilibrio de Nash y el óptimo de Pareto, siguiendo criterios de los modelos de Cournot y Bertrand para productos poco diferenciados y con tamaños de mercado similares. Los resultados obtenidos muestran que cada unidad de producción pesquera tienen que capturar, procesar y vender en promedio 280 kilogramos por día, con el fin de maximizar su eficiencia económica.

Palabras clave: Modelo de desarrollo productivo; equilibrio de Nash; optimización de Pareto.

1. Behavior of the Spanish fishing sector

The demand for fish products and their derivatives in the Spanish market has been favored among other things by concerns about food safety of its society, by the progressive return to work of women, generating higher household incomes, the growing importance of spending on food away from home, as well as its significance of spending on food and beverage purchases.

The Spanish fleet is composed of some 13.000 boats with a capacity of average catch of about 785.000 tons of fish, 470.000 tons of fresh product and frozen averaging 315.000 tons, see Fig. 1. The average price paid per kilogram of product is € 2.2; the price of fresh products is on average 20% higher than frozen.

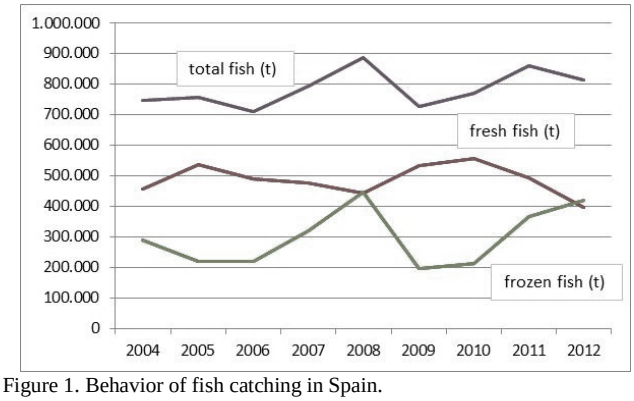


Figure 1. Behavior of fish catching in Spain.
Source: Adapted based presented information on PTEPA [6].

How to cite: Luna, C., Nieto, W., Mercado, H. and Pajares, J., Productive development model of the fisheries chain spanish DYNA, 84(203), pp. 220-225, December, 2017.
© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

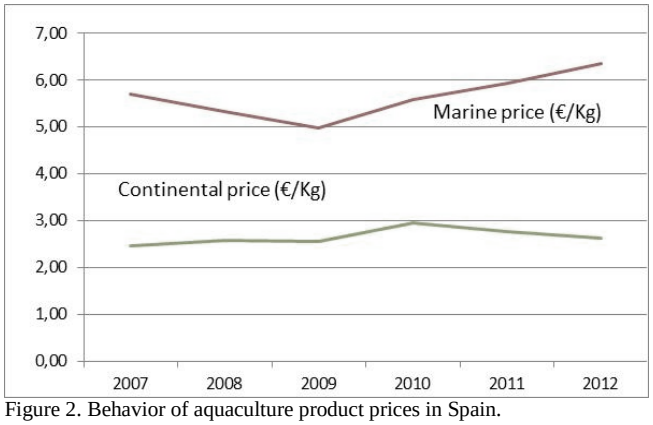


Figure 2. Behavior of aquaculture product prices in Spain.
Source: Data based on PTEPA platform [6].

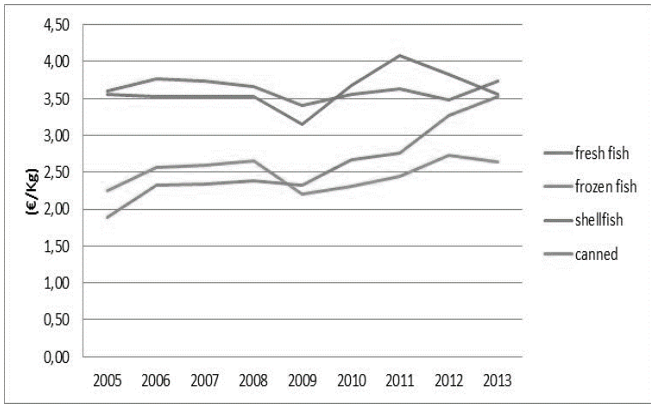


Figure 3. Behavior of imported fish products prices in Spain
Source: Data based on PTEPA platform [6].

Aquaculture has been presenting an important role in the development of the fisheries sector, its contribution of 267.000 tons of fresh product on average in recent years is considered significant, with values between 20% and 30% below capture prices, Fig. 2 shows the behavior. It is an important alternative for those processors, requiring a constant supply of product with low variability in the prices of raw materials.

Spain imports averaged 1'600.000 tons per year, of which 240.000 are of fresh product, 550.000 tons are frozen products, 570.000 tons of shellfish and 240.000 of canned products. On average, the pay is € 3 per kilogram of imported product, but in the case of fresh product, the price is 50% higher than the price of fresh product caught, see Fig. 3. In Total, in the Spanish market enters 2'652.000 tons of product, including fresh, frozen, shellfish and canned product. Of which are exported on average 983.000 tons, 106.000 tons of fresh, 517.000 tons of frozen, 196.000 tons of shellfish and 164.000 tons of canned.

In general the price of exported products is 10% below import prices, marked mainly by the price of frozen products, 30% lower than the imported ones. Not so, with the price of exported Spanish canned product, with a value 35% higher than that paid for imports, see Fig. 4.

If, to the total of fish product entering the Spanish market, we subtract exports, then we have a total of 1'669.000 tons on average to be consumed by Spanish people. But as shown in the consumption records from the Ministry of Agriculture Food and Environment of the Government of Spain, they are consumed on average 1'242.000 tons of fisheries products per year, representing a balance of 427.000 tons found on the shelves in supermarkets, shops, production companies and trading companies as product inventory. Of the 1'242.000 tons of fish products consumed on average per year in Spain, 564.000 tons are fresh products, 141.000 tons of frozen fish products, 357.000 tons of shellfish and 180.000 tons of canned. Table 1 shows the behavior of the fishing chain in Spain.

2. Analysis and results of the Spanish fishing sector

The methodology used for the analysis of the Spanish fishing industry is based on executing the following steps: first, the function of demand for fish products in recent years is established

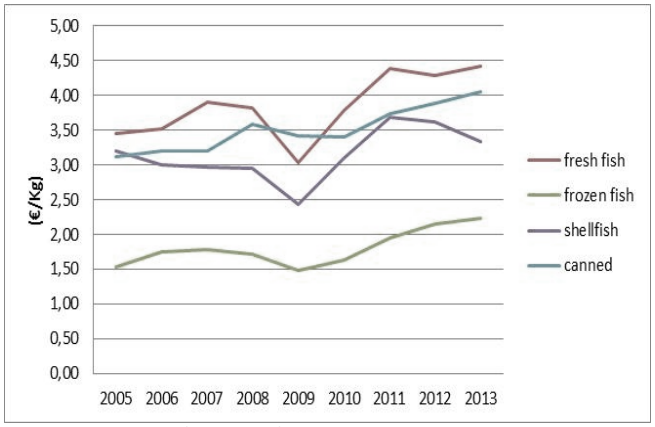


Figure 4. Behavior of exported fish products prices by Spain
Source: Data based on PTEPA platform [6].

Table 1.
Behavior of the productive chain of fishing in Spain.

	Quantity T	Price €/Kg
Catch	785 000	2.2
Aquaculture	267 000	1.6
Import	1'600 000	3.0
Total Income	2'652 000	
Export	983 000	2.6
Spanish market	1'669 000	
Annual consumption	1'242 000	7.0
Annual Inventory	427 000	

Source: Data based on PTEPA Platform [6].

in terms of quantity consumed (thousands of tons) and unit prices (€ per kilogram), is considered the behavior of demand as a normal statistical distribution with a mean "μ" and standard deviation "σ". Second, it is established theoretically, the optimality to produce quantities using game theory and calculating the Nash equilibrium, following the criteria of Cournot and Bertrand models, as well as prices and profits for companies that compete in an oligopolistic market and a poorly differentiated product, with similar sizes. For the calculation of marginal cost, whose indicator value will be lower in the years of this study; the indicator with which you work is the balance point, or minimum production where the company covers its fixed costs

Table 2.
Real demand for fishery products.

Year	Quantity (000 t)	Price (€/Kg)
2004	1.199	6,29
2005	1.219	6,50
2006	1.237	6,92
2007	1.254	7,11
2008	1.250	7,14
2009	1.262	7,43
2010	1.254	6,98
2011	1.230	7,32
2012	1.215	7,29
2013	1.219	7,45

Source: Data based on PTEPA Platform [6].

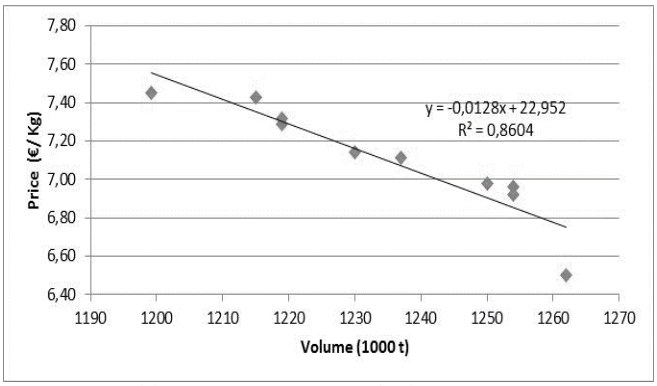


Figure 5. Plot of function adjusted demand for fish products.
Source: The authors.

amount. Third, the production volume and product price is established, taking into account the results obtained in the previous step.

Table 2, presents the actual demand for fish products in Spain, in the last 10 years in terms of volume (thousand tons) and prices (€ per kilogram). It is considered that the behavior of the demand distribution is normal with a mean μ= 1'242.000 tons and σ = 39.000 tons deviation.

If we also consider that product demand is deterministic, that is, that customers know in advance the price of the products, then customers would demand greater amount of product, to the extent that the price is lower. The same way, we can see this situation like an assignment problem and linear programming. The problem of weighted matching in a bipartite graph, otherwise known as the assignment problem, is defined as follows.

An assignment problem consists of:

- A set *N* of *n* agents,
- A set *X* of *n* objects,
- A set $M \subseteq N \times X$, of possible assignment pairs, and
- A function $v: M \rightarrow R$ giving the value of each assignment pair.

Therefore, an assignment is a set of pair $S \subseteq M$ such that each agent $i \in N$, and each object $j \in X$ is in, at most in one pair in *S*. A feasible assignment is when all agents are assigned an object and is optimal if it maximizes:

$$\sum_{(i,j) \in S} v(i,j) \qquad (1)$$

Under these conditions, the demand function is represented in Fig. 5.

The regression line representing the demand function D (p) is given by:

$$D(p) = 22{,}952 - 0{,}0128(Q) \qquad (2)$$

The value of a = 22,952 and b = 0,0128

According to the above, the maximum value would demand the Spanish market 1'293.000 tons of fishery products (μ + 3 σ) at a price of € 6,65 per kilogram. By contrast, the minimum value of tons would demand the Spanish market is 1'175.000 tons of fishery products (μ - 3 σ) at a price of 7,58 euros per kilogram.

To work in a practical way, "using" the concept of Nash equilibrium, it is performed a comparative analysis of the results obtained in the game theory, under the criteria of Cournot and Bertrand is performed. It is only considered the theory of non-cooperative, emphasizing payments, information and the simultaneity of the games. It is assumed that there is a rational decision of players, where their decisions maximize expected utility.

Game theory, describes a set of strategic interactions that include restrictions on the actions of the players, who act as companies competing in a market with poorly differentiated products. Each player proposes a solution within a set of solutions that tends to maximize their profits; game theory suggests reasonable solutions for kinds of games and examines their properties.

Game theory defined as a "bag of analytical tools" designed to help understand the phenomena we observe when market decisions interact. The basic assumption is that the theory assumes that market decisions remain well defined objectives; they are rational and take into account the knowledge and expectation of other decisions according to market performance and strategic rationality [2]. The term of rationality defined as the manner in which the player conducts its elections, i.e. chooses and makes decisions based on reason [3].

With certainty, we have a set of actions

$$A=\{a_1, a_2, a_3, \ldots a_k\} \quad (3),$$

a set of results produced by action

$$X=\{x_1, x_2, x_3, \ldots x_k\} \quad (4)$$

and a function x: $A \rightarrow X$ which states that every action has a single result. An optimal response is defined as a strategy that provides better results than all other possible strategies against a given opponent's strategy:

$$U_{j1(Si,sj)} \geq U_{j1(S,sj)}. \quad (5)$$

Nash equilibrium is defined as a combination of strategies in which each strategy is optimal for another answer. Since the players have no reason to change strategy, this combination of strategies are said to be in balance:

$$U_{j1(Si,sj)} \geq U_{j1(S,sj)} \quad (6)$$

And

$$U_{j2(Si,sj)} \geq U_{j2(Si,S)} \quad (7).$$

Assuming that game theory offers a unique solution to a problem, this, a solution of Nash equilibrium if each player is willing to choose this prediction, which must be the best answer for each player of the alternatives of other players [4]. To set how close the entrepreneurs are from the Spanish fishing sector to Nash equilibrium, we calculate using the Cournot and Bertrand models´ criteria.

2.1. Cournot model for the Spanish fisheries sector

In the Cournot model, the strategies available to each company are the different amounts that they can produce [5]. If a number of companies competing in the market for a homogeneous product, they decide simultaneously the amount of production to bring to market, and the price is the same for all, with equal marginal costs for all "c", regardless of costs fixed, the quantity total produced in Nash equilibrium is given by the equation:

$$Q * (i) = n\left(\frac{(a-c)}{(n+1)b}\right) \quad (8)$$

For the calculation of the total quantity to produce in the optimal Nash equilibrium, the production chain is taken as an integrated business unit, consisting of n = 13.000 units, or companies engaged in fishery, with values a = 22,952 and b = 0,0128, given in the demand function.

The only value that is required to be determined is the marginal cost or "c", which corresponds to the marginal cost of the year which point of balance is the smallest of all the years studied in the capture process, see Table 3.

So, for 2004, where the balance point below was obtained in all the years of this study, the value of the marginal cost is c = 2,377 €/kg.

Table 4, shows that the Cournot model proposes capturing 1'608.000 t of fish, corresponding to the Nash equilibrium value for the 13.000 business units or ships. The selling price "P" is 2, 38 €/kg for a total profit "U" of three million euros.

Table 3.
Balance point in the process of fish capture.

Year	Quantity "Q" (t)	Cost "c" (€/Kg)
2004*	693.552	2,377
2005	1'004.671	2,084
2006	723.969	2,195
2007	958.668	2,060
2008	913.745	2,107
2009	842.683	2,560
2010	718.253	2,371
2011	834.126	2,284
2012	720.400	2,195

Source: Data Based on PTEPA Platform [6].

Table 4.
The Cournot Model of fish capture.

Parameter	Value	Units
n	13.000	
a	22,952	
b	0,0128	
c	2,377	€/Kg
Q*	1'608.000	t
P*	2,38	€/Kg
Income	3.813 mill	€
Expenses	3.810 mill	€
U	3'000.000	€

Source: The authors.

Table 5.
The Bertrand Model for fish capture.

Parameter	Value	Units
n	13.000	
a	22,952	
b	0,0128	
c	2,377	€/Kg
Q*	1'608.000	t
P*	2,377	€/Kg
Income	3.811 mill	€
Expenses	3.811 mill	€
U	0	€

Source: The authors.

2.2. Bertrand model for the Spanish fisheries sector

Firms compete in prices, manufacturing and selling all the quantities that consumers demand at that price. Similarly to the Cournot oligopoly model, the Bertrand equilibrium is the Nash equilibrium of the game defined by Bertrand model. In the Bertrand oligopoly, the market is shared by "n" companies that want to maximize their profits "U"; U1, U2…Un, in that manufacture a homogeneous product and they compete on price. The demand function is given by $q(p)$ for duopoly and is represented as follows:

$$\mathrm{q(pi\,,pj)} = \begin{Bmatrix} 0 \text{ si pi} > \mathrm{pj} \\ \mathrm{q(pi)} \text{ si pi} < \mathrm{pj} \\ \frac{\mathrm{q(pi)}}{2} \text{ si pi} = \mathrm{pj} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

The function determines the sale by the company whose price is lower, so is the same case to oligopoly, where cohabit "n" companies in a competitive market. Selling is done by companies whose prices are lower than the others to cover the demand.

For this model, the Nash equilibrium is a price (pi *, pj *... pn *) that maximizes the value of the other n-1 companies, therefore, the only Nash equilibrium is one in which all companies have decided to establish a price equal to its marginal cost, see Table 5.

Therefore, Bertrand model proposes that all companies would be Nash equilibrium when their selling prices are equal to marginal costs, this means that the perceived revenues are equal to expenditures and that none of the 13.000 business units earn a profit.

3. Pareto optimality for the Spanish fishing sector

If game companies are:

$$G = \{s_{1,}s_{2,} \dots s_{13.000} \; ; \; u_{1,}u_{2,} \dots u_{13.000,}\} \quad (10),$$

where the profile of the companies is

$$S = \{s_{1,}s_{2,} \dots s_{13.000}\} \quad (11),$$

is dominated from Pareto in the profile:

$$S' = \{s'_{1,}s'_{2,} \dots s'_{13.000}\} \quad (12)$$

long as they present the following inequality:

$$Ui(s'_{1,}s'_{2,} \dots s'_{13.000}) \geq Ui(s_{1,}s_{2,} \dots s_{13.000}) \quad (13)$$

for each one business Ei.
It is then said that the strategy profile:

$$S = \{s_{1,}s_{2,} \dots s_{13.000}\} \quad (14)$$

Pareto is optimal if and only if it is not dominated in Pareto by any other profile. We say then that is inefficient in the Pareto if someone else dominates. That is, if a profile is efficient, strategies cannot switch to any other profile, so no company will lose out, neither any company that comes out winning. The concept of domination refers to composite profiles that include the entire group of companies, while the concept of strategy dominated refers to each individual company. While the concept of Pareto efficiency refers to the social or group of companies, the dominant strategy is a concept of individual efficiency of each company.

In the case of companies engaged in the capture of fishery products, if there is a common knowledge through institutions such as the Spanish Technology Platform of Fisheries and Aquaculture PTEPA[6], the Statistical Services of Fisheries, Ministry of Agriculture, Food and Environment MAGRAMA[7], as well as technology centers and Ainia [8], Anfaco- Cecopesca[9], among others; then companies without setting agreements can design an efficient strategy profile that favors them, so that no company will lose out, or that a company does come out ahead, or (achieve) Pareto optimal.

If we want people in our organizations to share what they have learned, we would do well to create the conditions in which the exchange of results gives way to personal benefit. If I share my knowledge, that is, give it to someone else, then we'll both have a common knowledge that is known throughout the organization. Common knowledge, defined as the significant links that people make in their minds between information and its application to action in a specific environment. Linking knowledge to action is a useful way to differentiate information. [10]

4. Conclusions

The first conclusion is that for a great group of enterprises (n= 13.000) who compete in a sector like fisheries, with little differentiation of their products, the results of Cournot and Bertrand models are similar. This means that there are few possibilities to obtain financial gain.

Table 6.
The Pareto optimal for the Spanish fishing sector.

Quantity "Q" (1000 t)	Utility "U" (mill €/Kg)	Probability Normal	Utility Expected "UE" (mill €/Kg)
1.175	7,92	0,00135	9
1.234	7,16	0,50184	3.070
1.274	6,64	0,97892	5.543
1.275	6,63	0,98136	5.545
1.276*	6,62	0,98355	5.546*
1.277	6,61	0,98552	5.545
1.278	6,59	0,98728	5.544
1.293	6,65	0,99865	5.745

Source: The authors.

Given that in Spain 13.000 business organizations are engaged in capture fishery products, if they drive a common understanding of reliable market information, demand for which has a normal and without establishing agreements statistical behavior, they will capture a total of 1'276.000 tons for year to get the maximum benefit, estimated at 5.546 million euros.

According to results obtained by game theory, with Cournot and Bertrand models, and adopting the Pareto optimal solution, the Spanish fleet to catch fish products, each boat should take a daily average installed capacity of 273 kilograms, for maximum economic yield 426.627 euros per year, see Table 6. Enough to provide the average annual demand of product, without having to import products from abroad and with the possibility of exporting the difference to markets with higher profit margin capacity.

In this case, we studied only the catch link of the fished chain, because it is the weakest one, and therefore represents the capacity of the whole chain. The above analysis can be performed for each of the links in the chain of fisheries; the same methodology followed to determine the optimum amount of fish farming products, canning and companies engaged in marketing as well as prices and number of companies to ensure maximum economic efficiency.

References

[1] Shoham, Y. and Leyton-Brown, K., Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. S.1: Cambridge University press, 2008.

[2] Osborne, M. and Rubinstein, A., A course in game theory. MIT press, 1994.

[3] Leriche-Guzmán, C.E. y Caloca-Osorio, O.R., Racionalidad del homo economicus versus racional, visión a través de la teoría de juegos. Análisis Económico, XX(43), pp.101-124, 2005.

[4] Gibbons, R., Un primer curso de teoría de juegos. Antoni Bosch, 1993.

[5] Perez, J, Jimeno, J y Cerda, E., Teoría de juegos. Madrid: Pearson, 2004.

[6] Plataforma española para la pesca y la acuicultura. [en línea] [Citado el 19 de noviembre de 2014.] Barranquilla, Colombia 2014, Disponible en: http//ptepa.org.

[7] Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. [En línea], Barranquilla, Colombia 2014 [Citado el 20 de noviembre de 2014.]. Disponible en: http//magrama.gob.es/es/estadística/temas/estadísticas-pesqueras/pesca-maritima/.

[8] AINIA. [En línea] Barranquilla, Colombia 2014. [Citado el 1 de diciembre de 2014.]. Disponible en: http//www.ainia.es.
[9] Anfaco-Cecopesca. Barranquilla, Colombia 2014 [En línea] [Citado el: 1 de diciembre de 2014.]. Disponible en: http//anfaco.es.
[10] Dixon, N., Common knowledge: How companies thrive by sharing what they know, Harvard Business Press, 2000.
[11] Sanchez y Cuenca, Teoría de juegos. CIS, Madrid, 2009.

C. Luna-Amaya, graduated as BSc. in Industrial Engineering from Universidad Industrial del Santander, Colombia. She recived her PhD. Industrial Management from Universidad Politécnica de Valencia, Spain. She is Teaching half time in the Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, and her main research and teaching activities are related to: industrial management and organization of operations.
ORCID: 0000-0002-3104-5151

W. Nieto-Bernal, is BSc. in Systems Engineer and Sp. in Software Engineering, UIS. MSc of Education University of the North. Master/Expert in Technology Management, Master of Computer Science and PhD in Computer Science, ULPGC-Las Palmas. Extensive experience in project management R&D in the area of information technology and applications, knowledge management organizational models for software development, information architecture on open initiatives International standards for the development of IT solutions.
ORCID: 0000-0003-3615-4629

H. Mercado-Cervera, is BSc. graduated in Industrial Engineering (1989), from the Universidad del Norte, Barranquilla. He worked for Reynolds Aluminum (1986-96), at laminates products. He received his Industrial Engineering PhD. in 2017, from the Universidad del Nort". He is Teaching in the Universidad del Magdalena, Colombia in operations direction, and his work areas are: logistic, production and operations.
ORCID: 0000-0002-7564-8974

J. Pajares-Gutiérrez, is BSc. raduated in Industrial Engineering (1991), from the University of Valladolid, Spain. He worked for the Spanish Oil Company Repsol (1991-96), at the Crude and Commodities Department. He obtained his PhD. in 2001, from the University of the Basque Country. He is teaching in business and economics at the University of Valladolid, Spain, within the research team Social Systems Engineering Group (InSISoc) and his main research and teaching activities are related to: project management, innovation and technology management, agent based modelling of complex socio-economic systems and project and corporate finance.
ORCID: 0000-0002-4748-2496

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Administrativa e Ingeniería Industrial

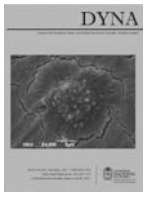
Oferta de Posgrados

Especialización en Gestión Empresarial
Especialización en Ingeniería Financiera
Maestría en Ingeniería Administrativa
Maestría en Ingeniería Industrial
Doctorado en Ingeniería - Industria y Organizaciones

Mayor información:

E-mail: acia_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 02

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Vapor-Liquid equilibria modeling using gray-box neural networks as binary interaction parameters predictor

Eduardo Vyhmeister [a], Jonathan Rodríguez-Pino [b], Lorenzo Reyes-Bozo [b], Rosa Galleguillos-Pozo [c], Héctor Valdés-González [d] & Roman Rodríguez-Maecker [a]

[a] *Departamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas, Armadas ESPE, Extensión Latacunga, Latacunga, Ecuador. eduardo.vyhmeister@gmail.com; rnrodriguez@espe.edu.ec*
[b] *Universidad Central de Chile, Santiago, Chile. jrodriguezp7@gmail.com; lorenzo.reyes@ucentral.cl*
[c] *Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. rosagalleguillos@gmail.com*
[d] *Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile. dr.valdes.gonzalez@gmail.com*

Received: March 21th, 2016. Received in revised form: June 26th, 2017. Accepted: September 18th, 2017

Abstract
Simulations of vapor-liquid equilibrium (VLE) are widely used given their impact on the scale, design, and extrapolation of different operational units. However, due to a number of factors, it is almost impossible to experimentally study each of the VLE systems. VLE simulations can be developed using representations that are strongly dependent on the nature and interactions of the compounds forming mixtures. A model that helps in predicting these interactions would facilitate simulation processes. A Gray Box Neural Network Model (GNM) was created as Binary Interaction Parameters predictors (BIP), which are estimated using state variables and information from pure components. This information was used to predict VLE behavior in mixtures and ranges not used in the mathematical formulation. The GNM prediction capabilities (including temperature dependency) showed an error level lower than 5% and 20% for mixtures considered and not considered in the training data, respectively.

Keywords: Acetone-Alcohol System; Peng-Robinson; Non-Linear Evaluations; ANN prediction.

Modelamiento de equilibrio Líquido-Vapor usando redes neuronales grises como predictor de parámetros de interacción binaria

Resumen
Las Simulaciones de Equilibrio Líquido Vapor (VLE) son ampliamente utilizadas dado su impacto en el escalamiento, diseño y extrapolación de diferentes operaciones unitarias. Sin embargo, dado considerable factores, es casi imposible experimentalmente estudiar cada uno de los sistemas de VLE. La simulación de VLE puede ser desarrollada utilizando representaciones que son fuertemente dependientes de la naturaleza e interacción de los compuestos que conforman la mezcla. Un modelo que ayude en la predicción de esas interacciones facilitará el proceso de simulación. Una Red Neuronal Gris (GNM) fue creada como un predictor de parámetros de interacción binaria, los que son estimados utilizando variables de estado e información de componentes puros. Esta información fue utilizada para predecir el comportamiento de VLE en mezclas y rangos no utilizados en la formulación matemática. Las capacidades predictivas del GNM (incluida la dependencia de temperatura) mostraron errores menores al 5% y al 20% para mezclas consideradas y no consideradas en los datos de entrenamiento, respectivamente.

Palabras clave: Sistemas Acetona-Alcohol; Peng-Robinson; Evaluación no-lineal; predicción ANN.

1. Introduction

Simulations of vapor-liquid equilibrium (VLE) are widely studied and used in the industry, given the impact that simulations have on the unit operations of purification and separation [1]. The design of these unit operations is not possible without estimating equilibrium, where temperature, pressure, chemical nature, and concentrations are correlated

How to cite: Vyhmeister, E., Rodríguez-Pino, J., Reyes-Bozo, L., Galleguillos-Pozo, R., Valdés-González, H. and Rodríguez-Maecker, R., Vapor-Liquid equilibria modeling using gray-box neural networks as binary interaction parameters predictor DYNA, 84(203), pp. 226-232, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

by empirical, semi-empirical and/or phenomenological relationships. The equilibrium between phases is established once there are no observable variations in chemical, thermal, and force potentials between each phase under consideration. The chemical potential equality is normally expressed in terms of fugacities (f) and equalities of each component i in each phase under consideration [2].

At low pressures, the gas phase and the liquid phase fugacities can be represented in function of fugacity coefficients (φ). Both terms, φ_i^V and φ_i^L (fugacity coefficients in the vapor (V) and the liquid (L) phase, respectively) can be expressed by using a suitable Equation of States (EOS), such as Peng-Robinson, van der Waals, Soave-Redlich-Kwong (SRK), among others, and the representation of partial properties (Equation 1):

$$Ln\varphi_i = \frac{1}{RT}\int_{V=\infty}^{V}\left[\left(\frac{\partial P}{\partial n}\right)_{T,V,nj} - \frac{RT}{V}\right]dv - LnZ \qquad (1)$$

In Equation 1, Z is the compressibility factor; the derivative part represents the partial derivative of component i keeping the temperature, volume, and the moles of the other components constant.

Each EOS can hold important information about mixture behavior, such as the Peng-Robinson a_i and b_i coefficients. When mixtures are modelled, mixing rules, which account for molecular interactions, are needed. Equations 2 and 3 show the modified van der Waals mixing rules, where a_m and b_m are the EOS coefficients of mixture and k_{ij} is a temperature dependent binary interaction parameter (BIP) [2]. The BIP holds the dissimilar molecular contribution information needed for mixture representations.

$$a_m = \sum_i^n \sum_j^n x_i x_j a_{ij} \qquad a_{ij} = \sqrt{a_i a_j}(1 - k_{ij}) \qquad (2)$$

$$b_m = \sum_i^n x_i b_i \qquad (3)$$

Artificial Neural Networks (ANNs) are normally used as a predicting tool, where knowledge of phenomenological representations is not important. Nevertheless, due to the huge quantity of internal parameters that may be used in an ANN, over-fitting and poor generalization problems can be observed [3]. A Hybrid Neural Network, also known as Gray-Box Neural Network Model (GNM), can be considered as an improved ANN, which incorporates phenomenological/empirical equations in its architecture. In fact, the GNM can be thought of as a hierarchical network of sub-networks. The sub-networks are assigned to perform small calculations restricted by some physical-chemical constraints, such as mass and energy balances [3]. The incorporation of restrictions not only improves the general prediction of the modified network; it also improves the extrapolation capabilities.

GNMs have been used for a wide gamut of applications, such as fed-batch bioreactors [3], Williams-Otto reactor [4], maximization in methanol conversions [5], wastewater systems [6], and empirical improvement of equations of state [7], among others.

Regarding VLE, classical ANNs have been applied to determine pressure (P) – temperature (T) – liquid (x_i) or vapor (y_i) molar fractions relationships at equilibrium [8-12]. A different approach was proposed by Urata et. al. [13]. In their work, activity coefficients were estimated by separating the calculation in two independent ANNs and using pure component data as ANN input information: the normal boiling point divided by molecular weight, critical density, and dipole moment. Even though the estimations showed low deviations, thermodynamic inconsistencies were observed. Ramírez et al. [14] developed an ANN capable of determining the four-suffix Margules parameters. The ANN training was performed using a group-contribution methodology where the ANN input variables were the number of interactions between different functional groups, the pressure, the temperature, the functional group quantities, the molecular weights, and the mole fractions. The proposed methodology represented the VLE correctly, but their results showed local minimum issues.

In the present work, a methodology that incorporates a suitable EOS (Peng-Robinson Equation of State; PR-EOS) in the formulation of a GNM is presented in order to predict the VLE. Specifically, the aim of this work is to determinate binary interaction parameters by using pure component data and an EOS represented in a neural-network-like structure. Additionally, in order to achieve the main objective, common activation functions were replaced by complex mathematical formulations (including iterative estimations). The last modification can be seen as a methodology to improve the applicability of GNMs. Simple hydrocarbons mixtures were considered for the GNM evaluation. VLE information was used for GNM training, VLE extrapolation, and binary interaction parameters prediction. The GNM predicted binary interaction parameters, extrapolated VLE information (with deviations on average lower than 5%) and, to a certain degree, determinate VLE of mixture not considered in the GNM training (deviations on average lower than a 20%).

2. Materials and methods

In the Present work, Matlab 7.1 was used as simulator. This version was used given its simplicity at the moment of modifying ANN/GNM functions and parameters (activation functions, transfer function, and training process methodologies). The embedded ANN toolbox was used in the programming. For a proper and simpler creation/evaluation of the GNM, VLE data from binary systems (Acetone-Butanol at 99.46 kPa [15], Acetone-Ethanol at 101.33 kPa [16], and Acetone-Methanol at 13.33 kPa [17]) were used. The data was composed of y_i-x_i-P-T information and the boiling points, molecular weight, molecular diameter, critical pressure, critical temperature, and acentric factor of each component. Furthermore, since VLE information for the three systems is limited in the literature, interpolation of the y_i-x_i-P-T data was performed (by using the PR-EOS and a lineal correlation temperature dependency of the predicted BIP) in order to obtain 500 total data points useful for training and validation of the GNM.

3. Thermodynamic modeling

As previously specified, the PR-EOS (Equation 6, where a

and *b* are adjustable parameters) was used in the formulation of the GNM. Different EOS could have been used; nevertheless, the PR-EOS was chosen for its simplicity (parameters determination from critical properties and acentric factor) and improved representation of some liquid properties [18].

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (4)$$

As extensively described in the literature, for a pure component, both parameters can be determined by using critical properties and temperature corrections.

By combining equations 1 and 4, the fugacity coefficient for the liquid phase can be calculated (Equation 5) where, Z_{liq} is the compressibility factor of the liquid phase. The expression for the vapor phase fugacity coefficient is similar to Equation 5, but representative values of the vapor phase have to be used (i.e. Z_{vap}, V_{vap}, and y_i; [2]).

$$Ln(\varphi_i) = \frac{b_i}{b_m}(Z_{liq}-1) - Ln\left[Z_{liq}\left(1-\frac{b_m}{V_{liq}}\right)\right] + \frac{a_m}{2.828RTb_m}\cdot\left(\frac{b_i}{b_m} - \frac{2}{a_m}\sum x_i a_{ij}\right) Ln\left(\frac{1+2.414\frac{b_m}{V_{liq}}}{1-0.414\frac{b_m}{V_{liq}}}\right) \quad (5)$$

The previous equation needs the gas or liquid phase compressibility factor, which is obtained from the PR-EOS cubic expression (Equation 6; [2]). In Equation 6 *A* is equal to a_mP/R^2T^2 and *B* is equal to b_mP/RT.

$$Z^3 - (1-B)Z^2 + (A-2B-3B^2)Z - (AB-B^2-B^3) = 0 \quad (6)$$

4. Gray box neural modeling

The theory behind artificial neural networks will not be thoroughly discussed here; more information can be found in references [19-20]. As mathematically proven by Cybenko and Hornik et al. [21-22], a Feed-Forward-Neural-Network (FFNN) with a single hidden layer can approximate, with a high degree of accuracy, any non-linear function. Even though ANNs can correctly approximate non-linear functions, they are classified as data-based models, which imply that the prediction is based on specific data sets. The use of data sets allows good estimation of variables inside the same data set limits, but extrapolation cannot fully be trusted given the lack of boundary restrictions.

GNMs, on the other hand, have proved to reduce the previous problems by embedding phenomenological equations in a Neural-Network-like architecture. In this architecture, the ANN focuses on phenomenological parameter determination while the phenomenological equation helps in the extrapolation, interpolation and/or boundaries application (recognized as series configuration). Further benefits, such as the reduction of neural internal parameters, better starting points for training, reduction of over-fitting, improved network adaptation, and improvement in generalization have been observed [3].

5. PR-EOS gray box neural model generation

The first step in the GNM creation is the architecture definition. Fig. 1 shows the PR-EOS GNM architecture. As defined in this work, and observed in Fig. 1, different artificial neurons (circles) are interconnected at different levels in order to create a neural architecture specific for the problem formulation. The dashed box in Fig. 1 represents an embedded ANN, which is a classical ANN that possesses one Input Layer, one Hidden Layer (HL), and one Output Layer (OL). The embedded ANN, which possesses parameters that have to be estimated during the training process, has a FFNN architecture. The number of parameters has to be optimized in order to produce a useful output; that means, to define the most suitable number of neurons in the hidden layer to generate the binary interaction parameters (10 neurons in the HL in the present work with Hyperbolic Tangent Sigmoid as transfer function; this number was obtained by finding the minimum number of neurons in the HL that produce an unaffected goodness-of-fit statistics). It must be highlighted that the training process is performed by the back propagation technique; therefore, no BIPs are needed in order to perform the training independently of the embedded ANN estimate output (the BIP). By considering the defined architecture, the VLE information (which is the global output) will be transformed as it is back propagated in the GNM to estimate the BIPs. The input information of the embedded ANN was chosen based on pure component information and the recognition that the embedded ANN outputs are a function of the temperature. The selection of different inputs can be modified easily. In fact, to estimate binary interaction parameters, an optimization process of the input information could be performed in order to determinate the most suitable pure component and/or group contribution data useful to obtain the best non-linear mathematical representation. In the present work, the embedded ANN Input information are the pressure, temperature, boiling points (BP_i), molecular weights (MW_i), and molecular diameters (MD_i) of each component *i* in the mixture.

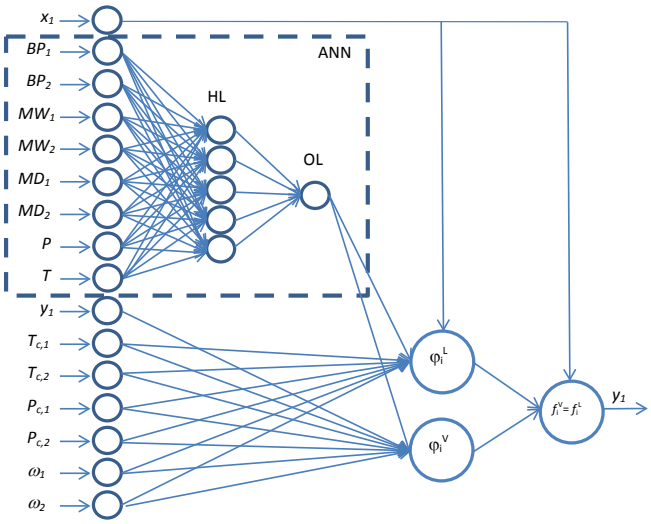


Figure 1. Architecture definition of the PR-EOS GNM (to avoid an unclear representation, only 5 neurons have been represented in the HL).
Source: The Authors.

The embedded ANN output is defined in the architecture by a proper representation of the phenomenological equation in a neural-network-like architecture. In a GNM, different mathematical operations must be used to fully represent the phenomenological equation. Mathematical operations, other than classical ANN operations (such as roots, logarithms, exponentials, among others), can easily be programmed by specifying the mathematical expression in a neuron transfer function or in a neuron activation function.

Following the Fig. 1 architecture, once the embedded ANN calculation is performed (k_{ij}), the information is forwarded to two neurons (φ_i^L and φ_i^V) followed by a third neuron (equal fugacity that estimate y_i). The most important characteristics of these neurons are:

- Each input signal is unweighted (weight equal to 1). The weights are kept constant during the GNM creation by modifying the training algorithms (the values of the weights are restored after the modifications performed by the Levenberg-Marquardt Backpropagation training process).
- The identity transfer functions are used in each neuron. Therefore, each neuron output is the evaluation of the activation function, where the bias was set to 0.
- The activation functions are replaced by a set of equations rather than one equation. The set of equations allows the estimation of fugacity coefficients (as described from Equation 1 to Equation 6) or the vapor phase mole fraction (obtained by fugacity equality, $\varphi_i^L x_i / \varphi_i^V = y_i$). The inputs of a neuron, in the phenomenological representations, are useful variables for the full estimation of important parameters/variables of the VLE representation.

Both neurons φ_i^L and φ_i^V are representation of Equation 5, where the information of k_{ij}, critical properties of each component (P_{Ci}, T_{Ci}), acentric factor of each component (ω_i) , and mole fractions (y_i or x_i, depending on the phase that is intended to be represented) are used as feed to the neurons. Additionally, in the same neuron the mixing rules are used to estimate a_m and b_m, and the PR-EOS in its cubic form, to estimate Z_{liq} or Z_{vap}. The estimation of both compressibility factors was performed by the software by evaluating the cubic equation roots. For the estimations of fugacity coefficient, the higher root was used for the gas phase, while the lower root was used for the liquid phase. After the estimation of both fugacity coefficients, the VLE is calculated by the neuron $f_i^V=f_i^L$ which corresponds to the equilibrium representation. Specifically, in this neuron, the inputs are the liquid and vapor fugacity coefficients of component 1 (in a binary system) and the molar fraction of the liquid phase. By using the equilibrium representation, the molar fraction of component 1 in the gas phase is estimated. The y_i information is used as feed and estimated as output in the GNM. Independent of this recursive architecture, it must be kept in mind that the main objective is to find an embedded ANN able to determinate binary interaction parameters with phenomenological restrictions (EOS).

Once the architecture was specified, the GNM training was performed together with the optimization of the number of neurons in the HL. The training process corresponds to the determination of the ANNs internal parameters (weights and bias of each neuron) by performing sensitivity analyses on an objective function, which is optimized by different methods. After calculation of the new weights, the fixed GNM weights were restored to their values by using a modified version of the Matlab algorithm (*trainlm*).

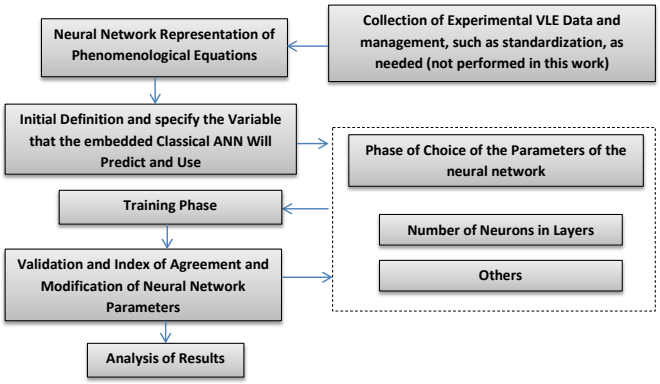


Figure 2. Procedure for PR-EOS GNM modeling
Source: Adapted from [23]

As a methodological resume of the GNM creation, Fig. 2 is incorporated. This figure could help to better understand the creation process and to use it in the case that other VLE representations are intended to be used. The dashed line box represents the typical process of the classical ANN parameters selection, which could include selection of neural network type, number of hidden layers, training algorithm selection, activation function, and others [24]. In the present work only the number of neurons in the hidden layer was modified as an improvement parameter.

6. Results

Fig. 3 and Fig. 4 shows the results obtained (estimations of y_i values, represented in y_i-x_i-T graphs) by applying the GNM after being trained with the VLE data sets of different Acetone-Alcohol mixtures at different pressures. Fig. 3 shows the full data set used for training (bold curves) and, at the same time, the prediction capabilities of the y_i values (fixed x_i) for conditions not used during training (dashed lines). It can be observed that the tendency of VLE acetone-ethanol mixture was properly estimated by the GNM in the range where the data set information was not included in the training process. Of course, the embedded ANN performs calculations of the binary interaction parameters which were fed to the PR-EOS and the different formulations previously described.

Fig. 4 focuses on the predicted values representation and compares specific experimental data (van Winkle, 1956) with those estimated by the presented methodology. The lines are used as references and do not represent experimental values. As observed in the figure, there is a tendency to obtain higher deviations of the gas phase representation (y_i) as the concentration is closer to the equimolar mixture range (i.e. at the higher contribution of the a_{ij} parameter). Even though the error is considerable under these conditions, the error was lower than 10% and on average, the deviation was lower than 5%.

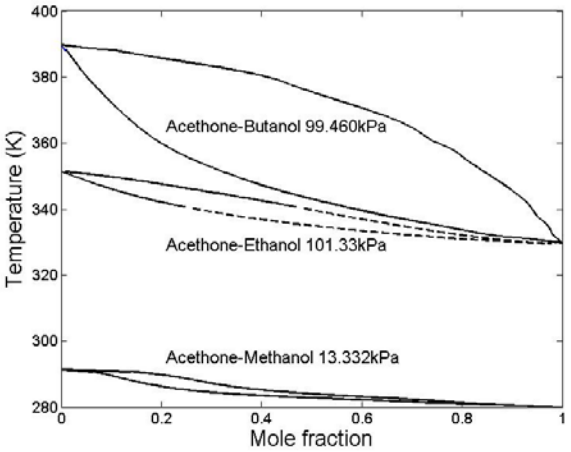


Figure 3. VLE Equilibrium; Training data (Bold Curve) and estimated data (dashed line).
Source: The Authors

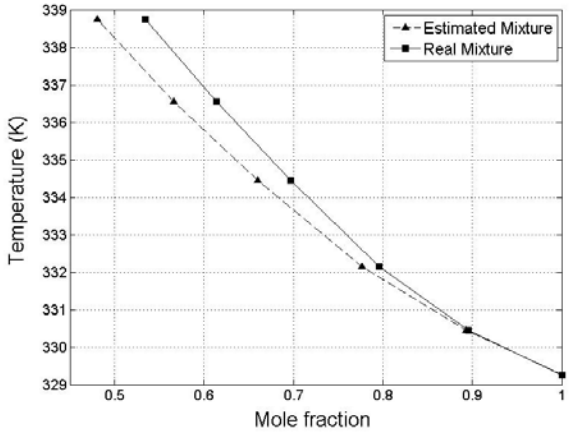


Figure 4. Differences between predicted values and experimental values.
Source: The Authors

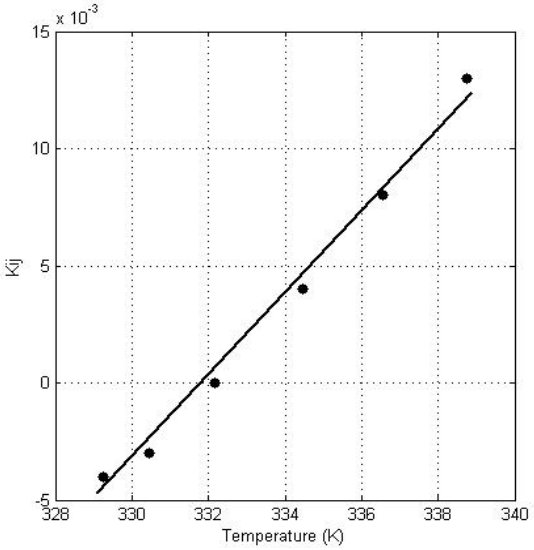


Figure 5. Binary interaction parameters predicted by GNM in the Acetone (1)-Ethanol (2) mixtures (x1=0.316, y1=0.534, T=338.75; x1=0.414, y1=0,614, T=336.55; x1=0.532, y1=0.697, T=334.45; x1=0.691, y1=0.796, T=332.15; x1=0.852, y1=0.896, T=330.45; x1=y1=1, T=329.25).
Source: The authors.

One of the main objectives of the present work was to predict, from pure component data, binary interaction parameters. Fig. 5 shows the obtained k_{ij} parameters as a function of temperature, where the line is added to describe the effect of temperature on the BIP (slope of 0.0018). As observed in the figure, the binary interaction parameter (which ranges between -0.004 to 0.013) describes a linear functionality with temperature. The values describe a relatively similar interaction between even molecules and uneven molecules (i.e. relatively low k_{ij}).

The prediction capabilities were analyzed by the Index of Agreement (IA; [24]); see Equation 7. In Equation 7 O_i and P_i are the observed and predicted output values; n is the total number of data; and $p_i'=p_i - o_m$ and $o_i'=o_i - o_m$ are the differences between the mean value of the observations (o_m) and the predicted and observed output values, respectively.

$$\mathrm{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i'|+|O_i'|)^2} \quad (7)$$

Once the previous equation was applied to the predicted values of known mixtures (Acetone-Ethanol; Dashed Line of Fig. 4) the Index of Agreement found was equal to 0.988, which implies a considerable agreement (higher than 95% of accuracy) for the total estimations performed for the system under consideration.

The prediction capability of the system was further analyzed by evaluating a mixture of components not used in the training data. The mixture Methanol (1) – Ethanol (2) at 101.33 kPa, 348.15 K, x_1=0.242 and y_1=0.326 [16], was compared with the predicted values. As evaluated, an error of approximately 18% was obtained with a predicted k_{ij} value of -0.016. This number indicates that there is a lack of the GNM representing capability. Of course, there is no alcohol-alcohol pair used in the training set; therefore a reduction in the prediction capability was expected.

Once comparing the GNM results with other works that have used ANN for predicting VLE, a relatively similar performance of the present GNM was observed. Si-Maussa et al. [23] focused in the VLE prediction of carbon dioxide–esters mixtures and reported Absolute Relative Deviations in the order of 4.95% and 0.19% for pressure and mole fraction estimations, respectively. Similarly, Karimi and Yousefi [25] studied a VLE of four binary refrigerant systems. In their work, medium average errors as high as 5.15% were observed for mole fraction estimations. In both of the previously mentioned manuscripts, comparisons with EOS were performed. In both works it was observed that the ANN performed better than the EOS. In the present manuscript this comparison cannot be performed since the prediction is embedded in the EOS and therefore the errors that the EOS models have intrinsic in their representations are passed to the GNM results. Furthermore, in both mentioned works the focuses have been interpolating data. In the present manuscript extrapolations at other ranges of the system conditions and mixtures were performed. Is in these points that present work makes an important difference since, by predicting binary interaction parameters instead of VLE data the network could be used (if considerable input data is used during training) to not only interpolate within input data

mixtures, it could be used to predict non input mixtures behaviors.

7. Conclusion

A methodology to estimate binary interaction parameters was implemented in this work. A GNM was used, in which the PR-EOS was formulated in a neural-network-like architecture in order to limit and improve the prediction capabilities of an embedded ANN. The embedded ANN focuses on estimate binary interaction parameters useful in the representation of VLE. As observed in the results, the generated GNM successfully represented the VLE of mixtures used in the GNM training (deviations on average were lower than 5%) and was able to estimate the temperature dependence of the binary interaction parameters.

Further evaluation of the GNM, with mixtures not used during training, showed a lower VLE prediction (i.e. k_{ij}). This lower prediction capability (deviations in the order of 20%) was explained by a lack of representability of the system (non-alcohol-alcohol pair used during training) and the need to define the most suitable parameters that should be used as input in the embedded ANN in order to improve the prediction capabilities of the GNM.

Additionally, an innovative methodology to incorporate non-linear evaluations in a neural-network-like architecture was developed. As far as the authors are aware, additive and multiplicative evaluations have mainly been used as transfer/input functions. The possibility of incorporating polynomial expressions and other mathematical expressions could improve and extend the use of GNM in more complex phenomenological/empirical representations.

In terms of the Peng-Robinson EOS, the present methodology will be limited by the same restrictions as the Peng-Robinson possesses. Nevertheless, a gamut of possible modifications can be foreseen that could improve the applicability of the presented work. For example, the methodology could be extended by using considerable data sets during the training; using an increased number of parameters as feed to the embedded ANN in order to improve the prediction of BIPs; incorporating group contribution methods in the estimation; considering activity coefficients for the liquid representations; using other EOS; using Gibbs Excess Free Energy representations in neural network-like architecture; and/or incorporating long- and medium-range interactions (ionic in nature), among others. In summary, a powerful and simple tool for the estimation of state variables and VLE information was developed. The authors hope that this developed tool generates a significant impact on decision-making and is well received by industry and academia.

References

[1] Prausnitz, J.M., Lichtenthaler, R.N. and de Azevedo, E.G., Molecular thermodynamics of fluid-phase equilibria. Pearson Education, 1998.

[2] Hadi, J.A., Hadi, J.G., Najmuldeen, G.F., Ahmed, I. and Hasany, S.F., Gas-liquid equilibrium prediction of system CO2-aqueous ethanol at moderate pressure and different temperatures using PR-EOS. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly/CICEQ, 19(3), pp. 339-346, 2013. DOI: 10.2298/CICEQ120324067H.

[3] Psichogios, D.C. and Ungar, L.H., A hybrid neural network -first principles approach to process modeling. AIChE Journal, 38(10), pp. 1499-1511, 1992. DOI: 10.1002/aic.690381003.

[4] Cubillos, F.A., Acuña, G. and Lima, E.L., Real-time process optimization based on grey-box neural models. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 24(3), pp. 433-443, 2007. DOI: 10.1590/S0104-66322007000300012.

[5] Alavi, M., Jazayeri-Rad, H. and Behbahani, R.M., Optimizing the feed conditions in a dimethyl ether production process to maximize methanol conversion using a hybrid first principle neural network approach. Chemical Engineering Communications, 201(5), pp. 650-673, 2014. DOI: 10.1080/00986445.2013.782294.

[6] Anderson, J.S., McAvoy, T.J. and Hao, O.J., Use of hybrid models in wastewater systems. Industrial and Engineering Chemistry Research, 39(6), pp. 1694-1704, 2000. DOI: 10.1021/ie990557r.

[7] Bravo-Sánchez, U.I., Rico-Martinez, R. and Iglesias-Silva, G.A. Improvement of the empiricism in the BACK equation of state via hybrid neural networks. Industrial and engineering chemistry research, 41(15), pp. 3705-3713. 2002. DOI: 10.1021/ie010773b

[8] Mohanty, S., Estimation of vapour liquid equilibria of binary systems, carbon dioxide–ethyl caproate, ethyl caprylate and ethyl caprate using artificial neural networks. Fluid Phase Equilibria, 235(1), pp. 92-98, 2005. DOI: 10.1016/j.fluid.2005.07.003.

[9] Nguyen, V.D., Tan, R.R., Brondial, Y. and Fuchino, T., Prediction of vapor–liquid equilibrium data for ternary systems using artificial neural networks. Fluid phase equilibria, 254(1), pp. 188-197, 2007. DOI: 10.1016/j.fluid.2007.03.014

[10] Karimi, H. and Yousefi, F., Correlation of vapour liquid equilibria of binary mixtures using artificial neural networks. Chinese Journal of Chemical Engineering, 15(5), pp. 765-771, 2007. DOI: 10.1016/S1004-9541(07)60160-8.

[11] Ganguly, S., Prediction of VLE data using radial basis function network. Computers and Chemical Engineering, 27(10), pp. 1445-1454, 2003. DOI: 10.1016/S0098-1354(03)00068-1

[12] Faúndez, C.A., Quiero, F.A. and Valderrama, J.O., Correlation and prediction of VLE of water+ congener mixtures found in alcoholic beverages using an artificial neural network. Chemical Engineering Communications, 198(1), pp. 102-119, 2010.

[13] Urata, S., Takada, A., Murata, J., Hiaki, T. and Sekiya, A., Prediction of vapor–liquid equilibrium for binary systems containing HFEs by using artificial neural network. Fluid Phase Equilibria, 199(1), pp. 63-78, 2002.

[14] Ramírez-Beltrán, N.D., Vallés, H.R., Estévez, L.A. and Duarte, H., A neural network approach to predict activity coefficients. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 87(5), pp. 748-760, 2009.

[15] Michalski, H., Michalowski, S., Serwinski, M. and Strumillo, C., Vapor-liquid equilibria for the system acetone-n-butanol. Zeszyzy Nau/1: Politech. Lodz. Chem, 10, pp. 73-84, 1961.

[16] Amer, H.H., Paxton, R.R. and Winkle, M.V., Methanol-ethanol-acetone. Industrial and Engineering Chemistry, 48(1), pp. 142-146, 1956.

[17] Fordyce, C.R. and Simonsen, D.R., Cellulose ester solutions. Industrial and Engineering Chemistry, 41(1), pp. 104-111, 1949.

[18] Peng, D.Y. and Robinson, D.B., A new two-constant equation of state. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 15(1), pp 59-64, 1976.

[19] Kosko, B., Neural networks and fuzzy systems: A dynamical systems approach to machine intelligence/book and disk. Vol. 1 Prentice hall, 1992.

[20] Haykin, S. and Network, N., A comprehensive foundation. Neural Networks, 2004.

[21] Cybenko, G., Approximation by superpositions of a sigmoidal function. Mathematics of Control, Signals and Systems, 2(4), pp. 303-314, 1989.

[22] Hornik, K., Stinchcombe, M. and White, H., Multilayer feedforward networks are universal approximators. Neural Networks, 2(5), pp. 359-366, 1989.

[23] Si-Maussa, C., Nanini, S., Derriche, R., Buhedda, M. and Bauzidi, A., Prediction of high-pressure vapor liquid euilibrium of six binary systems, carbon dioxide with six esters, using and artificial neural network model. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 25(1), pp. 183-199, 2008.

[24] Willmott, C.J., Robeson, S.M. and Matsuura, K., A refined index of model performance. International Journal of Climatology, 32(13), pp. 2088-2094, 2012. DOI: 10.1002/joc.2419.
[25] Karim, H. and Yousefi, F., Correlation of vapour liquid equilibria of binary mixtures using artificial neural networks. Chinese Journal of Chemical Engineering, 15(5), pp.765-771, 2007. DOI: 10.1016/S1004-9541(07)60160-8.

E. Vyhmeister, has a PhD. in Chemical Engineering obtained at the University of Puerto Rico, Puerto Rico, 2008. Since obtaining his doctorate, Dr. Vyhmeister has focused his work on modelling and optimizing industrial processes. Additionally, Dr. Vyhmeister has focused on different areas related with Chemical Engineering, such as process scaling, kinetic analysis, thermodynamic modelling, among others. Currently Dr. Vyhmeister is working as researcher and academic of the Mechanical and Energy department at the Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador.
ORCID:0000-0003-1922-2706

J. Rodríguez-Pino, received the Bsc. in Automatization and Robotics Engineering in 2014 at the Universidad Andres Bello, Santiago, Chile. Currently he is working in the industry in industrial automatization areas.
ORCID: 0000-0002-3186-4747

R.N. Rodríguez-Maecker, completed his PhD. degree in natural sciences at the Duisburg University, Germany, in 2005. Since 2006, he has focused on different innovative works that have considerable incidence on methodologies of natural compounds processing in Ecuador. Nowadays Dr. Rodriguez-Maecker is the Director of the Petrochemical Engineering Career at the Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, where he still focuses on the development of innovative use of natural resources in Ecuador.
ORCID:0000-0003-1773-402X

R. Galleguillos-Pozo, completed her MSc. degree in Industrial Engineering in 2010, at the Universidad de Santiago de Chile, Chile. Since 2012, she has been a Full time Professor and Researcher in the Engineering Faculty of different institutions. As researcher she has worked on programs and projects focused on the industrial strategic planning, with emphasis on heuristic methodologies based on analysis network processes (ANP). Her research interests include: uses strategies and application of analytical process networking strategy maps and Balanced Scorecard. Currently, Rosa Galleguillos-Pozo is working full time at the Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
ORCID:0000-0003-1316-5835

L. Reyes-Bozo, completed his MSc. and PhD. degrees in Engineering Sciences in 2006 and 2011, respectively, both of them from the Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile. Since 2008, he has been a full professor and researcher in the Engineering Science Department, Universidad Andrés Bello. He has worked on programs and projects in the mining field, with emphasis on environmental management. His research interests include: use of industrial ecology strategies and cleaner production concepts in industrial process; assessment of biodegradable substances as froth flotation agents to concentrate sulfide ores; modeling, simulation and process control. Dr. Reyes-Bozo is currently working at the Universidad Central de Chile as Director of Research.
ORCID:0000-0002-4523-0139

H. Valdéz-González, completed his Bsc. and MSc. at the Universidad de Santiago de Chile. He obtained his PhD degree in robotics and automatization at the University of Joseph Fourier, LAG, France. Dr. Valdéz-Gonzalez is currently working at the Universidad Central de Chile, Chile, and has dedicated his work to modeling and control of processes.
ORCID: 0000-0002-3754-6862

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
de Sistemas e Informática

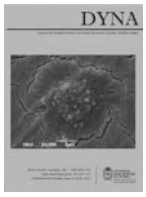
Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas
Especialización en Mercados de Energía
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas
Doctorado en Ingeniería- Sistemas e Informática

Mayor información:

E-mail: acsei_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5365

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Fast estimation of chlorophyll content on plant leaves using the light sensor of a smartphone

Daniel Gaviria-Palacio [a], Juan José Guáqueta-Restrepo [a], Daniel Mauricio Pineda-Tobón [b] & Juan C. Pérez [b]

[a] *Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. dgaviriap@unal.edu.co, jjguaquetar@unal.edu.co*
[b] *Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ptdanielm@unal.edu.co, jcperez@unal.edu.co*

Received: April 25th, de 2017. Received in revised form: October 10th, 2017. Accepted: October 20th, 2017

Abstract
Plant chlorophyll measurements can support nitrogen fertilization decisions. Using a 3D printed device and a red LED, here we tested the feasibility of using a smartphone ambient light sensor (ALS) to estimate leaf chlorophyll by light transmission. Its performance was evaluated by comparing 30 leaf sorghum (S*orghum bicolor* (L.) Moench) transmission readings of the red LED (663 nm) obtained from the smartphone and a standard spectrometer, which showed a good coefficient of determination ($r^2 = 0.9067$). Additionally, a comparison between the ALS and a SPAD 502™ (a commercial device for chlorophyll content estimation) was made with chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev) leaves, obtaining a good correlation between both measurements. Light transmission was also measured in *S. bicolor* flag leaves from plants growing in the greenhouse under increasing nitrogen fertilization. A clear fit between leaf light transmission and plant height was also observed, suggesting a simple, smartphone based estimation of plant's chlorophyll.

Keywords: Plant nutrition; non-destructive chlorophyll meter; leaf light transmittance.

Estimación rápida del contenido de clorofila en hojas usando el sensor de luz de un teléfono celular

Resumen
Medir clorofila puede apoyar decisiones de fertilización nitrogenada de plantas. Usando un dispositivo impreso en 3D y un LED rojo, aquí probamos la factibilidad de usar un teléfono celular para estimar clorofila por transmisión de luz. Al comparar 30 lecturas de trasmisión de luz roja (663 nm) por hojas de sorgo S*orghum bicolor* (L.) Moench, obtenidas del teléfono y de un espectrómetro estándar, se encontró un buen coeficiente de determinación ($r^2 = 0.9067$). Adicionalmente, se hizo una comparación entre las lecturas del teléfono y un SPAD 502™ (un dispositivo comercial para la estimación del contenido de clorofila) en hojas de crisantemo *Dendranthema grandiflora* Tzvelev, obteniendo una buena correlación entre ambas medidas. La transmisión medida en hojas de *S. bicolor* de plantas de invernadero fertilizadas con nitrógeno también presentó buen ajuste con la altura de las plantas, sugiriendo la posibilidad de estimar fácilmente el contenido de clorofila en hojas usando teléfonos inteligentes.

Palabras clave: Nutrición vegetal; medición no destructiva de clorofila; transmisión de luz por hojas.

1. Introduction

Chlorophyll measurement in plants is widely used to monitor and control agricultural [1] and environmental processes [2]. Chlorophyll meters are mainly based on the analysis of fluorescence emissions [3], the transmission of specific light bands by leaves [4] or the analysis of leaf color in digital images. These images may come from devices such as cameras in smartphones [5] or from more sophisticated devices such as Google glasses, which send images through the internet to further receive chlorophyll related values from a remote server [6]. Because of the high correlation with nitrogen content, chlorophyll content is also used to address the nutritional status of N (nitrogen) in plants [7].

Analyses of leaf images from green or red channels are often used, since blue light can be also be absorbed by plant

How to cite: Gaviria-Palacio, D., Guáqueta-Restrepo, J.J., Pineda-Tobón, D.M. and Pérez, J.C., Fast estimation of chlorophyll content on plant leaves using the light sensor of a smartphone DYNA, 84(203), pp. 233-239, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

pigments other than chlorophyll. However, that approach can no longer be supported under the light of new discoveries. For example, blue colored leaves in begonia plants use green light bands that many other plants reflect [8]. Similarly, plant leaves can exhibit adaptations depending on the intensity of the light to which they are exposed, which result in differential reflectance [9] and would generate unexpected variations in the intensity of light reflected by leaves and hence in their images.

Plant growth is highly dependent on nitrogen availability, but excessively used it is responsible for greenhouse gas emissions and environmental concerns [7]. Therefore, the real access to devices for rapid assessment of plant nutritional status to further assist fertilizer decisions use are worldwide needed.

Because of the adsorptive properties of light by chlorophyll, leaf light transmission measurements are already used by portable chlorophyll meters. For example, the SPAD 502™ (Minolta) measure two leaf transmitted light bands centered at 650 and 940 nm, and its readings, then the so called SPAD numbers, are used to estimate nitrogen content in plants [10]. However, its cost can limit their use to well-funded farmers and laboratories. In any case, in order to maximize plant growth and reduce environmental concerns, the application of nitrogen should take into account the plant nitrogen status [11], which will be reached only by increasing the access of farmers to affordable and easy to use nitrogen meters.

Since instruments to diagnose plant nitrogen are based on well-established leaf transmittance properties [12] and light meters are already available in several types of mobile devices. Here we propose to use the smartphone light sensor to measure leaf chlorophyll content, along with the fact that chlorophyll in plant leaves results in great absorption of light in a band around 680 nm [13,15], this band is also absorbed by leaves and senescent fruits [16] and is commonly registered in almost any paper assessing visible light absorption by plant leaves.

This proposal is also supported by the well stablished association between chlorophyll and nitrogen concentration on leaves.

By using the light sensor on a smart phone, along with 3D printed accessories, we present a potentially new perspective to determine leaf chlorophyll content in a noninvasive way. The system is cheap and simple, and can be used directly in the field in remote locations with minimal training. The comparison of light transmission by leaves, obtained using the smartphone, the SPAD 502™ and the FLAME™ spectrometer readings, along with measurements in nitrogen supplemented plants indicate that this system has the potential to accurately estimate the content of leaf chlorophyll, and therefore the nutritional status of plants.

2. Materials and methods

The general approach consisted in obtaining reference transmission spectra from sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) plant leaves using a standard fiber optic spectrometer, in order to detect minimum transmission red bands, commonly linked to chlorophyll absorbance by intact leaves. Then, we picked a LED (light-emitting diode) with an emitting band peaking around the minimum red band transmission by these leaves. To obtain values of light transmission through plant leaves, two adapters were designed using the free software OpenScad, and further printed on a ROBO™ 3D printer using PLA (polylactic acid) filament. One of these adapters allowed to locate the leaves between a light source and the optical fiber coupled to the detector of a spectrometer. Another accessory allowed the positioning of a plant leaf between the ambient light sensor of the smartphone and the red emission LED (Fig. 1).

2.1. Relative performance of the smartphone light sensor compared to a fiber optic spectrometer and a gold standard SPAD 502™ chlorophyll meter

To evaluate the performance of the smartphone, the light transmission readings obtained from sorghum leaves were followed by the readings of the FLAME™ spectrometer (Ocean Optics Inc.) at the same leaf spot. These 663 nm LED transmission measurements were taken on 30 random points marked in the borders on different leaves. To further gain confidence on the performance of the smartphone based meter, 20 paired measurements on leaves of field grown chrysanthemum plants (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev (*cv* Maisy)) were also obtained from a SPAD 502™ chlorophyll meter and from the smartphone.

2.2. Light transmission by sorghum leaves and red LED emission

The red LED was hereafter powered by a 5V external source and its emission spectra was measured using a FLAME™ (Ocean Optics Inc.) spectrometer with a spectral sensitivity from 350 to 1000 nm and a grating #3 (groove density 600). To measure the overall light transmitted by the leaves, the free app Physics Toolbox Sensor [17] was installed on a Samsung Galaxy Note 3Neo smartphone, which according to this application, is equipped with an environmental light sensor TMD27723 (AMS Corp.) [18]. It shows a spectral response between 300 and 1100 nm, and the readings between 300 and 700 nm are barely affected by temperature values between 5 and 75°C.

2.3. Soils, plant material, and data presentation

The experiment was conducted with plants grown under a polycarbonate roof in 232 cm^3 pots for 64 days, and were amended (treatments) with increasing levels of biofertilizer (Abonaza™ g kg^{-1} soil): 0; 1.5; 3.0; 6,0 or 12. The soil consisted of a pooled mixture of low fertility soil subsamples representative of a large coffee producing area at the south west of Antioquia, Colombia, and is not representative of a particular taxonomic group. Relevant soil properties indicated values as follows: pH 4.6; CE (dSm^{-1}) 0.08; OM (%) 2.7; Al, Ca, Mg and K ($cmol_c$ kg^{-1}) 1.8, 1.6, 0.78 and 0.21 respectively; P, Fe, Mn, Cu, Zn, B (mg kg^{-1}) 5, 51, 15, 1, 1 and 0.1 respectively. Additionally, lighting or temperature were not controlled, and these growth conditions are the ones naturally prevailing in the campus of "Universidad Nacional

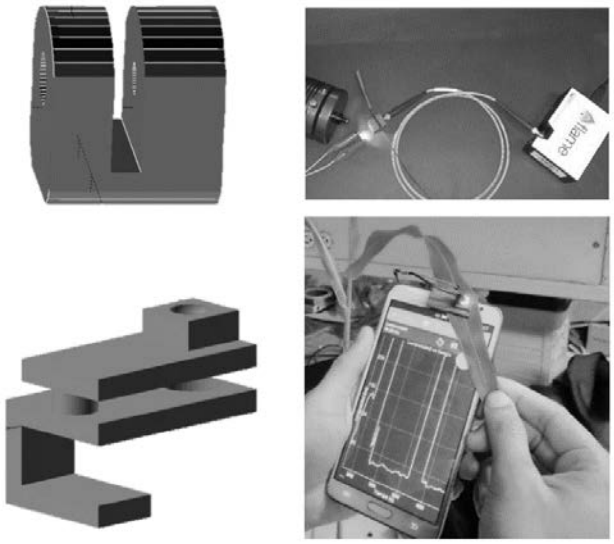


Figure 1. 3D printed accessories used to align optical elements and leaves during the tests. First row: support for the spectrometric measurement of leaf light transmission using a LED source or a halogen lamp. Second row: 3D printed device used to support the LED and leaves during light transmission tests using the smart-phone.
Source: The authors.

de Colombia" at Medellín. Each treatment included four replicates for plant height measurements. However, in some cases, only three replicates are presented for measurements of light transmission by leaves, due to involuntary mechanical damage to the flag leaf.

2.3.1. Smartphone based measurements of light transmission through sorghum and chrysanthemum leaves

The measurements were made on the flag leaf on sorghum (youngest leaf completely open), which was placed between the LED and the phone sensor (Fig 1)

The lecture of light transmission values by the leaves were obtained from a position about one third of its length starting from the tip. The light was emitted by the 663 nm LED and was recorded from the Physics tool box app in the smartphone. The LED used here is a no name LED that we found at hand, whose emission peak is closer to spectral zones of greater light absorption by many plant species [15] (Fig. 2).

To compare the relative fit between the smartphone meter and the SPAD 502™ chlorophyll meter (Minolta corporation, Ltd., Osaka, Japan) or spectrometer masurements, these SPAD numbers or readings of the 663 nm band leaf transmission were correlated to further obtain a R^2 coefficient, and are presented in scatter plots (Fig. 3).
In the experiment with fertilized plants, the values of plant height and 663 nm band leaf transmission are presented in scatterplots, without further analysis. Light transmission values are presented in a standardized 0 to 1 scale. To overcome the limitations of a higher number of plant height values (20), as compared to a lower number of light transmission readings (17), the latest were taken randomly, without knowing the current height of the plants whose leaves were been assessed.

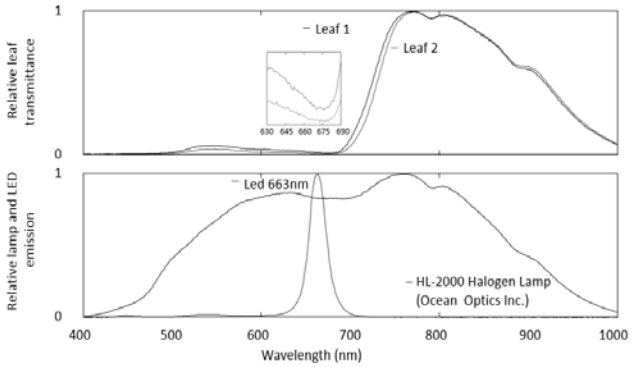


Figure 2. Transmission spectra of sorghum leaves (top) illuminated with a halogen lamp. Emission of the halogen lamp and the 663 nm LED source (bottom) used in this research. The insert in the upper figure shows a band of greater light absorption in two randomly chosen sorghum leaves.
Source: The authors.

3. Results and discussion

The spectra of light transmission by sorghum leaves showed the lowest values of transmission of light in a band near 670 nm. This band of lower transmission, and greater adsorption of red light by chlorophyll, is consistent with the information available in the literature for a very large number of plants [13-15]. The overall spectra of visible light transmission by leaves and emission of the used LED are presented in Fig. 2.

The comparison between the transmission values of 663 nm light band obtained from the smartphone and the spectrometer showed a high correlation and an average squared error of less than 7% of the highest light transmission reading, which would represent the lower concentrations of chlorophyll in the leaf samples (Fig. 3). In chrysanthemum leaves, the Lux readings on the smartphone tended to stabilize, in front of ever increasing SPAD numbers.

Plant height showed an increase which was proportional to the amount of fertilizer applied, and a good fit to the values of 663 nm light transmission. The higher the values of plant height, the lower the transmission of the 663 nm LED (Fig. 4).

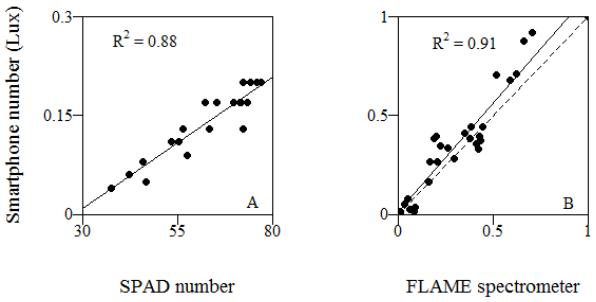


Figure 3. Relative performance of the smartphone based chlorophyll meter compared with two commercial devices on plant leaves. A: Smartphone readings compared with the readings of the gold standard SPAD 502™ chlorophyll meter (Minolta corporation, Ltd., Osaka, Japan) on chrysanthemum. B: Smartphone readings compared with a commercial spectrometer (FLAME™, Ocean Optics Inc.) on sorghum. The solid line in each scatter plot represents the best fitted model. The dashed line shows a perfect fit reference line.
Source: The authors.

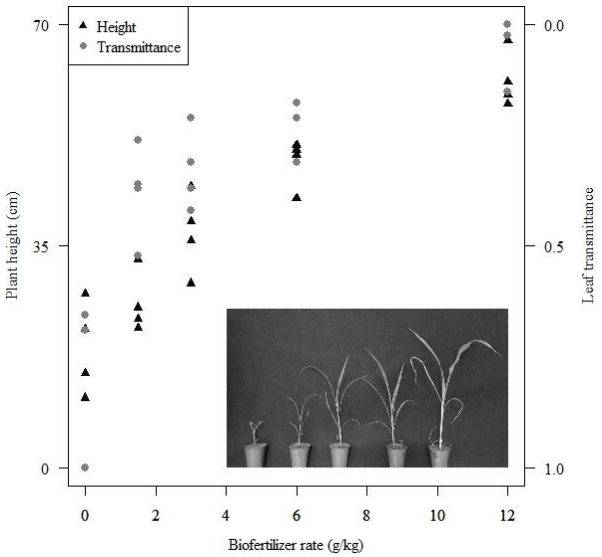


Figure 4. Leaf light transmission through sorghum leaves, using a LED diode peaking at 663 nm. The plants received increasing levels of a nitrogen biofertilizer. Light transmission values are presented on an inverted axes to ease the visualization of relationships between light transmission values through leaves and plant growth. The insert shows, from left to right, representative plants from each treatment with sequential increase in fertilizer application.
Source: The authors.

The values of sorghum leaf light transmission obtained from the ALS on the smartphone showed a good fit to readings obtained by using a standard fiber optic spectrometer. Furthermore, readings from the gold standard SPAD 502™ meter on field grown chrysanthemum leaves were highly correlated with those obtained from the ALS on the smartphone, the differences would be explained by a higher light intensity and sensitivity of the SPAD meter, and its general robust design, as compared to the loose parts making the experimental setup on the smartphone. However, these higher readings correspond to thicker leaves, in which the SPAD meter presented warning signals, perhaps associated to leaf thickness which is detected by its dual lighting system, which might be used to prevent false chlorophyll readings coming from low light transmission in thicker leaves. These smartphone values also showed a well agreement with the height of nitrogen fertilized plants. In spite of the simple arrangement of pieces, this system seems to be a promising tool for easy chlorophyll measurement to assist in nitrogen fertilizer use. Even though at this point it is not devoid of uncontrolled ambient noise and some simple optical adjustments might be user approached before final usage. Chlorophyll fluorescence also allows its analysis [3] and can be implemented under the same concept shown here. However, this technique involves the separation of excited and emitted bands in a more complex, larger, and expensive setup.

We did not test the performance of the smartphone as compared to other chlorophyll meters, since these are not easily available. Instead of that the readings of the ambient light sensor on the smartphone were compared to those obtained from the spectrometer using the same setup for leaf positioning. Additionally, spectrometers are the gold standard at hand to which any optical based instrument should be compared to. In the other hand, the low transmittance of red light by sorghum leaves in this study is in accordance with many reports in the scientific literature indicating a strong light absorption in a band between 650 nm and 680 nm, that was early attributed to plant chlorophyll [11]. This fact founds the development of some of the portable systems used today to estimate nitrogen fertilizer needs by crops, since leaf chlorophyll concentration is correlated to nitrogen content, as well as to red light absorbance, even in divergent groups of plant species such as legumes and cereals [16].

Here we did not pretend to create a model of nitrogen fertilization for sorghum plants. Instead of that, we show a potentially new way to craft new and affordable tools for farmers and perhaps scientists, in order to build these models, which are urgently needed to increase farmers' profits while reducing environmental concerns.

Smartphones would help to make this possible, due to better and faster processors and sensors which turn them into handy meters ready for field use [5]. Since smartphones and free apps are available around the world today; this device might have applications beyond communications. For instance, by establishing simple field based tests, farmers or technicians can now create custom reference values for adequate chlorophyll concentration by simply applying known quantities of nitrogen fertilizers and recording plant growth.

Unlike chlorophyll determination based on leaf images, this simple array has the advantage of directly measuring the light band absorbed by leaf chlorophyll, and sensor response depends only on the 663 nm LED and the absorptive properties of the leaf, which is very high at this wavelength [18], although noisy light should be excluded. On image based analysis, Bayer filters in camera sensors have color overlaps, which would need to be removed to make measurements of specific light bands [19]. This means that in common cameras, RGB (Red, Green and Blue) channels represent broad and nonspecific sections of the light spectrum [20].

It is also important to note that leaves of different plants may show intrinsic conditions for light interference, like anatomy and chloroplast distribution, which might also be influenced by light exposure and time of the day [16]. These may all introduce variability, and should be accounted for when using this and any other chlorophyll meter to support nitrogen fertilization decisions. However, the most critical component of this and other leaf transmission based meters is perhaps a LED peaking around light bands which are most adsorbed by chlorophyll.

It is estimated that around 20 percent of the nitrogen fertilizer used worldwide is recovered as agricultural products [21]. It is clear that easing nitrogen diagnosing technologies would make a true contribution to a sustainable agricultural and environmental development. That can be easier by using the wide distribution of portable devices with optical sensors, like smartphones. In addition to sensors, smartphones commonly can access internet networks, which may also contribute to data exchange among users and may

speed up the construction of databases with chlorophyll reference values under multiple environmental conditions, to support further fertilizer use decisions.

Although caution is needed until tools run perfect. Chlorophyll measurement is a commonly used approach to estimate N status in plants [22]. However, Mg [23] and Fe [24] deficiencies may also cause low chlorophyll levels since they are involved in chlorophyll biosynthesis. Therefore, high transmittance values of red light may also be obtained from Mg or Fe deficient plants, leading to erroneous diagnosis. Nevertheless, the visual symptoms of these deficiencies are radically different from each other, and may be used in conjunction with meters at hand, whereas new optical properties can be incorporated to this diagnosing tools.

In conclusion, the ambient light sensor of the smartphone showed a good performance to measure specific leaf light transmission, which is widely associated to chlorophyll presence. It can represent a new and affordable avenue to develop low cost chlorophyll meters and tune nitrogen fertilizer use in agriculture, which is urgently needed around the world.

Acknowledgements

This research was conducted at ¨Laboratorio de Suelos, Sección Microbiología, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín". Non logistic funding was provided by the authors. The final version of this manuscript was greatly improved by the comments of anonymous reviewers.

References

[1] Peng, S., Garcia, F.V., Laza, R.C., Sanico, A.L., Visperas, R M. and Cassman, K.G., Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice, F. Crop. Res., 4 (2), pp. 243-252, 1996. DOI: 10.1016/0378-4290(96)00018-4.

[2] Guanter, L., Zhang, Y., Jung, M., Joiner, J., Voigt, M. and Berry, J.A., Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence, Proc. Natl. Acad. Sci., 111(14), pp. E1327-E1333, 2014. DOI: 10.1073/pnas.1320008111.

[3] Maxwell, K. and Johnson, G.N., Chlorophyll fluorescence: A practical guide, J. Exp. Bot., 51(345), pp. 659-668, 2000. DOI: 10.1093/jexbot/51.345.659

[4] Mackinney, G., Absorption of light by chlorophyll solutions, J. Biol. Chem., 140, pp. 315-322, 1941.

[5] Vesali, F., Omid, M., Kaleita, A. and Mobli, H., Development of an android app to estimate chlorophyll content of corn leaves based on contact imaging, Comput. Electron. Agric., 116, pp. 211-220, 2015. DOI: 10.1016/j.compag.2015.06.012

[6] Cortazar, B., Koydemir, H.C., Tseng, D., Feng, S. and Ozcan, A., Quantification of plant chlorophyll content using google glass, HHS Public Access Author Manuscr., 15(7), pp. 1708-1716, 2015. DOI: 10.1039/c4lc01279h.Quantification.

[7] Intaravanne, Y. and Sumriddetchkajorn, S., Android-based rice leaf color analyzer for estimating the needed amount of nitrogen fertilizer, Comput. Electron. Agric., 116, pp. 228-233, 2015. DOI: 10.1016/j.compag.2015.07.005.

[8] Jacobs, M., Lopez-Garcia, M., Phrathep, O.P. and Lawson, T., Photonic crystal structure of Begonia chloroplasts enhances photosynthetic efficiency, Nat. Plants, October, pp. 1-16, 2016. DOI: 10.1038/nplants.2016.162.

[9] Lenk, S. et al., Multispectral fluorescence and reflectance imaging at the leaf level and its possible applications, J. Exp. Bot., 58(4), pp. 807-814, 2007. DOI: 10.1093/jxb/erl207.

[10] Markwell, J., Osterman, J.C. and Mitchell, J.L., Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter, Photosynth. Res., 46(3), pp. 467-472, 1995. DOI: 10.1007/BF00032301.

[11] Pinkard, E.A., Patel, V. and Mohammed, C., Chlorophyll and nitrogen determination for plantation-grown Eucalyptus nitens and E. globulus using a non-destructive meter, For. Ecol. Manage., 223(1), pp. 211-217, 2006. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.11.003.

[12] Xiong, D. et al., SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics., Sci. Rep., 5, August, p. 13389, 2015. DOI: 10.1038/srep13389.

[13] Friedman, J.M., Hunt, E.R. and Mutters, R.G., Assessment of leaf color chart observations for estimating maize chlorophyll content by analysis of digital photographs, Agron. J., 108(2), pp. 822-829, 2016. DOI: 10.2134/agronj2015.0258

[14] Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C. and Weidner, V.R., Spectral properties of plants, Appl. Opt., 4(1), p. 11, 1965. DOI: 10.1364/AO.4.000011.

[15] Knapp, A.K. and Carter, G.A., Variability in leaf optical properties among 26 species from a broad range of habitats, Am. J. Bot., 85(7), pp. 940-946, 1998. DOI: 10.2307/2446360.

[16] Merzlyak, M.N., Gitelson, A., Chivkunova, O.B. and Rakitin, V.Y.U., Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening, Physiologia Plantarum, 106(1), pp. 135-141, 1999. DOI: 10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x.

[17] Vieyra Software, Physics Toolbox Sensor Suite (Version 1.6.6). [online]. [Mobile application software]. 2017. Available at: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite&hl=es_419

[18] AMS, TMD2772/ TMD2772WA Digital ALS and Proximity Module, [online]. pp. 1-59, 2016. Available at: https://ams.com/jpn/content/download/365023/1210677/file/TMD2772_TMD2772WA_Datasheet_EN_v2.pdf

[19] Das, A.J., Wahi, A., Kothari, I. and Raskar, R., Ultra-portable, wireless smartphone spectrometer for rapid, non-destructive testing of fruit ripeness, Sci Rep, 6, p. 32504, 2016. DOI: 10.1038/srep32504.

[20] Berra, E., Gibson-Poole, S., MacArthur, A., Gaulton, R. and Hamilton, A., Estimation of the spectral sensitivity functions of un-modified and modified commercial off-the-shelf digital cameras to enable their use as a multispectral imaging system for UAVs, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., 40(1), pp. 207-214, 2015.

[21] Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. and Winiwarter, W., How a century of ammonia synthesis changed the world, Nat. Geosci., 1, pp. 636-639, 2008. DOI: 10.1038/ngeo325.

[22] Muñoz-Huerta, R.F., Guevara-Gonzalez, R.G., Contreras-Medina, L.M., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J. and Ocampo-Velazquez, R.V.. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: Advantages, disadvantages and recent advances., Sensors (Basel)., 13(8), pp. 10823-10843, 2013. DOI: 10.3390/s130810823.

[23] Guo, W., Nazim, H., Liang, Z. and Yang, D., Magnesium deficiency in plants: An urgent problem, Crop J., 4(2), pp. 83-91, 2016. DOI: 10.1016/j.cj.2015.11.003.

[24] Miller, G.W., Pushnik, J.C. and Welkie, G.W., Iron chlorosis, a world wide problem, the relation of chlorophyll biosynthesis to iron, J. Plant Nutr., 7(1–5), pp. 1-22, 1984. DOI: 10.1080/01904168409363172

D. Gaviria-Palacio, is an undergraduate student of Engineering in Agronomy at Universidad Nacional de Colombia (Medellin campus), currently with interest in, plant physiology, instrumental techniques in agricultural production and GIS.
ORCID: 0000-0002-2687-4625

J.J. Guáqueta-Restrepo, is an undergraduate student of Engineering in Agronomy at Universidad Nacional de Colombia (Medellin campus), interested on the use of non-invasive instruments and image analysis applied to plant physiology, development, growth and nutrition. Plant-soil-water relationships is another field of his interest, in particular to improve irrigation scheduling and soil reclamation.
ORCID: 0000-0003-1102-9418

D.M. Pineda-Tobón, is a BSc. and MSc. in Physics Engineering (2015), graduated from Universidad Nacional de Colombia (Medellin campus). Dedicated to instrumentation and programming. He is experienced on building custom devices and algorithms for image capture and processing and environmental assessment. He is currently candidate to a MSc degree in Physics at Universidad Nacional de Colombia.
ORCID: 0000-0002-7216-7016.

J.C. Peréz, is a PhD. associate professor at Universidad Nacional de Colombia (Medellín campus), with teaching assignments on soil fertility and microbiology, soil microbial ecology as well as instrumental techniques in these fields. He received a BSc. degree in Agronomy (1992, Universidad Nacional de Colombia), MSc. in plant pathology (1997, Universidad de Caldas, Colombia) and PhD in soil science (2010, University of Saskatchewan, Canada).
ORCID: 0000-0003-1945-286X

Our group is enriched by students coming from apparently distant fields like biology, physics, architecture, plant and animal sciences. By using classical and contemporary approaches, we are convinced that new discoveries are preceded by new technologies. We are all crafting new tools for the non-invasive assessment of plants, soils and microorganisms.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

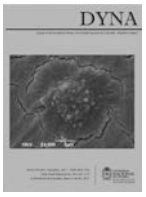
Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Wavelet denoising of partial discharge signals and their pattern classification using artificial neural networks and support vector machines

Ian Carlo Guzmán, José Luis Oslinger & Rubén Darío Nieto

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia. ian.guzman@correounivalle.edu.co, jose.oslinger@correounivalle.edu.co, ruben.nieto@correounivalle.edu.co

Received: March 31th, 2017. Received in revised form: August 11th, 2017. Accepted: October 20th, 2017.

Abstract
This paper presents two pattern recognition approaches using Partial Discharges fingerprints as input features to classify PD patterns. A multi-layer perceptron (MLP) backpropagation neural network and a support vector machine (SVM) were trained to recognize three types of PD patterns. Experimental results showed that the algorithms can achieve high recognition rates. Moreover, the Discrete wavelet transform (DWT) was used to denoise PD signals as a prior stage to the classification process. Different mother wavelets were tested for different levels of decomposition in order to find appropriate wavelet parameters for better signal to noise ratio (SNR) and less distortion after the denoising process.

Keywords: Partial Discharge (PD), Discrete Wavelet Transform (DWT), Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM)

Filtrado wavelet de descargas parciales y su clasificación de patrones usando redes neuronales artificiales y máquinas de soporte vectorial

Resumen
Este artículo presenta dos enfoques de reconocimiento de patrones usando huellas dactilares de descargas parciales como características de entrada para llevar a cabo la clasificación de patrones de DP. Un perceptrón multicapa (MLP) basado en el algoritmo de propagación hacia atrás y una máquina de soporte vectorial fueron entrenados para reconocer tres tipos de patrones de DP. Los resultados experimentales demostraron que los algoritmos pueden arrojar altas tasas de reconocimiento. De otra parte, la trasformada wavelet discreta (DWT) fue utilizada para eliminar el nivel de ruido presente en las DP como una etapa previa al proceso de clasificación. Diferentes wavelets madre fueron probadas a diferentes niveles de descomposición con el objeto de encontrar parámetros wavelet apropiados para obtener una mejor relación señal-ruido (SNR) y menos distorsión después del proceso de filtrado.

Palabras clave: Descarga parcial (DP), transformada wavelet discreta, red neuronal artificial, máquina de soporte vectorial.

1. Introduction

A Partial Discharge (PD) is a localized electrical pulse that occurs in the insulation system of high voltage (HV) equipment. Partial discharges appear as short duration pulses having a duration much less than 1μs due to electrical stress concentrations in the insulation systems or on the surface of the insulation [1]. PD ocurrence may cause damage leading to a breakdown of the insulation system.

Therefore, early detection of insulation defects in high voltage equipment is a major concern to be adressed. Extensive research related to PD phenomena has been

How to cite: Guzmán, I.C., Oslinger, J.L. and Nieto, R.D., Wavelet denoising of partial discharge signals and their pattern classification using artificial neural networks and support vector machines DYNA, 84(203), pp. 240-248, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

conducted and including: its detection and acquisition techniques, chemical and physical processes, denoising methods, feature extraction and PD pattern classification algorithms [2]. PD denoising is an important task mainly in PD online monitoring systems [3]. Several studies have reported methods based on the wavelet transform for PD denoising of white noise [3-8]. However, the signal to be filtered through the wavelet transform may be distorted. The distortion of a de-noised signal is closely related to the selected mother wavelet and to the threshold selection [9].

Among research areas related to PD phenomena, feature extraction and PD pattern classification are fundamental processes in order to implement an insulation condition monitoring system that can automatically identify the type of PD sources [10-12].

Since 1990, researchers have shown a strong interest in performing PD classification using artificial intelligence techniques [13-22]. Studies like [2,10,13,19,23-33] have reported the use of Multilayer neural networks for PD classification, in which high recognition rates have been found for different types of PD defects. The advantage in using neural networks over other types of classifiers is the possibility they offer to learn from examples [34]. But as early as 2004, researchers have shown a growing interest in DP classification using support vector machines [35-46]. In general, DP classification results using support vector machines have yielded better classification results compared to other classifiers (including neural networks) [2,47]. However, there are still important challenges related to apply appropriate AI techniques for automatic PD source classification such as: feature extraction, application of suitable pattern recognition algorithms and recognizing multiple PD sources that may occur simultaneously in (HV) equipment.

In this paper, we propose a multi-layer perceptron (MLP) backpropagation neural network and a binary support vector machine architecture as artificial intelligence algorithms to automatically identify PD patterns using statistical operators as input features, and compare their performance based on classification results. Additionally, multilevel wavelet decomposition was used to denoise PD signals prior to the classification process. Different mother wavelets for different levels were tested to find better signal to noise ratio (SNR) with less distortion after the denoising process.

This paper is organized as follows: In section 2, the practical setup used in this work is presented. A high level overview of the developed real-time application is explained in section 3. In section 4, we give a brief introduction to Discrete wavelet transform (DWT) and results of PD denoising are presented. The feature extraction process is explained in section 5. The artificial intelligence algorithms and the results of PD pattern classification are presented in section 6. Finally, conclusions are stated in section 7.

2. Experimental setup

The practical setup for PD measurement was implemented according to IEC60270 recommendations and is depicted in Fig. 1.

A voltage level coming from the secondary of the transformer is applied across the test object to generate PD signals.

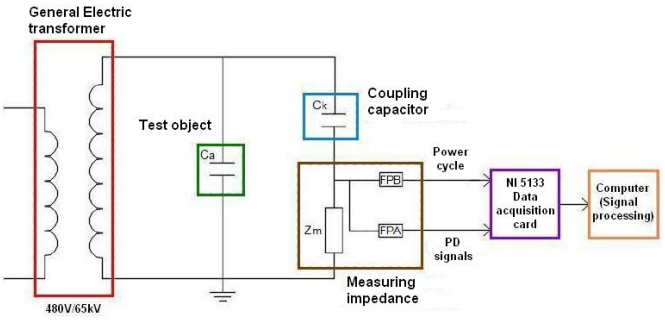


Figure 1. PD measurement setup.
Source: The authors

A quadrupole which contains the measuring impedance includes a high-pass and a low-pass filter in order to separate the DP signals from the power cycle, respectively. The data acquisition card captures the power cycle and the DP signals in different channels to send them to the computer for signal processing.

Artificial PD models such as a tip-hemispherical electrode; a rod-plane electrode and a stator coil were used to simulate corona, surface and internal partial discharges, respectively. The data acquisition card used in this work was the National Instruments NI-5133, which provides two simultaneously sampled channels, a sample frequency up to 100MSPS, 50MHz bandwidth, 8-bit resolution, etc.

3. GUI application

In order to process the PD signals, a Labview application was developed which consists of several tabs that allow: view the acquired signals in scope mode, plot the phase resolved partial discharge diagram, display statistical parameters associated to PD patterns and classify the corona, surface and internal PD patterns using artificial intelligence-based algorithms. Fig. 2 shows the application main window where the user can interact with the acquired PD signals in real time and enter different values depending on the acquisition needs. Once the acquisition and processing are finished, all the results are available to be consulted in their associated tabs.

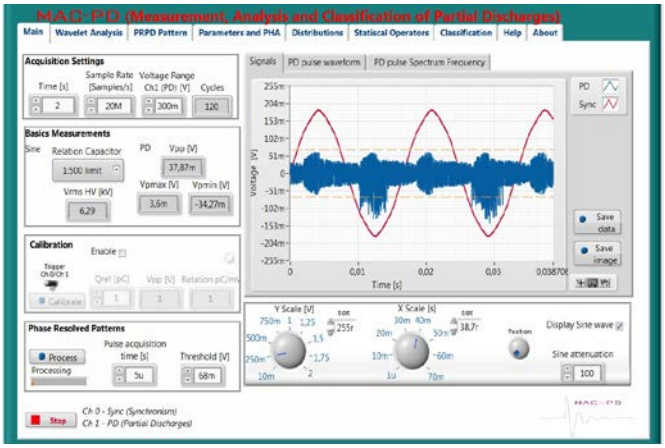


Figure 2. Typical PD patterns
Source: The authors

A 256x256 matrix was designed to record all the informationrelated to PD pulses, where rows represent peak values and columns represent phase angles, as shown in Fig. 3. Each coordinate was associated with a specific PD pulse of a certain peak value and phase angle, therefore, a coordinate is incremented in one every time its associated PD pulse is detected.

The 256x256 matrix facilitated the statistical parameters computation and allowed to plot the PRPD diagram.

Fig. 4 shows the three typical PRPD patterns obtained for each type of PD.

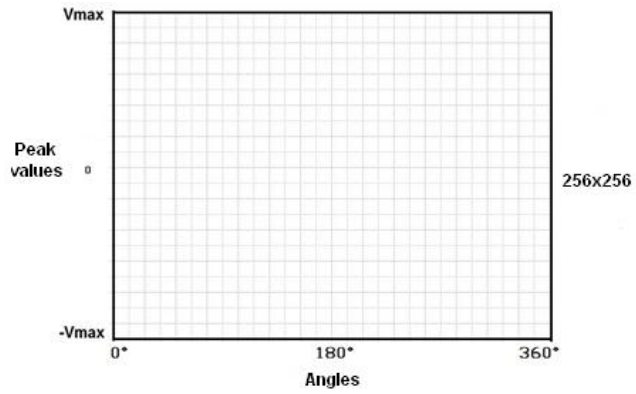
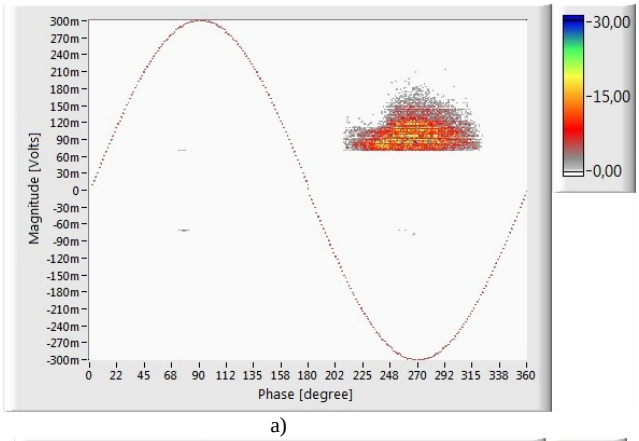
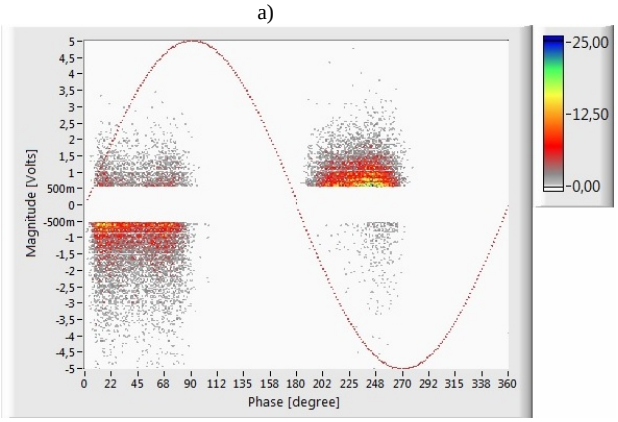


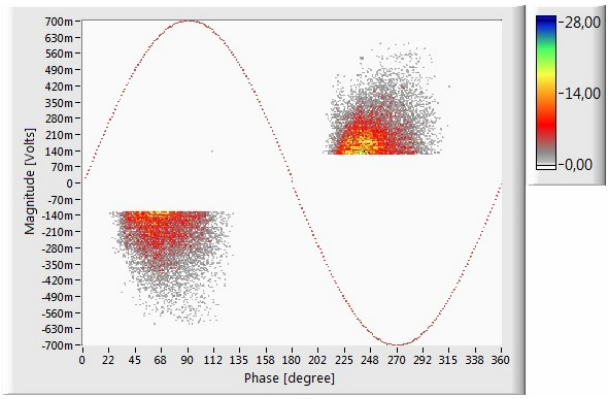
Figure 3. 256x256 Matrix
Source: The authors



a)



b)



c)

Figure 4. Typical PD patterns of: a) Corona discharge, b) Surface discharge, c) Internal discharge.
Source: The authors

4. Discrete Wavelet Transform (DWT)

4.1. A brief introduction to discrete wavelet transform

A wavelet is a short duration small wave that has zero mean value; it increases in amplitude and then decreases back to zero quickly. It satisfies:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)dt \tag{1}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \tag{2}$$

Where $\psi(t)$ is the mother wavelet. A family of wavelet functions associated with $\psi(t)$ can be denoted as:

$$\psi(at) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{3}$$

Where a is a scaling factor to determine the amplitude and duration of the mother wavelet. The translation factor b is used to shift the mother wavelet along the time axis. The continuous wavelet transform (CWT) of a signal $f(t)$ is defined as [48-50]:

$$W_\psi f(a,b) = |\, a \,|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{4}$$

The discrete wavelet transform (DWT) of a signal is obtained by means of a filtering scheme called quadrature mirror filters (QMF) which is a digital filter bank structure. QMF allows for signals to be decomposed into several frequency coefficients and then reconstruct the original signal by using the inverse discrete wavelet transform (IDWT). The original signal is fed through a number of complementary low-pass (L) and high-pass (H) filters and down-sampled by two. The low and high frequency content, also known as "approximation" and "detail" coefficients are given by the low-pass and high-pass filters, respectively [51-55]. A three-level discrete wavelet transform for a signal $s(k)$ is shown in Fig. 5.

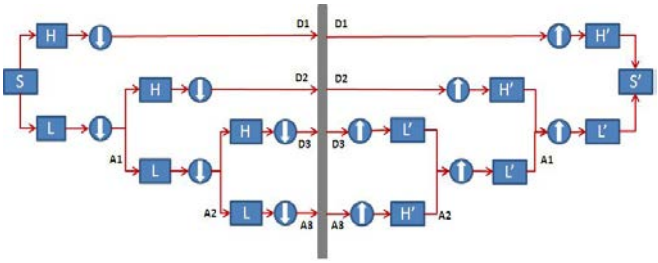


Figure 5. Three-level discrete wavelet transform for a signal "S"
Source: The authors

4.2. Wavelet denoising of partial discharges

There is still no universal or precise method regarding to wavelet type, threshold or level selection since every approach depends on a specific problem [53]. Therefore, the selection of the best wavelet parameters has to be made by means of a trial and error process.

In order to compare the denoising performance with different mother wavelets for different levels of decomposition, the signal to noise ratio (SNR), the reduction in noise level and the root mean square error (RMSE) were considered.

4.2.1. Signal to Noise Ratio (SNR)

It is a measure that indicates the ratio of the power of a signal to the level of noise, usually expressed in decibels (dB). The signal to noise ratio is defined as [53]:

$$SNR(dB) = 10 * log \frac{\sum_{i=1}^{N} y(i)^2}{\sum_{i=1}^{N} \big(x(i) - y(i)\big)^2} \quad (5)$$

Where, $x(i)$ is the signal of reference, $y(i)$ is the denoised signal and N is the number of sample points. A positive value of SNR means the power of signal is greater than the power of noise and vice versa for a negative value of SNR.

4.2.2. Reduction in noise level

In practical measurements, there is no signal of reference, therefore, only the reduction of noise level can be computed, which is the amount of suppressed noise. The normalized reduction of noise level is computed as [54]:

$$RNL\ (dB) = 10 * log \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N} (z(i) - y(i))^2 \quad (6)$$

Where $z(i)$ is the noisy signal, $y(i)$ is the denoised signal and N is the number of samples.

4.2.3. Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE is an indicator of the signal distortion after the filtering process. The smaller the RMSE, the more similar is the denoised signal to the signal of reference and less the distortion after filtering. The RMSE is defined as [55]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y(i) - x(i))^2} \quad (7)$$

Where, $x(i)$ is the original signal, $y(i)$ is the denoised signal and N is the number of sample points.

4.3. Denoising results

Many tests were made to find the most appropiate wavelet parameters for better denoising results. It was found that PD signal denoising using a soft-threshold function yields a greater value of RMSE compared to a hard-threshold function. Therefore, all the denoising tests in this work were carried out using the latter.

In order to analyze PD signals with higher level of noise, Gaussian white noise was simulated and added to PD signals. Fig. 6 shows a typical internal PD signal used as a reference signal. Fig. 7 shows the reference signal with simulated white noise added such that SNR=-13dB. Results of denoising in the form of SNR and RMSE values are shown in Table 1.

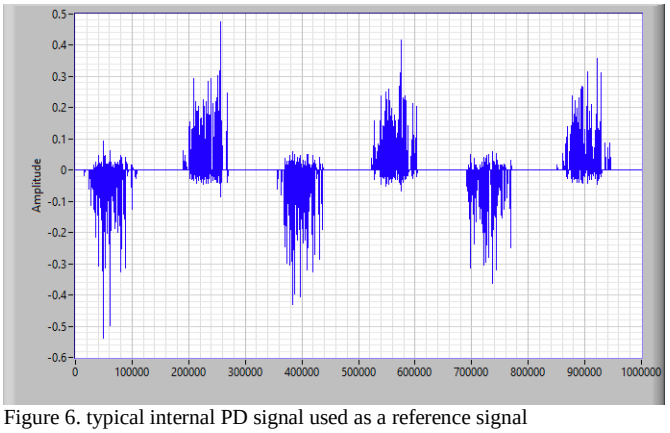


Figure 6. typical internal PD signal used as a reference signal
Source: The authors

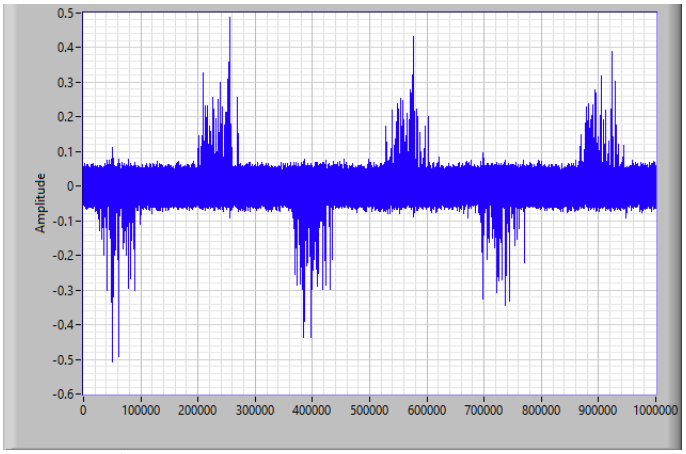


Figure 7. Reference signal with simulated white noise added such that SNR=-13dB.
Source: The authors

Table 1.
Results of denoising a typical PD signal with white noise added

	Decomposition Levels									
Mother wavelet	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
	SNR(dB)	**RMSE(%)**	**SNR(dB)**	**RMSE(%)**	**SNR(dB)**	**RMSE(%)**	**SNR(dB)**	**RMSE(%)**	**SNR(dB)**	**RMSE(%)**
Db02	18.7804	0.192354	16.9436	0.228477	15.9350	0.249433	15.0973	0.267487	14.7070	0.275679
Db03	18.5311	0.196676	16.8399	0.230734	15.3854	0.261317	14.569	0.278867	14.1272	0.288442
Db04	18.4446	0.198342	16.6296	0.235006	15.0816	0.267047	14.1055	0.288071	13.6588	0.297163
Db05	18.5987	0.195602	16.2031	0.243501	14.7930	0.272898	13.7681	0.294066	13.2726	0.303759
Db06	18.5027	0.197734	15.7586	0.252825	14.3080	0.283637	13.4371	0.301464	13.104	0.307934
Db07	18.2584	0.202324	15.6372	0.255444	14.0520	0.288419	13.1259	0.307225	12.7664	0.314648
Db08	18.1173	0.204887	15.3415	0.262257	13.7274	0.295796	12.7466	0.316293	12.2738	0.325291
Db09	18.0710	0.205806	15.1400	0.266005	13.4883	0.300856	12.5192	0.320433	12.1925	0.329654
Db10	18.0612	0.206055	14.9801	0.268408	13.0349	0.309614	12.1240	0.327537	12.5418	0.335091

Source: The authors

From Table 1, it is observed that the highest values of reduction in noise level and signal to noise ratio are obtained for a single level of DWT decomposition. Also, it can be noted from Table 1 that the RMSE value is smaller for one level compared to higher levels of DWT, which implies that the distortion of the signal is less for a single level. Similar results are reported in [56, 57].

5. Feature extraction

Feature extraction is carried out as a prior stage for pattern recognition. In this work, the feature extraction process was implemented using statistical operators, which can be obtained from statistical distributions. The shape of statistical distributions provide information related to the type of PD signals, therefore, statistical operators can be used as discriminatory parameters for classification purposes. The statistical distributions for PD signals are defined as [16,34]:

$\boldsymbol{Hn^{\pm}(\varphi)}$: The number of discharges per each window as a function of the angle φ.

$\boldsymbol{Hqn^{\pm}(\varphi)}$:The average pulse amplitude per each window as a function of the angle φ.

$\boldsymbol{Hqmax^{\pm}(\varphi)}$:The maximum pulse amplitude per each window as a function of the angle φ.

A set of statistical operators obtained from the distributions described above can be also called PD-figerprints. In this work, PD-fingerprints include:

Skewness (Sk): Measures the degree of asymmetry of a distribution. Sk=0 means the distribution is fully symmetric. A positive skewness means the distribution is skewed to the left. A negative skewness means the distribution is skewed to the right. The skewness is defined as:

$$\boldsymbol{S_k} = \frac{N}{(N-1)*(N-2)}\sum_{i=1}^{N}\frac{(x_i-\mu)^3}{\sigma^3} \tag{8}$$

Where x_i is the i-th variable, μ is the mean value, σ is the variance and N is the number of data points.

Kurtosis: it is an indicator of the sharpness of a distribution. Ku=0 means a normal distribution. A

positive kurtosis means a sharp distribution. A negative kurtosis means a flat distribution. Kurtosis is defined as:

$$\mathrm{K_u} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{N}}\frac{(\mathrm{x_i}-\mu)^4}{\mathrm{N}\sigma^4} - 3 \tag{9}$$

Mean: it is the average for each semi-cycle of each distribution.

Cross-correlation: it describes the difference in distribution shape between the positive and negative semi-cycle of a distribution. c.c=0 means total shape asymmetry. c.c=1 means total shape symmetry. Cross-correlation is defined as:

$$\mathrm{c.c} = \frac{\sum \mathrm{x_i} * \mathrm{y_i} - \sum \mathrm{x_i}\sum \mathrm{y_i}/\mathrm{N}}{\sqrt{\left(\sum \mathrm{x_i^2} - \frac{(\sum \mathrm{x_i})^2}{\mathrm{N}}\right)\left(\sum \mathrm{y_i^2} - \frac{(\sum \mathrm{y_i})^2}{\mathrm{N}}\right)}} \tag{10}$$

6. Pattern recognition algorithms

6.1. Classification using ANN

There are different ANN-based algorithms to solve pattern recognition problems [34].

The neural network implemented in this work is a Multilayer Perceptron (MLP) based on the backpropagation algorithm [58]. The MLP structure used in this work is made up of three layers as illustrated in Figure 8: an input layer, a hidden layer and an output layer. Layers are made up of a number of neurons in which each neuron has a sigmoid activation function; the output layer is made up of three neurons, each for one of the three types of PD patterns to be classified (internal, corona and surface). PD fingerprints were used to train the neural network using measurements files so that a new feature input vector can be classified into one of the PD patterns. The feature set consists of 20 statistical operators as shown in Figure 8, including skewness, kurtosis, mean, number of peaks and cross-correlation, which are obtained from the statistical distributions$Hn^{\pm}(\varphi)$, $Hqn^{\pm}(\varphi)$ and $Hqmax^{\pm}(\varphi)$.

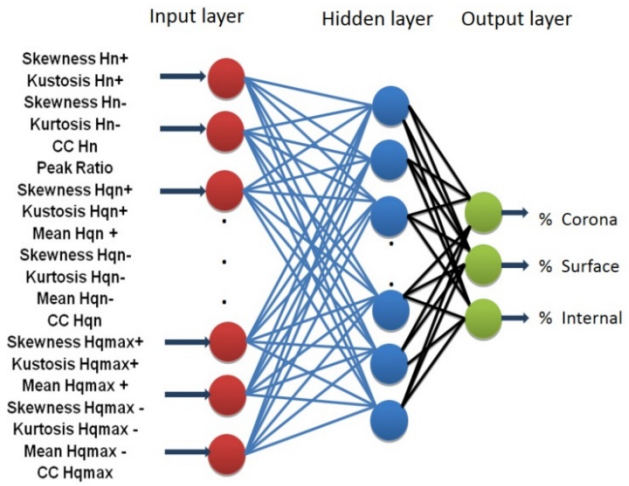


Figure 8. MLP structure
Source: The authors

6.2. Classification using SVM

A support vector machine (SVM) is a binary classifier and a supervised learning model that takes the data points belonging to a spatial domain into another spatial domain of a major dimension which is defined by a kernel function that separates the two classes by means of an hyperplane (also called support vector). This facilitates the classification of the input data into one of the two classes. A support vector machine always looks for the hyperplane that maximizes the margin between the two spaces of points.

Mathematically, an SVM is a linear classifier according to equation 11, which maximizes the margins of classification. The margin of classification is the distance between the classification boundary and the closest point to each class. Equation 12 describes the separation hyperplane. Margin maximization (which minimizes the risk of errors in classifying data) gives the SVM an excellent generalization capability.

$$f(x) = sgn(w^T \bullet x + b) \tag{11}$$

$$w^T \bullet x + b = 0 \tag{12}$$

Where w^T is a vector orthogonal to the hyperplane and "•" is a dot product.

For non-linear separable data, a kernel function is introduced in order to allow the data to be brought into a larger space called a feature space, so that equation 11 can be rewritten as in equation 13 [35]:

$$f(x) = sgn(w^T.\Phi(x) + b) \tag{13}$$

Where $\Phi(x)$ is the kernel function.

A polynomial Kernel was used in this work and is defined as:

$$K(x, y) = (x^T y + C)^n \tag{14}$$

Where x and y are vectors in the input space, n is the degree of the polynomial. The degree of the polynomial Kernel used in this work was quadratic ($n = 2$).

Support vector machines are binary classifiers, that is, they can only classify two classes. However, it is possible to classify more than two classes using several units in parallel, where the number of units to be used is calculated by equation 15.

$$N = \frac{J(J-1)}{2} \tag{15}$$

Where J is the number of classes to be classified.

A "voting process" must be held where each class can obtain up to $J-1$ possible votes. The entry pattern will be assigned to the most voted class [36].

The SVM architecture implemented in this work is shown in Figure 9. According to equation 15, three units in parallel were required to classify the three types of PD patterns (internal, corona and surface).

Each unit consists of a learning and testing stage, therefore, each unit has to be trained with the corresponding dataset in order to process new input patterns. A new input pattern is going to be classified into one of two PD patterns at the outputs of a testing stage; afterwards, the voting class algorithm receives the classification results of each testing unit in order to perform a count and classify the input pattern into one of the three PD patterns.

6.3. Classification results

To construct the training dataset, a preprocessing stage was carried out in order to acquire all the set of statistical operators explained in section 5 for each type of PD. After the training process was finished, the classifiers were tested with new input patterns and they could achieve high recognition rates. Tables 2 and 3 show the results of MLP and SVM of four tests for each type of PD, in order to obtain recognition rates for input features not included in the training dataset, respectively. From Table 2, it can be observed that the highest average recognition rate is for corona discharge with a 99.9% rate, 98.31% for internal discharge and 95.31% for surface discharge. Given that a SVM is a binary classifier, it can be noted from Table 3 that recognition rates provided by the SVM are 0% or 100%, where 100% means an identified pattern. Therefore, input PD patterns are well identified by the SVM as well.

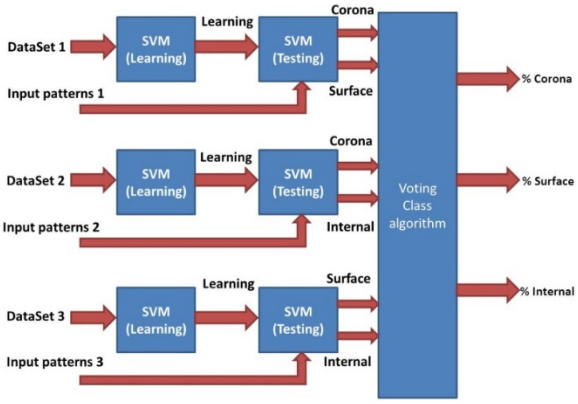


Figure 9. SVM architecture
Source: The authors

Table 2.
Recognition rates of MLP

Recognition rate					
Type of PD	**Internal (%)**	**Corona (%)**	**Surface (%)**	**Average (%)**	**Accuracy (%)**
Internal	99.99	0.005	0.005	98.31	100
	98.5549	0.7225	0.72256		
	98.0844	1.4366	0.47889		
	96.6435	1.6782	1.67823		
Corona	0.05	99.99	0.05	99.99	100
	0.05	99.99	0.05		
	0.05	99.99	0.05		
	0.05	99.99	0.05		
Surface	0.05	0.05	99.99	95.42	100
	1.791	1.9422	96.2668		
	4.06089	1.1489	94.7902		
	7.91322	1.4481	90.6386		

Source: The authors

Table 3.
Recognition rates of SVM

Recognition rate					
Type of PD	**Internal (%)**	**Corona (%)**	**Surface (%)**	**Average (%)**	**Accuracy (%)**
Internal	100	0	0	100	100
	100	0	0		
	100	0	0		
	100	0	0		
Corona	0	100	0	100	100
	0	100	0		
	0	100	0		
	0	100	0		
Surface	0	0	100	100	100
	0	0	100		
	0	0	100		
	0	0	100		

Source: The authors

7. Conclusions

Implementation and results related to PD denoising using the Discrete wavelet transform (DWT) and PD pattern classification using artificial intelligence-based algorithms have been presented in this paper.

According to the results of filtering PD signals through the Discrete Wavelet Transform, first level of decomposition was enough to remove white noise with greater signal to noise ratio (SNR) than to higher levels of decomposition. Also, it was noted that as the number of levels increases, the distortion of the signal increases as well and, therefore, the SNR decreases.

The multilayer perceptron (MLP) neural network and the support vector machine (SVM) implemented in this work were trained and tested using PD-fingerprints as input features and both achieved high recognition rates. Since the SVM is a binary classifier, recognition rates at its outputs were provided as 0% and 100%, where 100% means an identified PD pattern. Recognition rates of more than 90% were achieved by the MLP neural network. Both algorithms were executed simultaneously in the Labview real-time application developed in this work.

Future research will consider multiple PD source classification.

References

[1] IEC, IEC 60270 High-voltage test techniques: Partial discharge measurements, 2000.

[2] Ma, H., Chan, J.C., Saha, T.K. and Ekanayake, C., Pattern recognition techniques and their applications for automatic classification of artificial partial discharge sources. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 20(2), pp. 468-478, 2013. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6508749

[3] Florkowska, M.F.B., Phase-resolved rise-time-based discrimination of partial discharges. IET Generation, Transmission and Distribution, 3(1), pp. 115-124, 2009.

[4] Lozano, B., Diseño de software off-line para el análisis estadístico de descargas parciales, Tesis, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2013.

[5] van Veen, L.W., Comparison of measurement methods for partial discharge measurements in power cables, Thesis, Delft University of Technology, Delft, Holand, 2014.

[6] Seghir, T., Mahi, D., Lebey, T. and Malec, D. Analysis of the Electric field and the potential distribution in cavities inside solid insulating electrical materials. Proceedings of the COMSOL User Conference, Electr. Eng., pp. 2-5, 2006.

[7] Ahmed, N. and Srinivas, N., PD types and their detection possibilities by PD test methods, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kitchener, Ont., 2001, pp. 307-310. DOI: 10.1109/CEIDP.2001.963545

[8] Bodega, R., Morshuis, P.H.F., Lazzaroni, M. and Wester, F.J., PD recurrence in cavities at different energizing methods, in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 53(2), pp. 251-258, 2004.

[9] Gutfleisch, F. and Niemeyer, L., Measurement and simulation of PD in epoxy voids, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2(5), pp. 729-743, 1995. DOI: 10.1109/94.469970

[10] Turner, M. and Gulski, E., (2010). Pattern recognition for partial discharge measurement. Tettex Instruments Division, Haefely Test AG,[online]. (July), pp. 1-18. Available from: http://www.haefely.com/pdf/solutions/DSWpaper.pdf

[11] Contin, A. and Pastore, S., Classification and separation of partial discharge signals by means of their auto-correlation function evaluation, in: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(6), pp. 1609-1622, 2009. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5361581

[12] Hao, L. et al., Discrimination of multiple PD sources using wavelet decomposition and principal component analysis, in: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 18(5), pp. 1702-1711, 2011. DOI: 10.1109/TDEI.2011.6032842

[13] Gulski, E. and Krivda, A., Neural networks as a tool for recognition of partial discharges. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(6), pp. 984-1001,1993. DOI: 10.1109/14.249372

[14] Gulski, E., Computer-aided recognition of partial discharges using statistical tools, Delft: Delft University Press, 1991.

[15] Kreuger, F.H., Gulski, E. and Krivda, A., Classification of Partial Discharges. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(6), pp. 917-931, 1993. DOI: 10.1109/14.249365

[16] Gulski, E. and Kreuger, F.H., Diagnostics of insulating systems using statistical tools. Conference record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 393-396, 1992. DOI: 10.1109/ELINSL.1992.246981

[17] Gulski, E. and Kreuger, F.H. Computer-aided Analysis of discharge patterns, J. Phys, D: Appl. Phys. 23, pp. 1569-1575, 1990.

[18] Krivda, A., Recognition of discharges: Discrimination and classification. Electra, 1995.

[19] Mazroua, A.A., Salama, M.M.A. and Bartnikas, R., PD pattern recognition with neural networks using the multilayer perceptron technique, in: IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(6), pp. 1082-1089, 1993. DOI: 10.1109/14.249382

[20] Kranz, H.G., Diagnosis of partial discharge signals using neural networks and minimum distance classification, in: IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(6), pp. 1016-1024, 1993. DOI: 10.1109/14.249375

[21] James, R.E. and Phung, B.T., Development of computer-based measurements and their application to PD pattern analysis, in: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2(5), pp. 838-856, 1995.

[22] Chen, P. and Chen, H. (n.d.). Application of back-propagation neural network to power transformer insulation diagnosis, pp. 26-34.

[23] Chang, C.S., Jin, J., Chang, C., Hoshino, T., Hanai, M. and Kobayashi, N., Separation of corona using wavelet packet transform and neural network for detection of partial discharge in gas-insulated substations, in: IEEE Transactions on Power Delivery, 20(2), pp. 1363-1369, 2005. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839187

[24] Li, J., Sun, C., Wang, Y., Yang, J. and Du, L., PD pattern recognition using combined features, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2004, pp. 139-142. DOI: 10.1109/ELINSL.2004.1380490

[25] Evagorou, D., Kyprianou, A., Lewin, P.L., Stavrou, A., Efthymiou, V. and Georghiou, G.E., Classification of partial discharge signals using probabilistic neural network, in: IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Winchester, UK, 2007, pp. 609-615. DOI: 10.1109/ICSD.2007.4290887

[26] Boczar, T., Borucki, S., Cichon, A. and Zmarzly, D., Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method, in: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(1), pp. 214-223, 2009. DOI: 10.1109/TDEI.2009.4784570

[27] Shurrab, I.Y., El-Hag, A., Assaleh, K. and Ghunem, R., Partial discharge on-line monitoring of outdoor insulators. Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 391-394, 2012. DOI: 10.1109/ELINSL.2012.6251496

[28] Nasional, U.T., FPGA implementation of neural network classifier for partial discharge time resolved data from magnetic probe, 2011, pp. 451-455.

[29] Macedo, E.C.T., Villanueva, J.M., Da Costa, E.G., Freire, R.C.S., Araujo, D.B., De Souza Neto, J.M.R. and Glover, I.A. Assessment of dielectric degradation by measurement, processing and classification of Partial Discharges, Proceedings of the 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, IPMHVC 2012, 2, pp. 587-590. DOI: 10.1109/IPMHVC.2012.6518812

[30] Gaoyang, Li, Mingzhe, R., Xiaohua, W., Xi, L. and Yunjia, L., Partial discharge patterns recognition with deep Convolutional Neural Networks, 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Xi'an, 2016, pp. 324-327. DOI: 10.1109/CMD.2016.7757816

[31] Suprayogi, B. and Khayam, U., Design of partial discharge location identifier software for high voltage generator using artificial neural network, in: Proceedings of the Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICEVT & IMECE), Surakarta, 2015, pp. 82-87. DOI: 10.1109/ICEVTIMECE.2015.7496664

[32] Pattanadech, N., Nimsanong, P., Potivejkul, S., Yuthagowith, P. and Polmai, S., Partial discharge classification using probabilistic neural network model, in: 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Pattaya, 2015, pp. 1176-1180. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385217

[33] Catterson, V.M. and Sheng, B., Deep neural networks for understanding and diagnosing partial discharge data, in: IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Seattle, WA, 2015, pp. 218-221. DOI: 10.1109/ICACACT.2014.7223616

[34] Sahoo, N.C., Salama, M.M.A. and Bartnikas, R., Trends in partial discharge pattern classification: A survey. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(2), pp. 248-264, 2005, DOI: 10.1109/TDEI.2005.1430395

[35] Hao, L., Lewin, P.L., Tian, Y. and Dodd, S.J., Partial discharge identification using a support vector machine, in: CEIDP '05. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005, pp. 414-417. DOI: 10.1109/CEIDP.2005.1560708

[36] Robles, G., Parrado-Hernández, E., Ardila-Rey, J. and Martínez-Tarifa, J.M., Multiple partial discharge source discrimination with multiclass support vector machines. Expert Systems with Applications, 55, pp. 417-428, 2016. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.02.014

[37] Poyhonen, S., Conti, M., Cavallini, A., Montanari, G.C. and Filippetti, F., Insulation defect localization through partial discharge measurements and numerical classification, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1, pp. 417-422, 2004. DOI: 10.1109/ISIE.2004.1571844

[38] Hao, L., Lewin, P.L., Tian, Y. and Dodd, S.J., Partial discharge identification using a support vector machine, in: CEIDP '05. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005, pp. 414-417. DOI: 10.1109/CEIDP.2005.1560708

[39] Aziz, N.F.A., Hao, L. and Lewin, P.L., Analysis of partial discharge measurement data using a support vector machine, in: 5th Student Conference on Research and Development, Selangor, Malaysia, 2007, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SCORED.2007.4451430

[40] Hao, L., Lewin, P.L. and Swingler, S.G., Identification of multiple partial discharge sources, in: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, 2008, pp. 118-121. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580244

[41] Hao, L. and Lewin, P.L., Partial discharge source discrimination using a support vector machine, in: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 17(1), pp. 189-197, 2010. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5412017

[42] Tang, J., Liu, F., Zhang, X., Liang, X. and Fan, Q., Partial discharge recognition based on SF_6 decomposition products and support vector machine, in: IET Science, Measurement & Technology, 6(4), pp. 198-204, 2012. DOI: 10.1049/iet-smt.2011.0163

[43] Ma, H., Saha, T.K. and Ekanayake, C., Statistical learning techniques and their applications for condition assessment of power transformer, in: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19(2), pp. 481-489, 2012. DOI: 10.1109/TDEI.2012.6180241

[44] Sarathi, R., Merin-Sheema, I.P. and Abirami, R., Partial discharge source classification by support vector machine, in: IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Kolkata, 2013, pp. 255-258. DOI: 10.1109/CATCON.2013.6737508

[45] Xu, J., Niu, H. and Hu, R., The feature extraction and pattern recognition of partial discharge type using energy percentage of wavelet packet coefficients and support vector machines, in: 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 1776-1779. DOI: 10.1109/DRPT.2015.7432530
[46] Zhi-Qin, M., Xian, Y., Chun-Yao, L., Dan, Z., Hong-Ming, H. and Jian-Guang, C., Partial discharge developing stages identification based on cluster-hierarchical decision SVM in oil-paper insulation, in: IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Chengdu, 2016, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800654
[47] Hunter, J.A., Hao, L., Lewin, P.L., Evagorou, D., Kyprianou, A. and Georghiou, G.E., Comparison of two partial discharge classification methods. Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 2010. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549736
[48] Ma, X., Zhou, C. and Kemp, I.J., Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 9(3), pp. 446-457. DOI: 10.1109/TDEI.2002.1007709
[49] Mallat, S.G., A wavelet tour of signal processing, Academic Press, 1998.
[50] S.G. Mallat, A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation, in: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11(7), pp. 674-693, 1989. DOI: 10.1109/34.192463
[51] Zhang, H., Blackburn, T.R., Phung, B.T. and Sen, D., A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements part 1: WT de-noising algorithm. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 14(1), pp. 3-14, 2007. DOI: 10.1109/TDEI.2007.302864
[52] Zhang, H., Blackburn, T.R., Phung, B.T. and Liu, Z., Signal processing of online partial discharges measurements in HV power cables, Australasian Universities Power Engineering Conf., Brisbane, Australia, Paper ID 161, 2004.
[53] Skea, J., Anderson, D., Green, T., Gross, R., Heptonstall, P. and Leach M., Intermittent renewable generation and the cost of maintaining power system reliability. Generation, Transmission & Distribution, IET, 1(2), pp. 324-325, 2007. DOI: 10.1049/iet-gtd:20070023
[54] Satish, L. and Nazneen, B., Wavelet-based denoising of partial discharge signals buried in excessive noise and interference, in: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10(2), pp. 354-367, 2003. DOI: 10.1109/TDEI.2003.1194122
[55] He, H., Tan, Y. and Wang, Y., Optimal base wavelet selection for ECG noise reduction using a comprehensive entropy criterion. Entropy, 17(9), pp. 6093-6109, 2015. DOI: 10.3390/e17096093
[56] Arivazhagan, S., Deivalakshmi, S. and Kannan, K., Performance analysis of image denoising system for different levels of wavelet decomposition. International Journal of Imaging Science and Engineering, 1(3), pp. 104-107, 2007.
[57] Sharmila, G., Maheswari, R.V. and Subburaj, P., Partial discharge signal denoising using wavelet techniques-on site measurements, in: International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Nagercoil, 2013, pp. 673-678. DOI: 10.1109/ICCPCT.2013.6528974
[58] Bishop, C.M., Neural Networks for pattern recognition, Oxford, Clarendon Press, USA, 1995.

I.C. Guzmán-Velásquez, received his BSc. degree in Electronics Eng., from Universidad del Valle, Cali, Colombia in 2013. He received his MSc. degree in Electrical Engineering at Universidad del Valle, Cali, Colombia in 2017. His research interests include: signal processing and machine learning.
ORCID: 0000-0002-4532-8814

J.L. Oslinger-Gutierrez, received his BSc. degree in Electrical Eng., from Universidad del Valle, Cali, Colombia in 1996. He received his PhD degree from Universidad del Valle, Cali, Colombia in 2007. Currently, he is a full time professor at Universidad del Valle in the electrical and electronics school. His research interests include: PD phenomena and design, diagnostics and simulation of rotating electric machines.
ORCID: 0000-0001-9004-3562

R.D. Nieto-Londoño, received his BSc. degree in Electrical Eng., from Universidad del Valle, Cali, Colombia in 1995. He received his MSc. degree with an emphasis in electronics engineering from Universidad del Valle, Cali, Colombia in 2001 and received his PhD degree from Universidad del Valle, Cali, Colombia in 2009. Currently, he is a professor at Universidad del Valle in the electrical and electronics school. His research interests include: digital circuits design, low-power digital design and computer architecture.
ORCID: 0000-0002-1113-3269

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 64

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Disintegration and recycling possibility of selected abrasives for water jet cutting

Andrzej Perec

Faculty of Technology, Jacob of Paradies University, Gorzow Wlkp., Poland. aperec@ajp.edu.pl

Received: Febrary 11th, 2017. Received in revised form: October 11th, 2017. Accepted: October 23th, 2017.

Abstract
This paper presented a study of abrasive disintegration in a 400 MPa Abrasive Water Jet (AWJ). Abrasive particle size and distribution play a major role in machining and cutting efficiency of abrasive water jets. Tested garnet abrasive, commonly used in the abrasive water jet treatment, and corundum. It is of scientific interest to observe the disintegration of these particles which have been interactive with uncommonly used abrasive materials. Time impact of abrasive grains on the workpiece is very short and not all the grain in the stream of being able to do the work of cutting, you should expect the possibility of recovering the abrasive treatment. Considerable importance is the increase in cutting capacity crushed grains due to reveal new cutting edges. Based on a feasibility study this paper will present some results on achieved cutting data and shows also wear of the used focusing tube - the main part responsible for the formation of the jet.

Keywords: Abrasive; water jet; grain size; recycling.

Valoración de la desintegración y reciclaje de los componentes abrasivos en procesos de cortes con agua

Resumen
Este trabajo presentó un estudio de la desintegración abrasiva en un chorro de agua abrasivo de 400 MPa (AWJ). El tamaño y la distribución de partículas abrasivas juegan un papel importante en el mecanizado y la eficacia de corte de los chorros de agua abrasiva. Abrasivo de granate probado, comúnmente utilizado en el tratamiento con chorro de agua abrasivo y corindón. Es de interés científico observar la desintegración de estas partículas que han sido interactivas con materiales abrasivos poco comunes. El impacto del tiempo de los granos abrasivos en la pieza de trabajo es muy corto y no todo el grano en la corriente de poder hacer el trabajo de corte, debe esperar la posibilidad de recuperar el tratamiento abrasivo. Considerable importancia es el aumento en la capacidad de corte de granos triturados debido a revelar nuevos bordes de corte. Con base en un estudio de factibilidad, este documento presentará algunos resultados sobre los datos de corte obtenidos y muestra también el desgaste del tubo de enfoque utilizado, la principal parte responsable de la formación del chorro.

Palabras clave: Abrasivo; chorro de agua; tamaño de grano; reciclaje.

1. Introduction

Among the methods of machining special attention they deserve environmentally friendly. This is mainly plastic processing [8,9] and high pressure water jet technology [15].

Cutting by high-pressure water jet is one of advanced methods of materials machining. This technology has many advantages: wide range of options [18], including the processing of complex shapes, cutting of a large variety of materials [5,6,17], and high effectiveness under extreme conditions (hazard of explosion or fire, underwater works up to a depth of 6000 m, etc.) and the environmental friendliness [7].

Treating materials using a high pressure abrasive water jet is more complex than conventional treatments. Therefore, optimization of the machining is the subject of many studies [4,14,21]. High pressure water is converted to a high speed jet inside a nozzle (Fig. 1a.) and flows out of the nozzle at a speed of several hundred meters per second, seizes abrasive particles and accelerates them to large kinetic energies.

How to cite: Perec, A., Disintegration and recycling possibility of selected abrasives for water jet cutting DYNA, 84(203), pp. 249-256, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

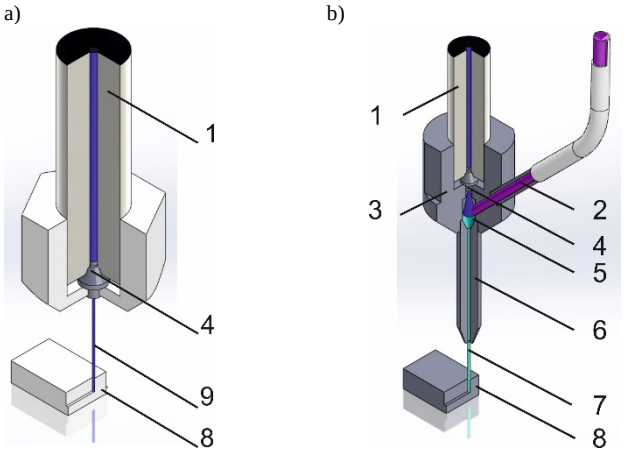
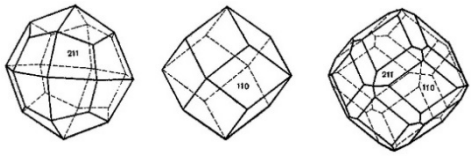


Figure 1. Schematic diagram of: a) Water Jet cutting; b) Abrasive Water Jet cutting: 1. High pressure water inlet, 2. Abrasive inlet, 3. Cutting head body, 4. Water nozzle, 5. Mixing chamber, 6. Focusing tube, 7. High Pressure Abrasive Water Jet, 8. Machining sample, 9. High Pressure Water Jet. Source: The author.

Table 1.
Garnet (almandine) properties.



Crystal system	Cubic
Twinning	None
Unit cell	a = 11.53 Å
Habit	Crystals usually dodecahedrons or trapezohedrons; also in combination or with hexocathedron; massive; granular
Cleavage	1; {110} parting sometimes distinct
Fracture	Conchoidal to uneven
Tenacity	Brittle
Color	Deep red to reddish-brown, sometimes with a violet or brown or brownish black hue
Hardness (Mohs)	6.5-7.5
Density	4.1-4.3

Source: Adapted from [10]

Adding to the water jet the dry abrasive in a special mixer injector (Fig. 1b), causes increase cutting efficiency. As a result, it becomes possible to almost any material cutting with low roughness of cutting surface [13,16,20]. The most commonly used pressure in the system, called AWJ, ranges from 400 to 600 MPa and common abrasive is garnet [2,11]. Its popularity in the processing stream as an abrasive garnet is caused by achieving high performance at relatively low wear focusing tube [3].

The cost of abrasive is the main cost of processing an abrasive water jet [15] therefore purposeful work aimed towards the use of the cheapest abrasive materials and their recycling.

The roughness of the cut surface is comparable with the surface of the rough grinding and reaches a value Ra equal 2 μm [1,19].

2. Materials and methods

2.1. Abrasive materials

2.1.1. Garnet

The study used GMA Garnet abrasives supplied by GMA Garnet Pty Ltd, Western Australia. Almandine is the iron aluminum garnet. Almandine, like other garnets, forms rounded crystals with 12 rhombic or 24 trapezoidal faces or combinations of these and some other forms. This crystal habit is classic for the garnet minerals. Almandine is the most common of the garnets but seldom occurs in specimens worthy of collections or fit for gems. Almandine is usually found either as rocks forming mineral in magmatic and metamorphic acid rocks (such as migmatites, garnet-biotite gneisses, granulites, micaschists, pegmatites, diorites, etc.) or as heavy mineral sand from weathered hard rocks, secondary concentrated in present-day and/or pre-existing streams and other alluvial deposits or in present-day and/or pre-existing beaches and other shore line marine deposits. Only selected few localities are mentioned. Industrial abrasive made from garnet almandine is prevalent abrasive used in AWJ cutting. Degree of damage of big crystals of garnet almandine (porphyroblasts) in rocks (i.e. number of individual particles limited by cracks in one porphyroblast (crystal)) plays an important role in determination of suitability of the almandine for production of industrial abrasive concentrate for AWJ cutting [10].

The properties of abrasives and view of crystal shape are shown in Table 1.

2.1.2. Corundum (α-Al_2O_3)

Corundum is a very hard, tough, and stable mineral. It is the second hardest mineral after diamond. It is also unaffected by acids and most environments.

Natural corundum occurs as contact metamorphic rocks (emery) and precious stones (sapphire, ruby). Translucent brown corundum and emery are the most common forms of corundum. These are fairly common and when ground up, they are the most favorable abrasives. The industrial term “emery” describing corundum abrasives is derived from the variety emery, which is mined for abrasive use.

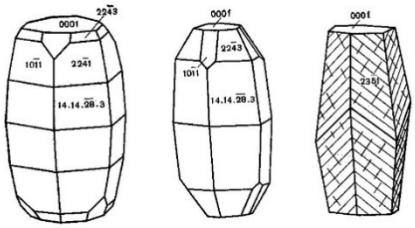
Corundum is easily synthesized, and many corundum abrasives are synthetic. Corundum abrasives are produced in various grades of purity and chemical composition.

Industrial abrasive products based on corundum are used mainly for air blasting and cleaning (cleaning of metals, paint removal, etc.). High level of focusing tube wear limits their usage in AWJ cutting. Corundum based abrasives are available at many grain size fractions with different mineralogical and chemical purity. Corundum is stable abrasive material with a good recycling possibility; it is relatively cheap in case that industrial corundum is used as secondary raw material (product of waste recycling).

For research was used white fused alumina supplied by LKAB Minerals. It is white in color, a dense mineral and has predominantly large crystals of alpha corundum.

The properties of abrasives and view of crystal shape are shown in Table 2.

Table 2.
Corundum properties.



Crystal system	Hexagonal (Trigonal)
Twinning	Common on {10-11}, lamellar; rare on {0001}
Unit cell	a = 4.76 Å; c = 12.99 Å
Habit	Crystals often well-developed, steep-pyramidal, prismatic, tabular; barrel-shaped; massive
Cleavage	2; {0001} and {10-11} parting
Fracture	Uneven, conchoidal
Tenacity	Brittle
Color	Many colors, including blue, red, violet, pink, green, yellow, orange, gray, white, colorless, and black
Hardness (Mohs)	9
Density	4.0 – 4.1

Source: Adapted from [10]

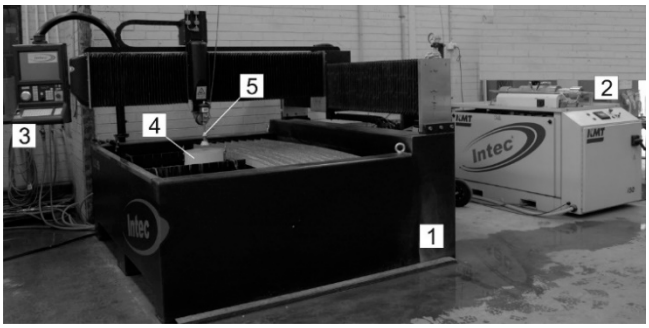


Figure 2. Testing rig: 1) Cutting table, 2) Intensifier, 3) Control Unit, 4) Catcher, 5) Cutting Head.
Source: The author.

2.2. Focusing tubes

In research was used focusing tubes made from unique, patented materials that are literally changing the definition of wear resistance ROCTEC100. The ROCTEC process enables the combination of these advanced ceramic materials without the need for a soft metal binder, as is the case with tungsten carbide/cobalt using traditional sintering technology.

The ROCTEC process enables focusing tubes to be formed using very short consolidation cycles to minimize the natural tendency of ceramic particles to grow in size, when exposed to high heat for long periods. Eliminating a metallic binder and maintaining extra-fine grain size both contribute to optimum focusing tube performance. The result is an extremely durable material that fiercely resists abrasive and erosive wear.

2.3. Apparatus

The equipment used was a KMT Intensifier type I50, 2 axis CNC table type ILS55 by Techni Waterjet with computer control system (Fig. 2).

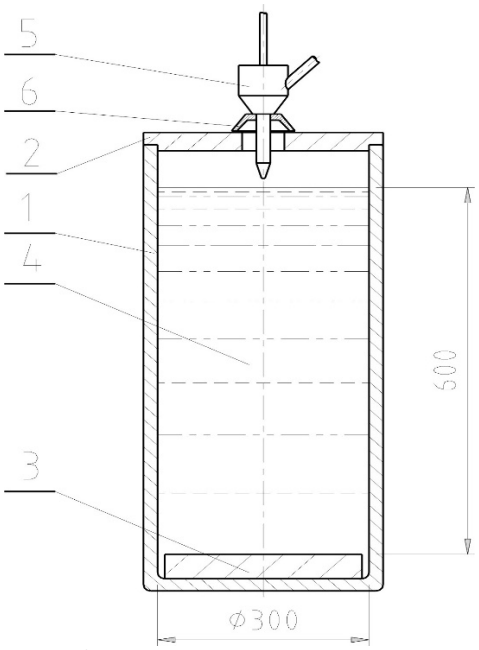
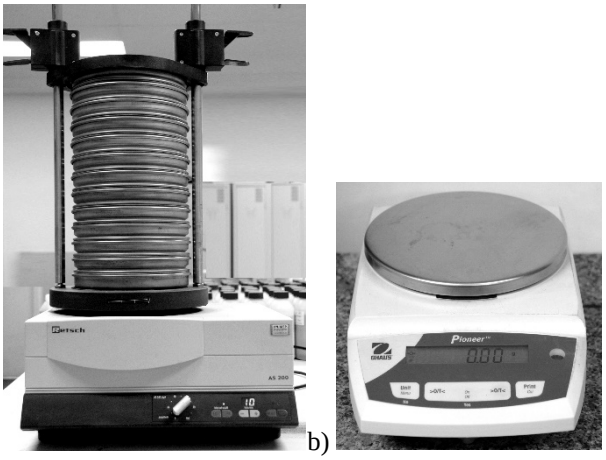


Figure 3. Catcher for abrasive jet: 1) Tank, 2) Tank Cap, 3) Mild Steel Shield, 4) Water, 5) Cutting Head, 6) Rubber Head Cap.
Source: The author.

To capture abrasives after its exit from the focusing tube, a special receiver was used (Fig. 3). The receiver was designed to collect the abrasives and to prevent any further particle disintegration after leaving the focusing tube. The bottom PVC receiver was covered by a steel plate to prevent perforation. No signs of wear were observed on the protective plate after conclusion of testing [12].

For establishing the particle size distribution of the abrasive, Retsch sieving equipment was used and the mass of abrasive remaining on the sieves was weighed on the digital lab scales (Fig. 4).

Microscopic photos of abrasive particles were taken on a microscope Olympus SZ-40 equipped with a digital camera MD1800 Am Scope type with 8MB CCD



a) b)

Figure 4. a) Retsch sieving equipment, b) digital lab scale
Source: The author.

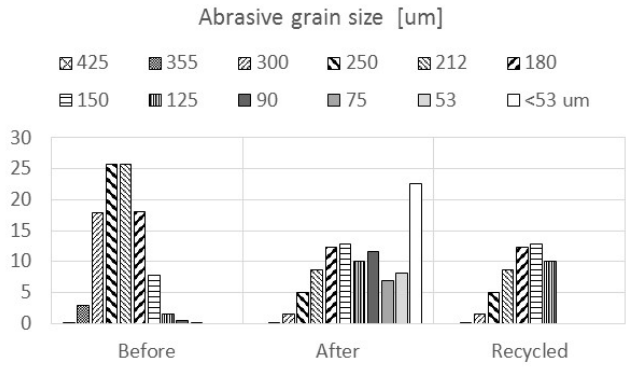


Figure 5. Disintegration of garnet after passing through cutting head with water nozzle ID 0.25 mm and focusing tube ID 0.76 mm. Pressure 390 MPa
Source: The author.

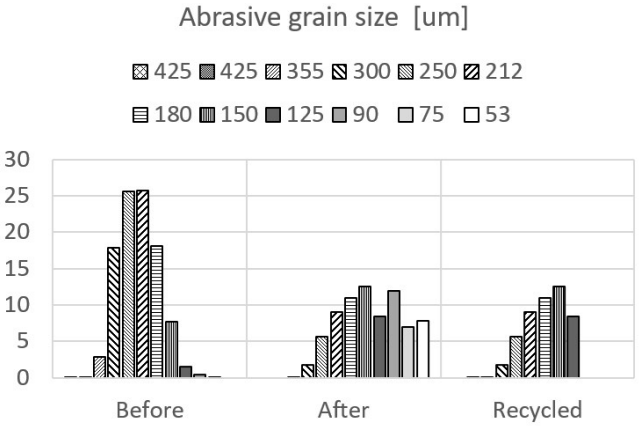


Figure 6. Disintegration of garnet after passing through cutting head with water nozzle ID 0.33 mm and focusing tube ID 0.76 mm. Pressure 390 MPa
Source: The author.

4. Tests results and discussion

4.1. Abrasive grain disintegration

4.1.1. Garnet

The results of the study of GMA80 abrasive fractured during formation of jets at a pressure of 390 MPa through a 0.25 mm orifice, 0.76 mm ID focusing tube and average of abrasive flow rate are shown in Fig. 5.

The largest fraction (almost 25%) was smaller than 53 μm. Overall a significant particle size decrease was observed. Abrasive mass flow rate (concentration of abrasive in the stream) had almost no impact on particle fragmentation [11].

The results of disintegration of GMA80 abrasive at a pressure of 390 MPa and 0.33 mm orifice, 0.76 mm ID focusing tube and average of abrasive flow rate are shown in Fig. 6.

The largest fraction (almost 13%) was equal 150 μm. Overall a significant particle size decrease was observed. Abrasive mass flow rate (concentration of abrasive in the stream) had also almost no impact on particle fragmentation.

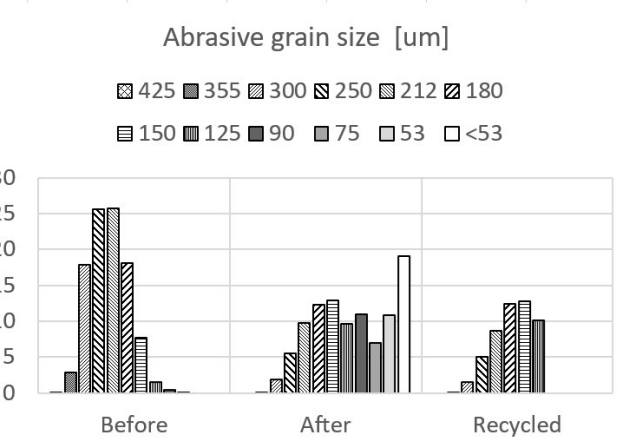


Figure 7. Disintegration of garnet after passing through cutting head with water nozzle ID 0.33 mm and focusing tube ID 1.02 mm. Pressure 390 MPa
Source: The author.

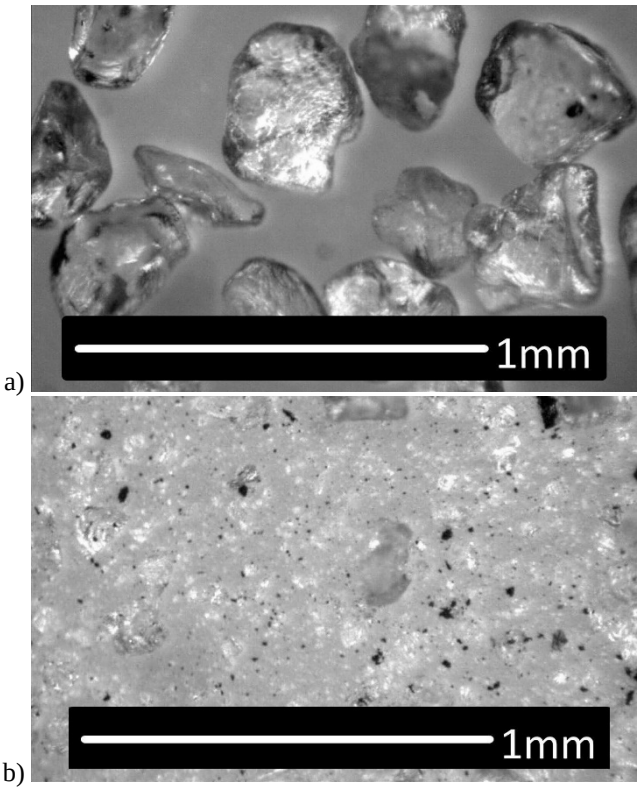


Figure 8. Abrasive grains garnet 80 Mesh a) before, b) after forming in cutting head. Magnification 60x.
Source: The author.

In Fig.7 are shown the results of breakage of GMA80 abrasive at a pressure of 390 MPa and 0.33 mm orifice, and 1.02 mm ID focusing tube and average of abrasive flow rate. The largest fraction (almost 20%) was smaller than 53 μm. Overall a significant particle size decrease was observed. Abrasive mass flow rate had almost no impact on particle fragmentation

Fig. 8 shows sample abrasive particles before and after leaving the focusing tube. One can observe different size

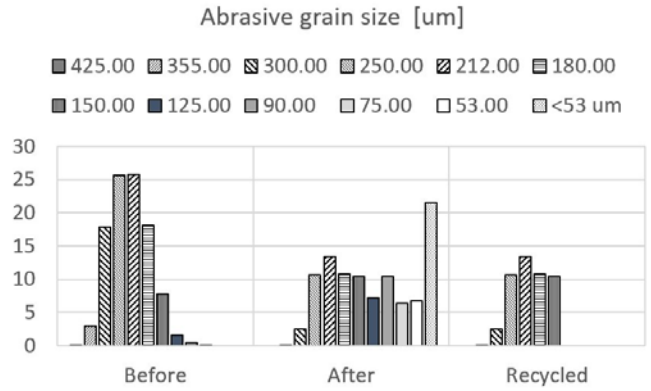


Figure 9. Disintegration of Corundum 60 Mesh after passing through cutting head with water nozzle ID 0.25 mm and focusing tube ID 0.76 mm, Pressure 390 MPa.
Source: The author.

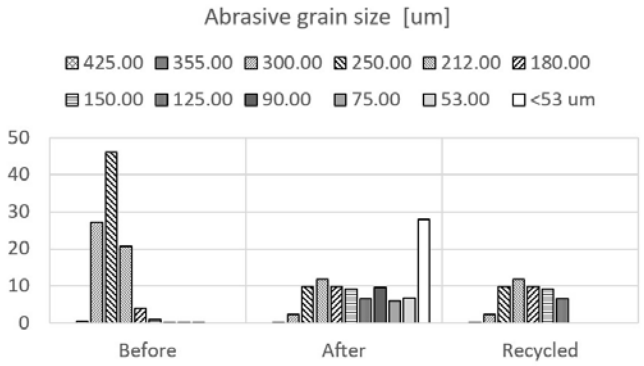


Figure 10. Disintegration of Corundum 60 Mesh after passing through cutting head with water nozzle ID 0.33 mm and focusing tube ID 0.76 mm, Pressure 390 MPa.
Source: The author.

grains, mostly isometric in shape, but with sharp edges. Most grains are fine. Among them, you can see a few grains with larger dimensions.

4.1.2. Corundum

The results of the study of corundum abrasive fractured during formation of jets at a pressure of 390 MPa through a ID 0.25 mm. Orifice and 0.76 mm ID focusing tube are shown in Fig. 9.

The largest share (22%) belonged to the abrasive grains size smaller than 53 μm. Overall a very significant particle size decrease was observed.

The results of disintegration of corundum abrasive at a pressure of 390 MPa and 0.33 mm orifice, 0.76 mm ID focusing tube and average of abrasive flow rate are shown in Fig. 10.

The largest fraction (almost 30%) was below 53 μm. Overall a significant particle size decrease was observed. Abrasive mass flow rate had almost no impact on particle fragmentation.

In Fig. 11 are shown the results of breakage of corundum abrasive at a pressure of 390 MPa and 0.33 mm orifice, and

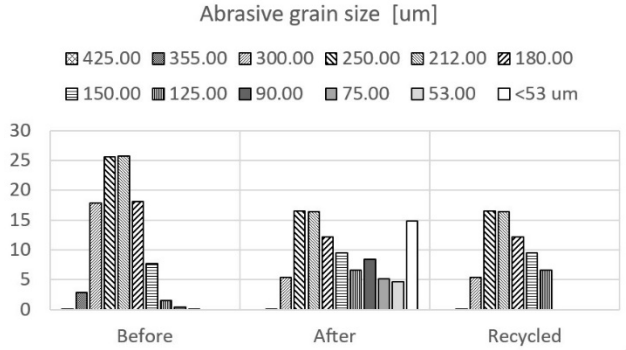


Figure 11. Disintegration of Corundum 60 Mesh after passing through cutting head with water nozzle ID 0.33 mm and focusing tube ID 1.02 mm, Pressure 390 MPa.
Source: The author.

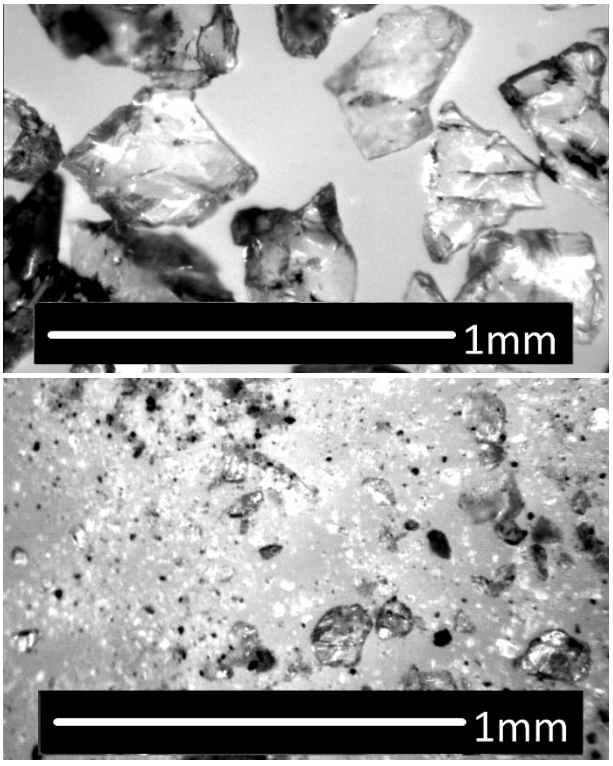


Figure 12. Abrasive grains Corundum 60 Mesh a) before, b) after forming in cutting head. Magnification 60x.
Source: The author.

1.02 mm ID focusing tube and average of abrasive flow rate. The largest fraction (almost 15%) was smaller than 53 μm. Overall a significant particle size decrease was observed.

Fig. 12 shows sample abrasive particles of corundum before and after leaving the focusing tube. One can observe a large number of very small grains. Also seen are medium-sized and large-sized corundum grains.

4.2. Recycling potential

After abrasive catching and drying sieve analysis was carried out and the analysis the amount of the individual fractions was

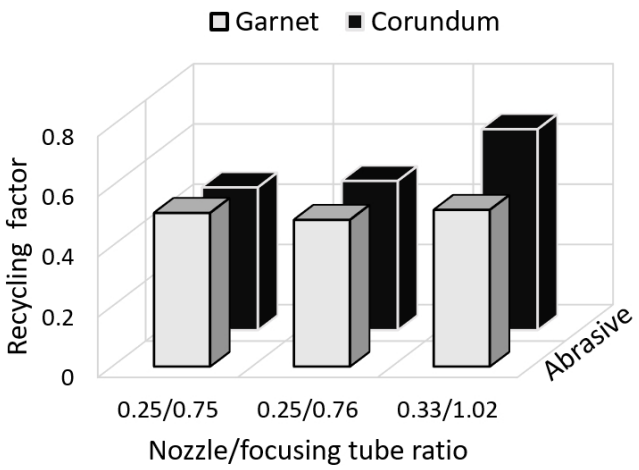


Figure 13. Recycling rate for tested abrasives
Source: The author.

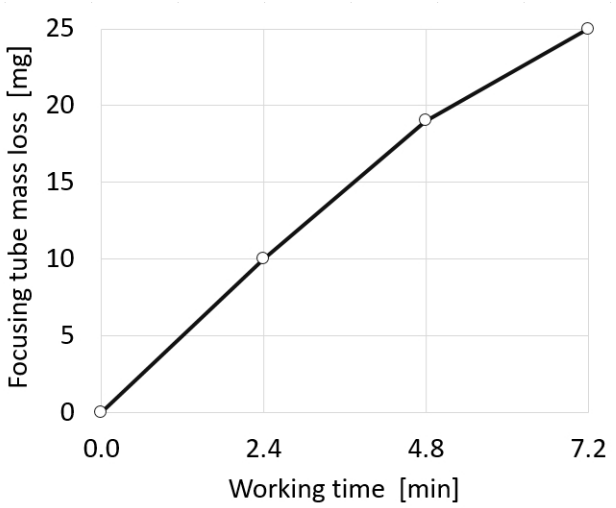


Figure 14. Relation of focusing tube mass loss and working time for garnet.
Source: The author.

determined. For test abrasive size 80 Mesh size range is from 300 to 125 μm. To determine what fraction of the original range found in the mass of particulate after treatment, all of the fractions smaller than the lower limit of the particle distribution, were rejected. It is illustrated in Figs. 5, 6, 7 for garnet and Figs. 9, 10, 11 for corundum.

The recycling rate was calculated on basis equation:

$$R_f = \frac{m_r}{m_t} \quad (1)$$

Where:
R_r is abrasive recycling factor,
m_r is mass of recycled abrasive
m_t is total mass of abrasive

Specific results for tested abrasives are presented in Fig. 13. The even recycling factor, amounting near 0.5 was observed for the garnet. This means it can be expected that half of the spent abrasive is possible to re-use. The other abrasive was corundum, with the recycling factor in range from 0.47 to 0.67.

4.3. Wear of focusing tube

Erosive properties have an effect not only on the parameters of cut material but also on the durability of focusing tube [1]. On the studies basis, it's have identified the ability of erosion abrasive wear rates by calculating the focusing tube.

On Fig. 14 presented relation of focusing tube mass loss and abrasive flow for garnet and on Fig. 15 for corundum. The biggest focusing tube weight loss was observed for corundum. After the maximum test time, equal 7.2 min., the weight loss to almost 1600 mg. For garnet loss in weight after 7.2 min. amounted 25 mg.

Focusing tube mass loss factor M_f is calculated based on the equation:

$$M_f(t) = \frac{\Delta m_t}{\Delta t} \quad (2)$$

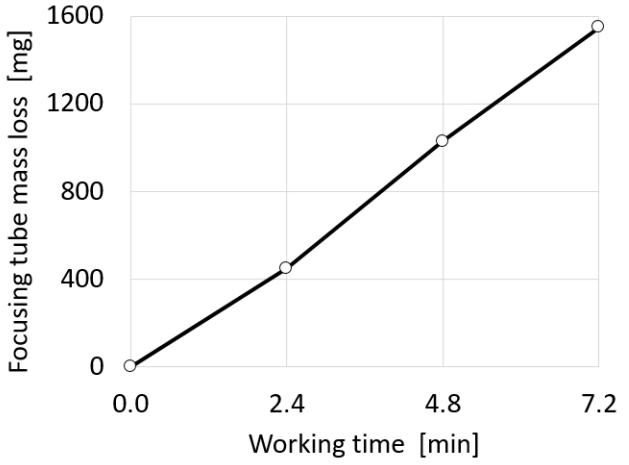


Figure 15. Relation of focusing tube mass loss and working time for corundum.
Source: The author.

Where:
Δm_t is mass loss of focusing tube [g],
Δt is working time [s].

Illustrations of this equation for the tested abrasives shows Fig. 16. The highest focusing tube mass loss factor, equal to 3.51 is characterized by corundum abrasive. For the garnet abrasive M_f factor is smaller and reaches value of 0.06.

Measurements of the focusing tube internal geometry were carried out on the microscope. To determine the shape of the nozzle were made of special casting a two-component silicone material, Silastomer P50, which have a high elasticity when solidified, and low shrinkage.

In Fig. 17. shows an example of the effects of wear Focusing tube. After 5 minutes (Fig. 15a) will wear only the beginning of a cylindrical hole in which passes the cone. After 20 minutes of operation, the inner opening is increased, while the central part can be observed erosion effects as a strong deterioration of the focusing tube.

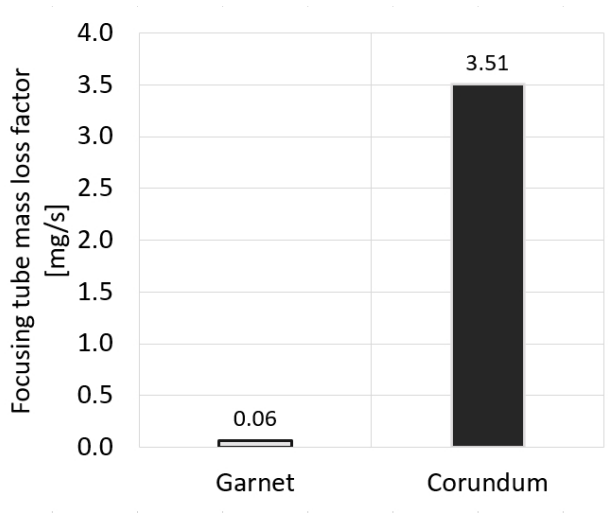


Figure 16. Focusing tube mass loss factor M_f for tested abrasive.
Source: The author.



Figure 17. Shape of focusing tube wear with corundum after: a) 5 min, b) 10 min. c) 20 min.
Source: The author.

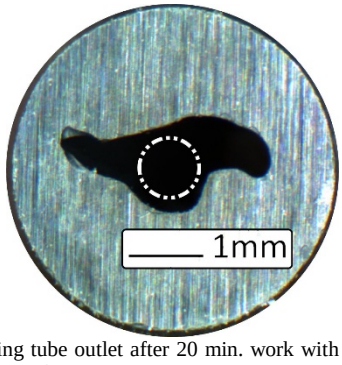


Figure 18. Focusing tube outlet after 20 min. work with corundum. Dash-dot-dot line – original focusing tube ID = 0.76 mm.
Source: The author.

Also, at the outlet of the nozzle showing intense wear in form of flattened cone, which confirms Fig. 18.

5. Conclusions

Based on the research following conclusions were drawn:

- The biggest recycling potential, near 50% characterized garnet.
- Recycling potential of corundum is from 47-67% range, but abrasive wear of focusing tube is 60 time bigger then garnet.
- Maximal working time of focusing tube with corungum abrasive not exceed 20 min.
- Further studies should test the cutting ability of recovered abrasive.

References

[1] Barlić, J., Nedić,B. and Marušić, V., Focussing tube wear and quality of the machined surface of the abrasive water jet machining, Tribology in Industry, 30(3-4), pp. 55-58, 2008.

[2] Galecki, G. and Mazurkiewicz, M., Hydroabrasive cutting head—energy transfer efficiency. Proceeding of the fourth U.S. Water Jet Conference, 1987, pp. 172-177.

[3] Hlavač, L., Hlaváčová, I., Jandacka, P. and Madr, V., Comminution of material particles by water jets - Influence of the inner shape of the mixing chamber. International Journal of Mineral Processing 95(1-4), pp. 25-29, 2010. DOI: 10.1016/j.minpro. 2010.03.003.

[4] Hloch, S. and Valicek, J., Significance of barton garnet and olivine evaluation at abrasive waterjet cutting by factor analysis, Nonconventional Technologies Review, 4(9), pp. 25-30, 2007.

[5] Hloch, S., Hlaváček, P., Vasilko, K., Cárach, J., Samardžič, I., Kozak, D., Hlavatý, I., Ščučka, J., Klich, J. and Klichová, D., Abrasive waterjet (AWJ) titanium tangential turning evaluation. Metalurgia 53, pp.537-540, 2014.

[6] Hutyrová, Z., Ščučka, J., Hloch, S. Hlaváček, P. and Zeleňák, M., Turning of wood plastic composites by water jet and abrasive water jet International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84, pp. 1615, 2016. DOI: 10.1007/s00170-015-7831-6

[7] Kukiełka, K., Ecological aspects of the implementation of new technologies processing for machinery parts. Annual Set the Environmental Protection, 1(18), pp. 137-157, 2016.

[8] Kukielka, L., New damping models of metallic materials and its application in non-linear dynamical cold processes of metal forming, Steel Research International, 9(81), pp. 1482-1485, 2010. DOI: 10.1002 /srin.201190002

[9] Kukielka, L. and Kukielka, K., Numerical analysis of the process of trapezoidal thread rolling, in: C.A. Brebbia (Ed.), High Performance Structures and Materials III, Book Series: WIT Transactions on the Built Environment, 85, pp. 663-672, 2006. DOI: 10.2495/HPSM06065

[10] Martinec, P., Foldyna, J., Sitek, L., Ščučka, J. and Vašek, J., Abrasives for AWJ cutting. Thesis, Institute of Geonics, Ostrava, Czech Republic 2002.

[11] Perec, A., Abrasive grain breakage process during the high pressure waterjet formation. Proceedings of 2011 WJTA-IMCA Conference, Houston, USA 2011, Paper C1.

[12] Perec, A., Comparison of abrasive grain disintegration during the jet formation abrasive water jet and abrasive slurry injection jet. Proceedings of 21-st International Conference on Water Jetting, Ottawa, Canada 2012, pp. 319-327.

[13] Perec, A., Pude, F., Stirnimann, J. and Wegener, K., Feasibility study on the use of the fractal analysis method for evaluating the surface quality generated by high pressure waterjet machining. Technical Gazette / Tehnički Vjesnik 4(22), pp. 879-883, 2015. DOI: 10.17559/TV-20140128231244 .

[14] Perec, A., Abrasive suspension water jet cutting optimization using orthogonal array design, Procedia Engineering 149, pp. 366-373, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng. 2016.06.680.

[15] Perec, A., Environmental aspects of abrasive water jet cutting. Annual Set of Environment Protection (Rocznik Ochrona Srodowiska), 149, pp. 366-373, 2017.

[16] Perec, A., Pude, F., Kaufeld, M. and Wegener, K., Obtaining the selected surface roughness by means of mathematical model based parameter optimization in abrasive waterjet cutting. Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering (SV-JME), 63(10), pp. 606-613, 2017. DOI: 10.5545/sv-jme.2017.4463

[17] Radvanska, A., Petru, J., Monkova, K., Zlamal, T., Hreha, P., Šomsak, M., Andrej, A. and Šafran, B., Rationalization of manufacturing of plastic injection moulds by abrasive waterjet. Technical Gazette. 22(2), pp. 521-525, 2015. DOI: 10.17559/TV-20130502125348

[18] Sobczak, R., Praźmo, J., Perec, A. and Chmielik, I., Dust free surface treatment parameters of the three-phase jet, generated in the Sandbot device. MM (Modern Machinery) Science Journal, March 2016, pp. 872-876. DOI:10.17973/MMSJ.2016_03_201602
[19] Ťavodova, M., The surface quality of materials after cutting by abrasive water jet evaluated by selected methods, Manufacturing Technology: Journal for Science, Research and Production. 2(13), pp. 236-241, 2013.
[20] Ťavodova, M., Evaluation of roughness of the AIMg3 cut surface after abrasive water jet processing. Engineering Technology Strojírenská Technologie 6(16), pp. 42-48, 2011.
[21] Valíček, J., Harničárová, M., Hlavatý, I., Grznárik, R., Kušnerová, M., Hutyrová, Z. and Panda, A., A new approach for the determination of technological parameters for hydroabrasive cutting of materials, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 47(5-6) pp. 462-471, 2016. DOI: 10.1002/mawe. 201600522

A. Perec, received the BSc. Eng. and MSc. in Mechanical Engineering in 1988, and the PhD. degree in Mechanical Engineering (Advanced Manufacturing) in 1995, all of them from the Koszalin University of Technology, Koszalin, Poland. From 1988 to 2008, he worked at Koszalin University of Technology as assistant/associate professor and from 2008-2012 for the JetNet International Pty. Ltd. in Western Australia as the Head of Research & Development Division. From 2013 to 2014, he worked at Micromachining Division of Inspire/ETH Zurich, Switzerland as a senior researcher. Now he is an associate professor at the Faculty of Technology of Jacob of Paradies University in Gorzow Wlkp., Poland. His scientific interests include advanced manufacturing, water jet technology and ultra-high pressure technology.
ORCID: 0000-0003-3132-9514

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Mecánica

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Mecánica

Mayor información:

E-mail: acmecanica_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 4259262

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

A genetic algorithm to solve one mining selection problem

Orlando Belete-Fuentes [a]; Rafael Zamora-Matamoros [b] & Daimel Caballero-Echevarría [b]

[a] *Facultad de Geología y Minería, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. orlandobelette@gmail.com*
[b], *Centro de Investigación del Níquel, Cuba. rzamora@cil.moa.minem.cu, dcaballero@cil.moa.minem.cu*

Received: June 9th, de 2017. Received in revised form: October 10th, 2017. Accepted: October 24th, 2017

Abstract
Based on the decision to automate the solution of an optimization problem related to the selection of an "N" number of geological exploration wells in a reservoir, which reflects the general characteristics of the well and having the mathematical models created for that purpose, arises the need to look for some alternative that allows to obtain the solutions of the raised problem. The mathematical models created generate a system formed by an objective function, several constraints in the form of inequalities and an additional restriction, in the form of equality: a classic problem of selection. This type of problem has solutions of non-polynomial computational complexity; for this reason, instead of implementing complex algorithms, it was decided to design an automated tool based on the use of genetic algorithms. An automated application was created for the solution of the problem of selection of a described mining sample, being able to implement a low complexity computational solution.

Keywords: Genetic algorithm; mathematical modeling; mining, programming.

Técnicas genéticas en la solución de un problema minero

Resumen
A partir de la decisión de automatizar la solución de un problema de optimización vinculado a la selección de una cantidad “N” de pozos de un yacimiento, que refleje las características generales estudiadas del mismo y disponiendo de los modelos matemáticos creados a tal efecto, surge la necesidad de buscar alguna alternativa que permita obtener las soluciones del problema planteado. Los modelos matemáticos creados generan un sistema formado por una función objetivo, varias restricciones en forma de desigualdades y una restricción adicional, en forma de igualdad: un problema clásico de selección. Este tipo de problema tiene soluciones de complejidad computacional no polinomial; por tal motivo, en lugar de implementar algoritmos complejos, se decidió diseñar una herramienta automatizada basada en el empleo de algoritmos genéticos. Se creó una aplicación automatizada para la solución del problema de selección de una muestra minera descrito, lográndose implementar una solución computacional de baja complejidad.

Palabras claves: Algoritmo genético; minería; programación; yacimiento.

1. Introducción

En la industria del níquel, en el oriente de Cuba, es frecuente la realización de pruebas metalúrgicas con el material extraído de los diferentes yacimientos lateríticos. Estas pruebas son realizadas con el objetivo de estimar y ajustar la recuperación metalúrgica a nivel industrial. Como el mineral empleado en estas pruebas debe ser representativo de cada uno de los yacimientos, la “industria” se formula el siguiente problema:

“Problema de selección minero”: Dados “n” pozos de la red de exploración/explotación minera, cómo seleccionar “N” de ellos que sean representativos de las características de todo el yacimiento.

Actualmente la industria del níquel cubana da respuesta a esta interrogante:

- Utilizando métodos tradicionales basados en modelos matemáticos (sustentados por métodos geoestadísticos).
- Utilizando el modelado Markoviano: "El modelo Markoviano" para yacimientos constituye una secuencia de cadenas de Markov [6], que genera un sistema de matrices de transferencia, cada una de las cuales se corresponde con una dirección en el yacimiento sobre la red de exploración, se construye sucesivamente de un pozo de la red de

How to cite: Belete-Fuentes, O., Zamora- Matamoros, R. and Caballero-Echevarría, D., Técnicas genéticas en la solución de un problema minero DYNA, 84(203), pp. 257-262, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

exploración al inmediato y también a saltos. Los eventos que se modelan constituyen clases de comportamientos en el yacimiento; las matrices de transferencias contienen las probabilidades con que puede aparecer una clase en un punto, dada la ocurrencia de otra en el punto que se considera inmediato anterior, se apoya en una función de georeferencia para construir las distribuciones probabilísticas de las clases sobre el yacimiento" [5].

En el proceso de modelado de los yacimientos y en la construcción de su "Modelo Markoviano" son empleadas varias herramientas automatizadas; entre ellas la denominada SWORE (desarrollada por investigadores del Centro de Investigación del Níquel (CEDINIQ) que, en base a algoritmos de alta complejidad paralelizados para disminuir su tiempo de corrida, produce los coeficientes del siguiente modelo lineal binario:

Función objetivo:

$$max\left\{ z\sum_{j=1}^{n} C_j\, X_j \right\} \quad (1)$$

Restricciones:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}\, X_j \;\; b_i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_j\, N \quad (3)$$

$n, N \in 4, N < n$
$\forall \mathrm{i} = 1..\mathrm{n},\ \mathrm{n} \in N$
$\forall \mathrm{j} = 1..\mathrm{m}, \mathrm{m} \in N$

$$C_j \in R,\ C_j \geq 0 \quad (4)$$

$X_j \in \{0,1\}$
$b_i \in R,\ b_i \geq 0$
$a_{i,j} \in R,\ a_{ij} \geq 0$

Las ecuaciones (1), (2) y (3) pueden escribirse en forma vectorial de la siguiente manera:

Función objetivo:

$$max\{C\vec{X}\} \quad (5)$$

Restricciones:

$$A\vec{X} \;\geq\; \vec{b} \quad (6)$$

$$\left|\vec{X}\right| N \quad (7)$$

Debido a que las variables Xj (j= 1..n) sólo toman valores cero o uno (son variables binarias), el problema no puede ser resuelto directamente con el empleo del conocido método SIMPLEX de la "Investigación de Operaciones". Surge entonces la necesidad de emplear otras técnicas de optimización y por tanto investigar cómo solucionar este problema.

2. Materiales y métodos

Este trabajo investigativo parte de la necesidad de resolver un problema concreto surgido de otras investigaciones en el campo de la modelación matemática de problemas mineros: "el problema de selección minero" descrito anteriormente. Se desarrolló una búsqueda bibliográfica sobre el tema y en especial sobre la técnica de los algoritmos genéticos y sus aplicaciones.

2.1. Motivación

La investigación comenzó intentando responder una pregunta muy simple: cuál es la magnitud del problema a que nos enfrentamos?. Para brindar una idea clara formulemos un posible problema de selección de pozos mineros de forma muy concreta: "Se dispone de abundante información geoquímica y geofísica de cada uno de los 1500 pozos perforados en una red del yacimiento "Y" y se desea seleccionar 10 pozos que sean representativos de las características medidas del yacimiento, con el objetivo de realizar una prueba metalúrgica que aporte información sobre la eficiencia de extracción de níquel y cobalto en la industria operando con mineral proveniente del yacimiento "Y".

Aunque no es nuestra intención detallar todo el proceso, es bueno aclarar que la cantidad de pozos a seleccionar no debe ser muy pequeña, porque se afectaría la representatividad de la muestra y tampoco puede ser muy grande por el impacto económico de la prueba.

La cantidad de formas en que podemos seleccionar 10 pozos de una red formada por 1500 es 154203109280287000000000000. Imagine qué tiempo le tomaría a una computadora personal evaluar cada una de esas posibles soluciones en cada una de las "m" restricciones del modelo lineal binario propuesto para determinar cuáles las satisfacen e ir evaluándolas en la función objetivo para tomar la que maximiza su valor.

La Tabla 1 ilustra la magnitud de las cantidades de soluciones a evaluar a partir de la cantidad de pozos estudiados en las redes del yacimiento y asume que se pretenden seleccionar 10 pozos representativos del yacimiento ("N" = 10):

Tabla 1.
Relación "Cantidad de pozos – formas de seleccionar grupos de 10 pozos"

Cantidad de pozos	Cantidad de soluciones a evaluar
30	30045015
40	847660528
50	10272278170
60	75394027566
70	396704524216
80	1646492110120
90	5720645481903
100	17310309456440
200	22451004309013300
300	1398320233241700000
500	245810588801891000000
1000	263409560461970000000000
1100	686034345390320000000000
1200	164331279610894000000000
1300	366944570586638000000000
1400	771838035061633000000000
1500	**154203109280287000000000000**

Fuente: Elaboración propia

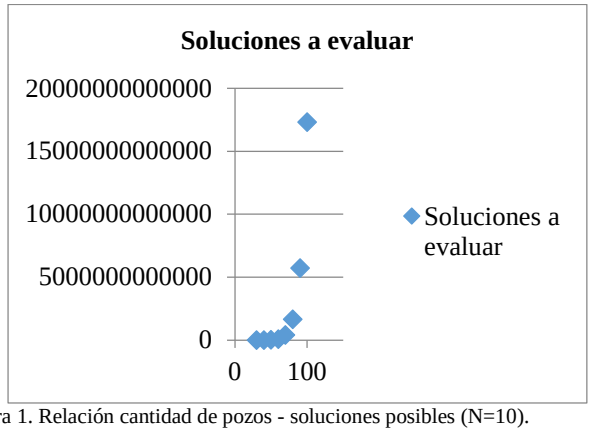


Figura 1. Relación cantidad de pozos - soluciones posibles (N=10).
Fuente: Elaboración propia.

```
Algoritmo Genético Básico()
{
 Generar población inicial
 Calcular fitness
 while (condición de término no satisfecha)
 {
  Cruzar y mutar
  Calcular fitness
  Seleccionar siguiente generación
 }
}
```

Figura 2. Esquema básico de un algoritmo genético (Salazar y Sarzuri, 2015).
Fuente: Elaboración propia.

El gráfico mostrado en la Fig. 1, confeccionado con datos de la Tabla 1 brinda una mejor idea de la magnitud del problema a resolver, ya que permite apreciar cómo se dispara la cantidad de soluciones a evaluar al incrementar la cantidad de pozos de 30 a 100 (Fig. 1):

Un estimado del tiempo que tardaría una computadora personal aceptable actualmente aportó el increíble resultado de unos cuantos años. Indiscutiblemente hay que buscar una alternativa diferente para resolver el problema planteado. La Fig. 2 resume varios métodos empleados en la solución de problemas de este tipo:

Tras rechazar el empleo de algunos métodos determinísticos y otros probabilísticos, algunos de forma práctica y otros de forma teórica, surge la idea de incursionar en el mundo de los algoritmos genéticos con el desarrollo de una aplicación para resolver el problema de programación lineal binaria.

Dado que gran parte de los problemas prácticos que se necesitan resolver son de los denominados NP-hard, los algoritmos heurísticos o de aproximación desempeñan un papel importante en la resolución de problemas de optimización discreta con la idea de encontrar buenas soluciones factibles de manera rápida [8].

2.2. Los algoritmos genéticos

Un algoritmo genético (AG) es una técnica de optimización y búsqueda basada en los principios de la genética y la selección natural. Un AG permite que una población compuesta de muchos individuos evolucione bajo reglas de selección específicas a un estado que maximice o minimice la adaptabilidad [2].

"Un algoritmo genético, desde el punto de vista de la optimización, es un método poblacional de búsqueda dirigida basada en probabilidad. Bajo una condición muy débil (que el algoritmo mantenga elitismo, es decir, guarde

siempre al mejor elemento de la población sin hacerle ningún cambio), se puede demostrar que el algoritmo converge en probabilidad al óptimo" [4].

"La terminología del algoritmo genético tiene una mezcla de términos naturales y artificiales. El conjunto de posibles soluciones se llama población. La población inicial evoluciona de generación en generación. Cada individuo de la población se llama cromosoma y cada código presente en el cromosoma se conoce como gen (el cromosoma es una cadena de genes)" [7].

Este esquema muestra los operadores genéticos básicos: Cruzamiento, mutación y selección correspondientes a procesos observados en los seres vivos: reproducción, mutación (cambios aleatorios no explicados en uno o varios individuos) y la selección natural. Cada uno de estos operadores, descritos por Rincón [6], puede ser concebido de diferentes formas, dando lugar a diversas variantes; por sólo citar un ejemplo: entre los métodos de selección clásicos se encuentran: la selección por ruleta, por torneo, etc.

Zbigniew [9] realiza una interesante descripción de qué son los algoritmos genéticos, cómo trabajan y por qué funcionan [9]. Mientras que en el capítulo catorce de Practical Optimization [1] podrá descubrir los secretos de los operadores genéticos básicos y algunas de las ventajas de los algoritmos genéticos entre ellas: la de trabajar con la solución completa y la facilidad de su implementación computacional.

2.3 Propuesta de algoritmo genético

El problema planteado y la ecuación (3) del modelo lineal binario desarrollado sugieren de forma natural la siguiente codificación para la creación de un algoritmo genético:

- Cromosoma o individuo: cualquier vector binario $\vec{x} \in \{0,1\}^{n,1}$.
- Gen: cualquier componente del vector binario; por ejemplo: $\vec{x}_1$

En esta codificación un individuo representa exactamente una de las posibles formas de seleccionar un subconjunto de "N" pozos representativos de las características estudiadas en los "n" pozos del yacimiento: una combinación de pozos candidata; mientras que cada gen (de un individuo) representa la pertenencia o no de cada pozo del yacimiento al subconjunto de "N" pozos representativos de las características del yacimiento.

En esta codificación un individuo representa exactamente una de las posibles formas de seleccionar un subconjunto de "N" pozos representativos de las características estudiadas en los "n" pozos del yacimiento: una combinación de pozos candidata; mientras que cada gen (de un individuo) representa la pertenencia o no de cada pozo del yacimiento al

subconjunto de "N" pozos representativos de las características del yacimiento.

Ejemplo #1: Supongamos que se estudia un yacimiento en busca de níquel, cobalto y manganeso. Para este estudio han sido perforados y analizados 1000 pozos (P1, P2, P3,…, P1000) deseándose obtener un subconjunto de 8 pozos representativos del yacimiento con vista a la realización de una prueba metalúrgica. Aquí la cantidad de combinaciones posibles es:

$$\text{cant} = \binom{1000}{8} = \frac{1000!}{8!\ (1000-8)!} = 24115080524699400000 \qquad (8)$$

El vector (1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,…0), con los 8 primeros componentes en uno y el resto en cero, representa la hipótesis: 8 primeros pozos (P1, P2, P3,…, P8) son representativos de las características estudiadas del yacimiento.

Análogamente el vector (0,0,…0,1,1,1,1,1,1,1,1), con 992 ceros al inicio y 8 unos al final, corresponde a la hipótesis de que los 8 últimos pozos del yacimiento (P993, P994, P995,…, P1000) son representativos del yacimiento.

Como hemos calculado en (8) tenemos 24115080524699400000 posibles combinaciones; en términos genéticos: una población de 24115080524699400000 individuos de los que deberíamos elegir el mejor adaptado a su entorno (el que cumpla con los requisitos exigidos: restricciones (6), (7) y (4) maximizando la función objetivo (5)). Lo que antes llamamos función objetivo en el modelo pasa a ser la *función de adaptabilidad* o "*fitness*" en el modelo genético.

Es conocido que todos los algoritmos genéticos son diferentes pero comparten una idea central, mostrada en la Fig. 3, basada en generar aleatoriamente una población inicial de individuos y aplicarle operadores genéticos para obtener una nueva población, manteniendo con una probabilidad conocida los mejores individuos de la generación anterior.

La población inicial puede ser obtenida por diversos métodos. Una clasificación interesante es definida teniendo en cuenta si se emplea o no información acerca del problema que se intenta resolver. En el *ejemplo #1* a la población inicial podría ser generada por ejemplo:

- Asignado unos y ceros aleatoriamente a las componentes de vectores de orden 1000 (sin conocimiento alguno del problema).
- Construyendo vectores de orden 100 con exactamente 8 componentes en uno (haciendo uso de la restricción (7) del modelo binario en forma vectorial) y el resto en cero.

En el algoritmo y aplicación objetos de este artículo fueron concebidos a partir de las ideas básicas de los algoritmos genéticos por lo que heredan su esquema básico.

La población inicial es construida con vectores generados aleatoriamente con una probabilidad conocida de obtener un vector que satisfaga la restricción (7) con el objetivo de mejorar controladamente la población inicial.

Antes de elegir este método de generación de la población inicial se analizaron las siguientes variantes:

1. Generar aleatoriamente la población. La ventaja de esta variante está dada por la diversidad de la población inicial, pero tiene la desventaja de un bajo elitismo de sus individuos, pues no garantizan el cumplimiento de la restricción más sencilla: la restricción (7).
2. Generar una población inicial que satisfaga la restricción de la cantidad de pozos a seleccionar. Esto es posible dado que la evaluación de la restricción (7) es extremadamente menos costosa que la evaluación de las restricciones (6). Esta variante incrementa notoriamente el elitismo de los individuos de la población, pues todos sus miembros ya satisfacen una de las restricciones del problema, pero simultáneamente, provoca que la siguiente generación de individuos (después de un proceso de reproducción o cruce) sea menos elitista que la de sus ancestros. Esta pérdida de elitismo viene dada porque, en la práctica, "N" es mucho menor que "n" y por tanto, los cromosomas de cada individuo tienen muchos genes con valor cero; por tal motivo los operadores de cruces genéticos clásicos tienden, en estos casos, a eliminar los genes en uno.
3. La variante hibrida o intermedia entre las dos anteriores elimina en cierta medida las desventajas de cada una de ellas, pero adiciona la complejidad de la elección adecuada del balance entre pozos que satisfacen la restricción (7) y pozos que no la satisfacen. Este equilibrio fue determinado de forma experimental y se piensa ajustar automáticamente según los resultados de cada corrida de la aplicación.

Como función de adaptabilidad se escogió la propia función objetivo ajustada con algunos pesos determinados en base a factibilidad de cumplimiento de cada una de las "m" restricciones descritas en (2). Estos pesos son generados a partir de un ordenamiento ascendente de los sumandos en cada restricción y la cantidad de X_j en uno necesarios para satisfacer cada restricción.

La reproducción fue planificada por el método clásico de un corte simple de genes pero con elección aleatoria del punto de corte para evitar la pérdida de diversidad de la población que este método genera en segundos descendientes. La introducción de un corte aleatorio hace que las nuevas generaciones tengan una probabilidad mayor de ser no homogéneas y por tanto incrementa la posibilidad de que el método continúe trabajando en busca del individuo óptimo. Adicionalmente el algoritmo propuesto incluye un operador genético denominado BigBang que es equivalente a generar una población inicial nueva y cuya ejecución es parametrizable, siendo recomendable su ajuste en base a la cantidad de ejecuciones del operador de reproducción y el de mutación empleados (la aplicación desarrollada brinda valores por defecto para cada parámetro configurable, pero permite su variación y afinamiento para problemas específicos).

El operador de mutación es el encargado, al igual que en la naturaleza, de mantener la diversidad de la población y generar individuos "atípicos", pero es importante no abuzar de él, porque su incremento implica un aumento de la aleatoriedad de la población. De incrementarse excesivamente la frecuencia de las mutaciones, el algoritmo genético se convertiría en un algoritmo de búsqueda aleatoria de soluciones.

El proceso de selección de los mejores individuos ha sido desarrollado a partir del método clásico de selección por

torneo, dividiendo la población generada por la reproducción (algunas ocasiones mutada) en dos grupos y enfrentando a cada individuo de un grupo con uno del otro en pequeños torneos. En este operador genético desarrollado, no siempre tomamos el mejor individuo en cada torneo (algo que parece una contradicción con la ideabásica de método genético, pero que mantiene la diversidad en la población). En esta variante de solución genética se ha introducido un coeficiente de probabilidad para la elección del mejor individuo en cada pequeño torneo; naturalmente si acercamos este coeficiente a cero, estaremos bajando la probabilidad de mejorar cualitativamente la población y si lo acercamos mucho a uno, estaremos disminuyendo la calidad de la población. Adicionalmente se ha introducido un coeficiente, denominado coeficiente de remplazo, para garantizar un mínimo de aleatoriedad en cada nueva generación obtenida por este algoritmo genético.

Es importante mantener la diversidad de la población porque, por ejemplo: el cruce de dos individuos de poca aptitud (bajo valor de la función de aptitud y por tanto individuos que no constituyen un óptimo en el problema minero), puede generar un nuevo individuo con mejor aptitud; sabemos que la naturaleza es sabia y ha probado la eficiencia de sus métodos.

Aunque es conocido que algunas herramientas que emplean actualmente métodos genéticos de solución, finalizan generalmente al dejar de encontrar soluciones, al disminuir la frecuencia de sus hallazgos o al alcanzar un umbral prefijado de la función de aptitud; el algoritmo desarrollado finaliza por tiempo de corrida dada la magnitud de la población total y la simplicidad computacional de su implementación.

3. Resultados y discusión

Se desarrolla una aplicación para la solución del "problema minero" descrito al inicio, la cual fue modelada según el paradigma de la orientación a objetos y programada en lenguaje C# empleándose algunas características de este lenguaje orientadas al paralelismo. La Fig. 4 muestra la pantalla de configuración de la aplicación para su corrida:

- En color rojo se han destacado los parámetros a fijar comúnmente para las corridas: la cantidad de pozos a seleccionar, la ubicación del fichero con los datos a procesar y la duración máxima para la corrida en minutos, horas o días.
- En color negro aparecen algunos parámetros que rigen el comportamiento del algoritmo genético implementado: tamaño de la población, coeficiente de remplazo, coeficiente de mutación y coeficiente BigBang. Los valores por defecto se consideran adecuados para problemas de selección de hasta un 10% en yacimientos con redes de hasta 2000 pozos.

La aplicación es capaz de detectar, como se muestra en la Fig. 5 soluciones triviales; esto significa que antes de iniciar la corrida del algoritmo genético se realizan un conjunto de validaciones de los datos y un análisis de soluciones triviales del problema.

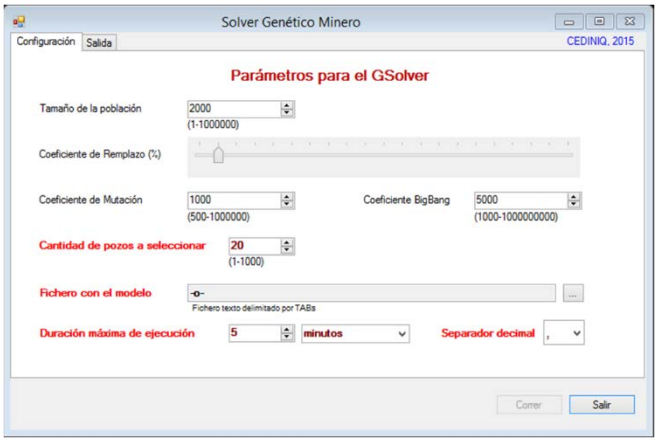


Figura 4. Pantalla de configuración de la aplicación.
Fuente: Elaboración propia.

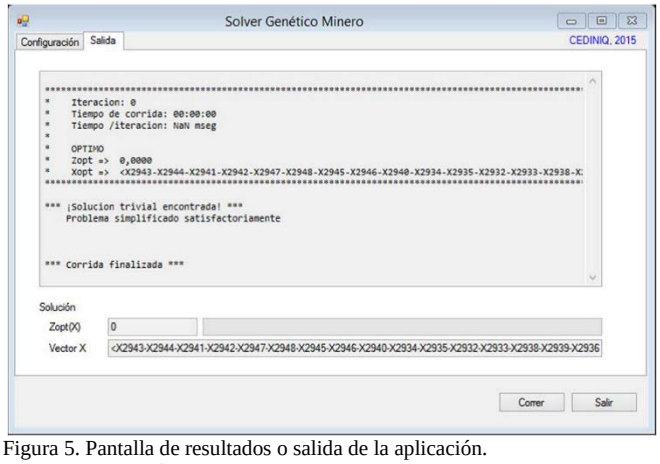


Figura 5. Pantalla de resultados o salida de la aplicación.
Fuente: Elaboración propia.

La solución mostrada tiene dos componentes:

1. $Z_{opt}(X)$ ⇔ Valor de la función de aptitud que puede ser útil para comparar la calidad soluciones aportadas por corridas diferentes de la aplicación.
2. Vector X ⇔ El mejor individuo encontrado en el tiempo de corrida prefijado. La representación de este vector binario sólo incluye sus componentes con valor uno, por lo que puede interpretarse como el listado de pozos seleccionados; por ejemplo, en la corrida cuyo resultado se muestra en la Fig. 4, los pozos a minar para la extracción de mineral destinado a la prueba metalúrgica son los siguientes: 2943, 2944, etc.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado un algoritmo y una aplicación automatizada para la solución del problema de selección de una muestra minera para una prueba metalúrgica descrito, en base a principios genéticos y de selección presentes en la naturaleza. Se logra implementar una solución a un problema de gran complejidad computacional empleando un método de solución no exacto, pero de convergencia teórica garantizada,

que ha sido automatizado de forma tal que puede emplearse en ordenadores personales.

A pesar de la complejidad computacional, con este trabajo se logra automatizar la última etapa del modelado de yacimientos mineros para la industria cubana del níquel elaborado por investigadores del Centro de Investigación del Níquel y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, siguiendo una clasificación sustancial multivariada y con el empleo del modelo de Márkov para procesos estocásticos discretos.

El trabajo puede perfeccionarse con el empleo de técnicas de aprendizaje de forma tal que el algoritmo se auto ajuste manejando metadatos de cada corrida: un tema abierto para futuras investigaciones.

Bibliografía

[1] Chinneck, J., Practical optimization: A gentle introduction [online]. [Consulted July 3 of 2015]. Available at: http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html

[2] Haupt, L. and Haupt, S.E., Practical genetics algorithms. 2da. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004.

[3] López, J., Optimización multi-objetivo. Aplicaciones a problemas del mundo real. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2013.

[4] Melián-Batista, B., Moreno-Pépez, J.A. y Moreno-Vega, J.M., Algoritmos genéticos. Una visión práctica. 71. 2009. [en línea]. [Consultado: 10 de junio 2015]. Disponible en: http://www.sinewton.org/numeros/numeros/71/Darwin_03.pdf

[5] Peña-Abreu, R.E. y Sampalanco, C.M., Optimización del muestreo tecnológico en yacimientos lateríticos cubanos. Ciencias de la Tierra y el Espacio, 14, pp. 38-50, 2013.

[6] Rincón, J.C., Aplicación de los algoritmos genéticos en la optimización del sistema de abastecimiento de agua de Barquisimento-Cabudare. Avances en Recursos Hidraulicos [En línea], 14, 2006. [Consultado 10 de junio 2015]. Disponible en: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/%20arh/article/viewFile/9328/9972

[7] Salazar-Horning, E. y Sarzuri-Guarachi, R.A. Algoritmo genético mejorado para la minimización de la tardanza total en un flowshop flexible con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería [En línea], 23. 2015. [Consultado 10 de junio 2015]. Disponible en: http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v23n1/art14.pdf.

[8] Vidal-Esmorís, A., 2013. Algoritmos heurísticos en optimización. Tesis de Maestría, Universidad de Santiago de Compostela, España.

[9] Zbigniew, M., Genetic Algorithms+ data Structures = Evolution Programs, Berlin, Springer-Verlag.1996.

R. Zamora-Matamoros, es Lic. en Matemática en 1987, de la Universidad de Oriente, Cuba. MSc. en Informática Aplicada a la Ingeniería y la Arquitectura (CREPIAI3). Ha tomado cursos de postgrado en Argentina, Canadá, Cuba, Ecuador, y España. Trabajó como: profesor en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa por más de 10 años, especialista principal en sistemas informáticos en Moa Nickel S.A., Consultor Informático en AITIPICI del Ecuador. Actualmente ocupa la plaza "Especialista B en Investigaciones" en el CEDINIQ.
ORCID: 0000-0002-9068-5001

O. Belete-Fuentes, es graduado de Ing. de Minas en 1986 y de Dr. En Ciencias Técnicas en 1999, ambos del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", en Holguín, Cuba. Se desempeña como profesor de topografía minera y máquinas mineras en la Facultad de Minas del ISMMM desde 1979, con 38 años de experiencia en la docencia. Ha publicado varios artículos relacionados con la topografía minera, y específicamente en el cálculo de los errores que afectan el volumen de mineral extraído. Ha participado en proyectos nacionales e internacionales. Es coordinador de la maestría topografía minera y ha obtenido varios premios en investigación otorgados por la Academia de Ciencias Provincial de Cuba. Es miembro del tribunal nacional de defensa de doctorado. Ha dirigido varios doctorados y maestrías.
ORCID: 0000-0002-2491-8030

D. Caballero- Hechavarría, es graduado de Ingeniería en Minas en 2013, en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Trabaja como técnico en adiestramiento en la unidad de Proyectos de Investigaciones del Centro de Investigaciones del Níquel. Ha recibido entrenamientos en las áreas de: geología, topografía y planificación minera de la empresa productora de níquel Comandante Ernesto Che Guevara y varios cursos de Informática. Actualmente cursa estudios en la maestría en minería en el ISMM. Ha presentado trabajo en eventos universitarios en el CINAREM 2013.
ORCID: 0000-0003-0054-5476



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Determination of unsafe behavior in bus drivers and its relationship to traffic accidents. Case study of a company of public transport in Colombia

Fabian Alfredo Torres-Sandoval

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Colombia. fabian.torres01@uptc.edu.co

Received: September 7th, de 2017. Received in revised form: October 10th, 2017. Accepted: October 25th, 2017

Abstract
A cross-sectional observational study with descriptive and analytical approach that aims at determining unsafe behavior of bus drivers from a company of public transportation and its relation to traffic accidents was conducted in a probability sample of 127 drivers. The results showed that drivers performed an average of 86.86 unsafe driving behaviors for every two hours of travel time; the most frequent behavior was speeding, while not keeping a safe distance was the main cause of the company's bus accidents. The correlation between unsafe behavior and causes of accidents in the company was positive but non-significant. The information gathered will allow to modify behaviors from unsafe to safe, as a future strategy for the improvement of road safety.

Keywords: Unsafe behaviors; bus drivers; traffic accidents; non-participatory observation.

Determinación de conductas inseguras en conductores de bus y su relación con accidentes de tránsito. Estudio de caso de una empresa de transporte público en Colombia

Resumen
Se realizó un estudio observacional de corte transversal con enfoque descriptivo analítico con el objetivo de determinar conductas inseguras en conductores de bus de una empresa de transporte público y su relación con accidentes de tránsito en una muestra probabilística de 127 conductores. Los resultados muestran que los conductores realizaron en promedio 86,86 conductas inseguras por cada dos horas de recorrido; de estas, el exceso de velocidad presentó mayor frecuencia, mientras que la principal causa de los accidentes de bus de la empresa fue no mantener distancia de seguridad. La correlación entre las conductas inseguras y las causas de los accidentes de la empresa es positiva pero no significativa. La información recolectada permitirá modificar las conductas inseguras mediante el aprendizaje de conductas seguras, como futura estrategia para el mejoramiento de la seguridad vial.

Palabras clave: Conductas inseguras; conductores de bus; accidentes de tránsito; observación no participativa.

1. Introducción

Los accidentes de tránsito constituyen un problema para la salud pública y la economía a nivel mundial [1,2]. Se estima que 1,2 millones de personas pierden la vida y hasta 50 millones resultan heridas debido a accidentes de tránsito cada año [1,3,4].

En Colombia, de acuerdo con un informe de la Contraloría General de la Republica sobre seguridad vial, las muertes por accidentes de tránsito son después de los homicidios, la segunda causa de muerte violenta [5]; entre los años 2013 y 2015 por accidentes en los diferentes medios de transporte terrestre automotor resultaron muertas 18989 personas y 130930 heridas; de estas, 230 personas perdieron la vida y 5139 resultaron heridas en accidentes de bus [6-8].

Este proyecto tomó como caso de estudio una empresa trasportadora ubicada en la ciudad de Sogamoso, Boyacá,

How to cite: Torres-Sandoval, F.A., Determinación de conductas inseguras en conductores de bus y su relación con accidentes de tránsito. Estudio de caso de una empresa de transporte público en Colombia DYNA, 84(203), pp. 263-272, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

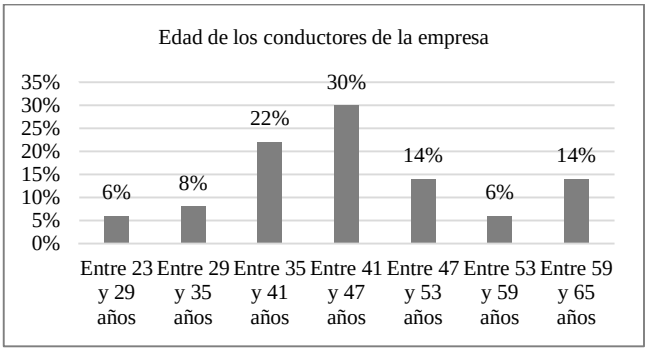


Figura 1. Edad de los conductores de la empresa.
Fuente: Elaborado por el autor.

que cuenta con 142 buses y 190 conductores para prestar el servicio de transporte terrestre automotor de personas con rutas de larga distancia para conectar a la capital del país y las principales ciudades de Boyacá, Santander y Cundinamarca con los departamentos de Arauca, Meta, Casanare, Bolívar y la Costa Atlántica.

Todos los conductores de la empresa son de género masculino y como se observa en la Fig. 1 el intervalo de edad más frecuente de los conductores es entre 41 y 47 años; correspondiente al 30% de los conductores.

De acuerdo con el reporte de accidentalidad de la empresa, entre los años 2013 y 2015 se presentaron 262 accidentes de bus que dejaron como resultado 9 personas muertas y 102 heridas; esto representó a nivel nacional el 3,9% y 2% respectivamente [6-8]. Es importante señalar que estos porcentajes estuvieron por encima del promedio nacional, teniendo en cuenta los 142 buses de la empresa y los 84369 buses que a nivel nacional se reportaron en el año 2015 [9], la empresa debió reportar el 0,16% del total de personas muertas y heridas en accidentes de bus en Colombia en este periodo.

La Fig. 2 presenta el comportamiento de la accidentalidad de la empresa durante el período 2013-2015, lo cual evidencia la necesidad de estudiar esta problemática.

En el sistema de seguridad vial intervienen tres elementos fundamentales: el vehículo, el hombre y el entorno [2]. Estudios realizados en Cuba y Colombia determinaron que la mayor parte de los accidentes mantienen relación directa con el factor humano [10,11]; por esta razón, la formulación de

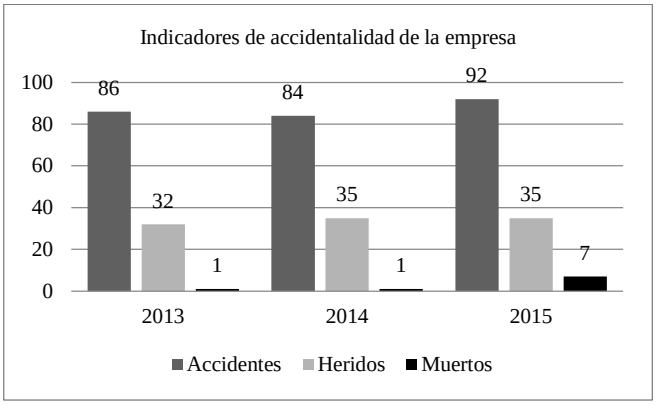


Figura 2. Indicadores de la accidentalidad de la empresa.
Fuente: Elaborado por el autor.

propuestas encaminadas a reducir los accidentes de tránsito debe hacer énfasis en este factor, determinando principalmente las conductas inseguras de los trabajadores en los ambientes laborales, útiles para diseñar estrategias de prevención de accidentes [12].

Diferentes estudios nacionales e internacionales han investigado las causas de los accidentes de tránsito asociadas al factor humano: en Europa se investigaron las maniobras realizadas por los conductores durante los accidentes [13], en Perú se estudió ampliamente la somnolencia como causa importante de los accidentes de tránsito [14-18]. En Colombia en particular se estudiaron estilos de conducción iracundo, ansioso, riesgoso y de alta velocidad; desobedecer señales de tránsito, agresividad, hostilidad y estrés son factores determinantes que contribuyen a la siniestralidad vial [10], al igual que la inatención y las distracciones durante la conducción [2]. En Bogotá, Colombia, se evidenció la incidencia de comportamientos como impulsividad, imprudencia, preocuparse demasiado por asuntos personales, nerviosismo, ver la publicidad de las calles y observar personas atractivas del sexo opuesto [11].

De acuerdo con la revisión temática, se encontró en primer lugar que los estudios realizados describen diferencias en las causas de los accidentes de tránsito asociadas al conductor, esto debido a las diferentes condiciones sociales, culturales, económicas y ambientales de cada lugar de estudio; por este motivo, es importante continuar realizando investigaciones que permitan conocer las conductas particulares de los conductores que pueden generar accidentes de tránsito en las diferentes regiones de Colombia y el mundo, para generar estrategias puntuales de prevención. En segundo lugar, se encontró que en estos estudios se utilizaron cuestionarios y encuestas como instrumento para la recolección de información primaria; en consecuencia, los resultados encontrados fueron apoyados en opiniones de los conductores, siendo posiblemente subjetivos; este tipo de estudios igual que estudios con enfoque experimental suelen ser cuestionados por la falta de validez ecológica de sus resultados y su artificialidad [2].

Frente a las deficiencias que pueden presentar estas investigaciones, en los últimos años se están realizando estudios naturalistas u observacionales realizados en el contexto real del trabajador; este tipo de estudios pueden captar el comportamiento 'natural' del conductor y muestran en detalle las actividades que realizan con su riesgo correspondiente [2]. La observación y registro de conductas inseguras en los ambientes laborales, es un procedimiento conocido con el nombre de "Seguridad basada en el Comportamiento", y es una estrategia fundamental que permite diseñar estrategias de intervención para la prevención y control de accidentes [12].

En esta investigación se planteó determinar las conductas inseguras en los conductores durante el desarrollo de su actividad laboral a través de métodos más objetivos, que permitan mayor aproximación a la realidad para la generación de futuras estrategias encaminadas a la disminución de conductas inseguras y posibles accidentes de tránsito, previniendo consecuencias mortales, lesiones graves y pérdidas económicas en los conductores, pasajeros y peatones.

2. Metodología

2.1. Tipo de estudio

Se realizó un estudio observacional de corte transversal, con enfoque descriptivo-analítico, en el que se describieron detalladamente las características que presenta el sujeto de estudio y posteriormente se realizó un análisis correlacional de estas características. El objetivo del estudio fue determinar las conductas inseguras en conductores de bus de una empresa de transporte público en Colombia y su relación con accidentes de tránsito, utilizando el método de observación no participativa para la recolección de la información, el cual resulta novedoso para este estudio, por la objetividad de sus resultados.

2.2. Muestra

Se calculó una muestra probabilística de 127 conductores, utilizando la Ecuación (1) para estudios descriptivos con población finita y variables discretas [19]; las variables de la Ecuación (1) se describen en la Tabla 1. Para las variables p y q se asigna una proporción esperada del 50% por no contar con estudios previos que tengan una población y variables similares.

$$n = \frac{NZ^2pq}{d^2(N-1)+Z^2pq} \quad (1)$$

2.3. Muestreo

El tipo de muestreo utilizado para la observación fue aleatorio estratificado; en el que se dividió la población en grupos en función de las rutas de la empresa, y luego se muestreó cada grupo aleatoriamente para obtener la parte proporcional de la muestra de acuerdo con la frecuencia de salida de las rutas.

Se utilizó este tipo de muestreo con el objetivo de observar las conductas de los conductores en diferentes ambientes; evitando posibles sesgos en la observación de las conductas. Debido a que las vías de las diferentes rutas tienen geometrías, flujos vehiculares y condiciones climáticas particulares; las conductas de los conductores podrían ser influenciadas por estos factores.

La empresa de este caso de estudio realiza diariamente en promedio 350 viajes en 42 rutas. Al distribuir las 127 observaciones de la muestra en las 42 rutas se encontró que 28 rutas tienen una frecuencia de salida muy baja; por lo que la parte proporcional que les corresponde de la muestra es inferior a 1, por este motivo se distribuyeron las 127 observaciones en las 14 rutas que tienen frecuencias de salida significativas para la muestra.

Tabla 1.
Variables de la Ecuación (1) para el cálculo de la muestra.

Variable	Nombre de la variable	Valor
n	Tamaño de la muestra	127
N	Tamaño población	190 conductores
Z	Nivel de confianza	95%=1,96 calculado en tablas
d	Error	5%=0,05
p	Proporción del fenómeno en estudio en la población	50%=0,5
q	Proporción de la población que no presenta el fenómeno de estudio	50%=0,5

Fuente: Adaptado de [20]

Tabla 2.
Distribución de la muestra por rutas.

Ruta		Frecuencia de la ruta por día	Frecuencia porcentual	Número de observaciones
Origen	Destino			
Bogotá	Sogamoso	90	28%	36
Sogamoso	Bogotá	80	25%	32
Duitama	Bogotá	95	30%	38
Yopal (por Villavicencio)	Bogotá	10	3%	4
Bogotá (por Villavicencio)	Yopal	7	2%	3
Sogamoso	Yopal	6	2%	2
Yopal	Sogamoso	6	2%	2
Bogotá (por Sogamoso)	Yopal	6	2%	2
Yopal (por Sogamoso)	Bogotá	6	2%	2
Duitama	Yopal	6	2%	2
Bogotá	Tame	3	1%	1
Tame	Bogotá	3	1%	1
Bogotá	Ráquira	2	1%	1
Ráquira	Bogotá	2	1%	1
Total		322	100%	127

Fuente: Elaborado por el autor.

En la Tabla 2 se describe el número de estratos e individuos del muestreo; se puede observar que el 83% de las observaciones se realizan en las rutas Sogamoso – Bogotá, Duitama – Bogotá y Bogotá – Sogamoso, por ser las rutas con mayor frecuencia de salida.

2.4. Técnicas para la recolección y análisis de la información

La recolección y análisis de la información se desarrolló en tres etapas:

2.4.1. Etapa 1.

La primera etapa estuvo interesada en describir las causas de los accidentes de tránsito de los conductores de la empresa entre los años 2013 y 2015.

Se realizó una revisión documental del reporte de accidentes de la empresa para describir las causas de los accidentes de tránsito; este reporte es diligenciado por la empresa utilizando el informe policial de accidentes de tránsito (IPAT), el cual es suministrado por las autoridades de tránsito, quienes son los encargados de identificar la hipótesis de causa de los accidentes. Se describieron las causas de los accidentes a partir del año 2013 porque desde este año la empresa lleva registro de los accidentes de tránsito.

Inicialmente se describieron las causas generales de los accidentes, que están divididas en seis grupos dependiendo de a quién se le atribuya la causa del accidente; como está determinado en el (IPAT), de la siguiente forma: ciclista o motociclista, conductor en general, vehículo, vía, peatón y pasajero o acompañante [20]; posteriormente se describieron

las causas y frecuencias de los accidentes de tránsito de la empresa relacionadas con los conductores, quienes son el objeto de estudio de esta investigación.

2.4.2. Etapa 2.

La segunda etapa estuvo orientada a determinar las conductas inseguras de los conductores en el desarrollo de su actividad.

La técnica para recolectar la información fue la observación no participativa; en esta el investigador no interactúa con los sujetos observados y utiliza un instrumento para registrar las conductas observadas. Para este estudio se utilizó la guía de observación. Las variables para la observación se definieron a partir de las hipótesis de causas del conductor que presenta el IPAT [20].

La guía de observación se organizó en un cuadro que se compone por dos partes principales; en la primera parte se registra información general sobre la observación como: número del bus, ruta, día, fechas, hora de inicio y hora de finalización. La segunda parte está compuesta por tres columnas; en la primera columna están en filas las 23 variables de la observación; en la segunda columna está el espacio para escribir el número de conductas inseguras que se observan durante el recorrido; finalmente en la tercera columna está un espacio para totalizar el número de conductas inseguras que se registraron para facilitar la tabulación de la información.

Se realizó una doble validación de la guía de observación, inicialmente fue revisada por un experto y luego se realizó una prueba piloto a 25 conductores de la empresa, en la que se observaron conductas inseguras adicionales a las definidas inicialmente del IPAT y se registraron recomendaciones para mejorar el proceso de observación y registro, por lo que la guía debió ser ajustada para la observación.

Cada observación se realizó durante dos horas; este tiempo se estimó teniendo en cuenta la duración del recorrido de las rutas y los resultados de la prueba piloto, en la que se determinó que este tiempo es apropiado para que el observador mantenga su atención a los sucesos sin presentar cansancio y distracción.

En general, la metodología para la observación fue la siguiente: Inicialmente el observador se ubicó en una silla del vehículo con alcance visual al conductor, los controles de manejo, el tablero de instrumentos en el que pudo observar el velocímetro y señales visuales y auditivas que indican la utilización de las luces direccionales, el parabrisas y la puerta de ingreso, luego observó la interacción del conductor con el entorno dentro del vehículo, conformado por los controles de manejo, dispositivos de seguridad y pasajeros, y el entorno externo al vehículo, el cual se da por la interacción con otros vehículos, la vía y peatones. Posteriormente se compararon las conductas observadas en el conductor con las señales de tránsito y demás normas determinadas por el Código Nacional de Tránsito Terrestre [21], para determinar si el conductor estaba realizando o no conductas inseguras, finalmente registró las conductas establecidas como inseguras en la guía de observación. La información se registró en un medio digital, que facilitó su transporte y almacenamiento.

2.4.3. Etapa 3. Análisis de la información.

Inicialmente se realizó una comparación entre los resultados de la observación y las causas de los accidentes para determinar que variables se presentan en los dos eventos. Posteriormente se determinó la correlación lineal entre las conductas inseguras observadas y las causas de los accidentes de la empresa, para las variables que se presentaron en los dos eventos.

El objetivo principal del análisis de correlación lineal es valorar la asociación entre dos variables; esto se logra midiendo la fuerza de una relación lineal entre dos variables; una variable independiente (x), que para este caso de estudio son las conductas inseguras de los conductores, y otra variable dependiente (y) que son las causas de los accidentes de la empresa.

La cuantificación de la fuerza de la relación lineal entre dos variables se estudia por medio del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente es la medida numérica de la fuerza de la relación lineal entre dos variables y refleja la consistencia del efecto que un cambio en una variable tiene sobre la otra [22].

El coeficiente de correlación lineal, r, siempre tiene un valor entre –1 y +1. Un valor de +1 significa una correlación positiva perfecta, un valor de –1 muestra una correlación negativa perfecta y un valor cercano a 0 cero indica que no hay relación lineal entre las dos variables. Sí al aumentar el valor de x se genera un aumento del valor de y, entonces se considera a r como un valor positivo [22].

Para terminar se determinó la significación de la correlación; para esto se le realizó el test de hipótesis r al coeficiente de correlación, este test se basa en la distribución de la t de student [23].

3. Resultados y discusión

3.1. Causas de los accidentes de tránsito de la empresa entre los años 2013 y 2015

En las Tablas 3 y 4 se presenta la descripción de las causas generales y las causas asociadas a los conductores de los accidentes de tránsito ocurridos entre los años 2013 y 2015 como resultado de la revisión documental realizada al reporte de accidentes de la empresa.

3.1.1. Causas generales de los accidentes de tránsito de la empresa entre los años 2013 y 2015

En la Tabla 3 se puede observar que la causa del 62,2 % de los accidentes ocurridos en la empresa durante los años 2013 y 2015 no fue determinada; esto se debe a que en la mayoría de los accidentes no es necesario que las autoridades de tránsito realicen el IPAT en el cual se establecen las hipótesis de causa de los accidentes, porque el accidente generó daños únicamente materiales y los conductores realizaron un acuerdo económico [21]. De igual forma se observa que el conductor tuvo el mayor porcentaje de las causas determinadas y que las demás causas suman solamente el 3,8% de total de la causas de los accidentes.

Tabla 3.
Causas de los accidentes.

Año	Ciclista o motociclista	Conductor	Vehículo	Vía	Peatón	Pasajero o acompañante	Sin determinar	Total
2013	0	36	0	1	2	1	46	86
2014	0	25	2	3	1	0	53	84
2015	0	28	0	0	0	0	64	92
Total	0	89	2	4	3	1	163	262
(%)	0	34	0,8	1,5	1,1	0,4	62,2	100

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 4.
Causas de los accidentes de tránsito asociadas a los conductores por año.

Causas de los accidentes	Año			Total	(%)
	2013	2014	2015		
Adelantar cerrando	4	4	4	12	13,48
Adelantar en curva o pendiente - Adelantar invadiendo carril contrario	1	0	0	1	1,12
Adelantar invadiendo carril del mismo sentido en zigzag	1	0	1	2	2,25
Adelantar invadiendo carril en sentido contrario	0	1	2	3	3,37
Arrancar sin precaución	0	1	0	1	1,12
Desobedecer señales o normas de tránsito	0	1	0	1	1,12
Exceso en horas de conducción - no mantener distancia de seguridad	1	0	0	1	1,12
Exceso de velocidad	1	2	1	4	4,49
Falta de prevención ante animales en la vía - otra	1	0	0	1	1,12
Falta de señales en vehículo varado - Reparar vehículo en vía publica	1	0	0	1	1,12
Frenar bruscamente	1	1	0	2	2,25
Girar bruscamente	1	0	0	1	1,12
No mantener distancia de seguridad	11	9	12	32	35,96
No respetar prelación	1	0	0	1	1,12
Otra	10	4	5	19	21,35
Reverso imprudente	1	0	2	3	3,37
Subirse al andén o vías peatonales	0	1	1	2	2,25
Transitar con las puertas abiertas	0	1	0	1	1,12
Vehículo mal estacionado - semáforo en rojo	1	0	0	1	1,12
Total	36	25	28	89	100

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 5.
Conductas inseguras observadas en los conductores de la empresa.

Conducta insegura	Total	Promedio	(%)
Utilizar teléfono celular	324	2,55	2,937
Escuchar radio o televisión con volumen alto	32	0,25	0,29
Observar al auxiliar	413	3,25	3,74
Observar a vendedor ambulante dentro del bus	114	0,89	1,033
Consumir alimentos y bebidas	197	1,55	1,78
Manipular y observar documentos o dinero	89	0,7	0,8
Manipular elementos fuera de alcance	235	1,85	2,13
Adelantar cerrando	19	0,15	0,17
Adelantar invadiendo carril del mismo sentido en zigzag	70	0,55	0,63
Frenar bruscamente	38	0,30	0,34
Girar bruscamente	32	0,25	0,29
Manejar con parabrisas empañado o sucio	44	0,35	0,40
Adelantar en curva o en pendientes	121	0,95	1,10
Adelantar invadiendo carril de sentido contrario	273	2,15	2,47
Exceso de velocidad	6007	47,3	54,46
No mantener distancia de seguridad	533	4,20	4,83
Salirse de la calzada	179	1,41	1,62
Dejar o recoger pasajeros en sitios no demarcados	19	0,15	0,17
Transitar con las puertas abiertas	57	0,45	0,52
No utilizar cinturón de seguridad	76	0,60	0,69
Llevar a vendedor ambulante al lado del conductor	51	0,40	0,46
No utilizar direccionales	1575	12,40	14,28
Transitar sobre la línea de separación de carril	533	4,20	4,83
Total	11031	86,86	100

Fuente: Elaborado por el autor.

3.1.2. Causas de los accidentes asociadas a los conductores de la empresa entre los años 2013 y 2015

En la Tabla 4 se observa que para los accidentes ocurridos entre los años 2013 y 2015, se pudo identificar que la principal causa fue “no mantener distancia de seguridad” con 36%, en segundo lugar “otra” con 21,38%, para la cual las autoridades de tránsito determinaron una causa diferente a las estipuladas en el IPAT [20], en tercer lugar “adelantar cerrando” con 13,5%, las demás causas tienen porcentajes menores que no supera el 4,49%.

Estos resultados no coinciden con un estudio que describe y explica los componentes de la accidentalidad vial en Colombia relacionados con el factor humano [10]; en este estudio se encuentra que la primer causa de accidentes de tránsito que produjeron muertos fue “cruzar sin observar”, mientras que “no mantener distancia de seguridad” estuvo en el octavo lugar con un porcentaje del 4,5%.

3.2. Conductas inseguras observadas en los conductores de la empresa

La Tabla 5 presenta los resultados producto de la observación realizada a los conductores de la empresa. Se puede observar que los conductores realizaron en promedio 86,86 conductas inseguras durante las dos horas que duró cada observación, de estas, más del 50% de las conductas inseguras fue “exceso de velocidad”. En otras investigaciones esta conducta también fue determinada como una de las principales causas de la accidentalidad vial [15,24].

Al comparar estos resultados con las causas de los accidentes de tránsito a nivel nacional se encuentra que el “exceso de velocidad” fue la segunda causa de accidentes de tránsito que produjeron muertos en Colombia con un 25,5%, seguido de “cruzar sin observar” [10].

3.3. Relación entre las causas de los accidentes asociadas al conductor y las conductas inseguras observadas en los conductores de la empresa

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 6 se puede establecer que 8 de las conductas inseguras observadas en los conductores coinciden con causas de los accidentes de la empresa, existiendo una coincidencia del 23,5% entre estas variables.

3.3.1. Correlación entre las causas de los accidentes asociadas al conductor y las conductas inseguras observadas en los conductores de la empresa

Se determinó el coeficiente de correlación de Pearson utilizando las Ecuaciones (2)-(5) [22], para las variables que coincidieron en la Tabla 5 como conductas inseguras y como causas de los accidentes. Las variables para el cálculo de las ecuaciones (2)-(5) se describen en las Tablas 7 y 8.

$$r = \frac{SS(xy)}{\sqrt{SS(x)SS(y)}} \quad (2)$$

$$SS(x) = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (3)$$

$$SS(y) = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (4)$$

$$SS(xy) = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n} \quad (5)$$

La correlación entre las conductas inseguras observadas y las causas de los accidentes de la empresa es de -0,049; se interpreta como una correlación negativa muy baja.

Adicionalmente se estableció la significación de la correlación entre las variables; para lo que se realizó el test de hipótesis r, en el que se establece que sí el valor del r calculado supera al valor del error estándar multiplicado por la t de Student con n-2 grados de libertad el coeficiente de correlación es significativo. El cálculo del error estándar del coeficiente de correlación se establece en la Ecuación (6) [23]. Las variables para la Ecuación (6) para calcular el error estándar del coeficiente de correlación y la significación de la correlación se describen en la Tabla 9.

Tabla 6.
Comparación entre las conductas inseguras y las causas de los accidentes.

Variable	Conductas inseguras. %	Causas de los accidentes. %
Exceso de velocidad	54,46	4,49
No mantener distancia de seguridad	4,83	35,96
Adelantar cerrando	0,17	13,48
Adelantar invadiendo carril en sentido contrario	2,47	3,37
Adelantar invadiendo carril del mismo sentido en zigzag	0,63	2,25
Frenar bruscamente	0,34	2,25
Transitar con las puertas abiertas	0,52	1,12
Girar bruscamente	0,29	1,12
Otra	--	21,35
Reverso imprudente	--	3,37
Subirse al andén o vías peatonales	--	2,25
Adelantar en curva o pendiente - adelantar invadiendo carril contrario	--	1,12
Arrancar sin precaución	--	1,12
Desobedecer señales o normas de tránsito	--	1,12
Exceso en horas de conducción - No mantener distancia de seguridad	--	1,12
Falta de prevención ante animales en la vía-otra	--	1,12
Falta de señales en vehículo varado - Reparar vehículo en vía pública	--	1,12
No respetar prelación	--	1,12
Vehículo mal estacionado-semáforo en rojo	--	1,12
No utilizar direccionales	14,28	--
Transitar sobre la línea de separación de carril	4,83	--
Observar al auxiliar	3,74	--
Utilizar teléfono celular	2,94	--
Manipular elementos fuera de alcance	2,13	--
Consumir alimentos y bebidas	1,79	--
Salirse de la calzada	1,62	--
Adelantar en curva o en pendientes	1,1	--
Observar a vendedor ambulante dentro del bus	1,03	--
Manipular y observar documentos o dinero	0,81	--
No utilizar cinturón de seguridad	0,69	--
Llevar a vendedor ambulante al lado del conductor	0,46	--
Manejar con parabrisas empañado o sucio	0,4	--
Escuchar radio o televisión con volumen alto	0,29	--
Dejar o recoger pasajeros en sitios no demarcados	0,17	--
Total	100	100

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 7.
Cálculo de variables de las Ecuaciones (3)-(5) para determinar el coeficiente de correlación lineal entre las variable (x) y (y).

Variable	Actos inseguros observados, x	x^2	Causas de los accidentes, y	y^2	xy
Exceso de velocidad	6007	36084049	4	16	24028
No mantener distancia de seguridad	533	284089	32	1024	17056
Adelantar cerrando	19	361	12	144	228
Adelantar invadiendo carril en sentido contrario	273	74529	3	9	819
Adelantar invadiendo carril del mismo sentido en zigzag	70	4900	2	4	140
Frenar bruscamente	38	1444	2	4	76
Transitar con las puertas abiertas	57	3249	1	1	57
Girar bruscamente	32	1024	1	1	32
	$\sum x = 7029$	$\sum x^2 = 36453645$	$\sum y = 57$	$\sum y^2 = 1203$	$\sum xy = 42436$

Fuente: Adaptado de [22].

Tabla 8.
Variables de la Ecuación (2) para el cálculo del coeficiente de correlación.

Variable	Nombre de la variable	Valor
r	Coeficiente de correlación lineal	-0,049
n	Número de pares ordenados para la correlación	8
SS(x)	Suma de cuadrados para (x)	30277790
SS(y)	Suma de los cuadrados para (y)	796,88
SS(xy)	Suma de los cuadrados para (xy)	-7645,63

Fuente: Adaptado de [22]

Tabla 9.
Variables de la Ecuación (6) para calcular el error estándar del coeficiente de correlación y la significación de la correlación.

Variable	Nombre de la variable	Valor
r	Coeficiente de correlación	-0,049
n	Número de pares ordenados	8
Error estándar de r	Error estándar del coeficiente de correlación	0,407
t	Valor de t de student en tabla con n-2 grados de libertad	2,45
t * error estándar	Error estándar multiplicado por valor de t de Student	1

Fuente: Adaptado de [23]

$$\text{Error estandar de r} = \sqrt{\frac{(1-r)^2}{n-2}} \quad (6)$$

Se observa en la Tabla 9 que el valor de r es menor que el error estándar multiplicado por valor de t de Student. Por lo que la correlación entre las conductas inseguras observadas y las causas de los accidentes de la empresa no es significativa.

3.3.2. Test de la prueba Q para valores atípicos

En los datos de la Tabla 7 se observa que el valor de "exceso de velocidad" en las conductas inseguras observadas es 6007; por la distancia que este valor tiene con los demás valores, se puede considerar como un valor extremo. Este tipo de valores altera de forma importante el coeficiente de correlación; por esta razón se puede realizar el test de la prueba Q que permite determinar si el valor es atípico para rechazarlo.

Para realizar el test de la prueba Q se ordenan los datos de la variable donde se encuentra el valor extremo de forma ascendente; nombrando el valor extremo como x8 y el menor valor como x1; se calcula la diferencia d = x8-x7; la dispersión completa de la serie w = x8-x1; el Qcrit = d/w y se selecciona el valor Qexp en tablas para un intervalo de confianza dado. El Criterio para rechazar el dato atípico es que Qexp sea mayor a Qcrit [25]. En la Tabla 10 se definen las variables para realizar el test de la prueba Q para los valores de las conductas inseguras observadas.

Tabla 10.
Definición de las variables para el test de la prueba Q para los datos de la variable conductas inseguras observadas.

Variable	Definición de la variable	Valor
d	x8-x7	5474
w	x8-x1	5988
Qexp	d/w	0,914
Qcrit	En tabla con intervalo de confianza de 0,95	0,468

Fuente: Adaptado de [25]

Tabla 11.
Cálculo de las variables de las Ecuaciones (3)-(5) para determinar el coeficiente de correlación entre las variables (x) y (y) excluyendo el valor atípico.

Variable	Actos inseguros observados, x	x^2	Causas de los accidentes, y	y^2	xy
No mantener distancia de seguridad	533	284089	32	1024	17056
Adelantar cerrando	19	361	12	144	228
Adelantar invadiendo carril en sentido contrario	273	74529	3	9	819
Adelantar invadiendo carril del mismo sentido en zigzag	70	4900	2	4	140
Frenar bruscamente	38	1444	2	4	76
Transitar con las puertas abiertas	57	3249	1	1	57
Girar bruscamente	32	1024	1	1	32
	$\sum x = 1022$	$\sum x^2 = 369596$	$\sum y = 53$	$\sum y^2 = 1187$	$\sum xy = 18408$

Fuente: Adaptado de [22]

De acuerdo con los resultados del test de la prueba Q se puede considerar el valor del "exceso de velocidad" como un valor atípico.

3.3.3. Coeficiente de correlación lineal entre las conductas inseguras observadas en los conductores de la empresa y las causas de los accidentes asociadas al conductor; excluyendo el valor atípico.

Para el nuevo cálculo del coeficiente de correlación lineal se utilizaron las Ecuaciones (2)-(5) y se definieron las variables para las ecuaciones en las Tablas 11 y 12. Se determinó la significación de la correlación utilizando la Ecuación 6 y las variables descritas en la Tabla 13.

Al determinar el coeficiente de correlación excluyendo los valores atípicos se encuentra una correlación positiva de 0,81, que de acuerdo con el test de hipótesis r es significativa.

Tabla 12.
Variables de la Ecuación (2) para el cálculo del coeficiente de correlación lineal; excluyendo el valor atípico.

Variable	Nombre de la variable	Valor
r	Coeficiente de correlación lineal	0,811
n	Número de pares ordenados para la correlación	7
SS(x)	Suma de cuadrados para (x)	220384
SS(y)	Suma de los cuadrados para (y)	785,71
SS(xy)	Suma de los cuadrados para (xy)	10670

Fuente: Adaptado de [22].

Sin embargo debido a la importancia que tiene la variable que presenta el valor atípico para la investigación se realiza una trasformación logarítmica de los datos iniciales; cambiando la escala de medición y moderando el efecto de este valor extremo [22].

Tabla 13.
Variables de la Ecuación (6) para calcular el error estándar del coeficiente de correlación y la significación de la correlación.

Variable	Nombre de la variable	Valor
r	Coeficiente de correlación	0,81
n	Número de pares ordenados	7
Error estándar de r	Error estándar del coeficiente de correlación	0,26
t	Valor de t de student en tabla con n-2 grados de libertad	2,57
t * error estándar de r	Error estándar multiplicado por valor de t de Student	0,67

Fuente: Adaptado de [23]

3.3.4. Transformación logarítmica de datos

Tabla 14.
Transformación logarítmica de las variables (x) y (y).

Variable	Variable x	Variable y	log (x)	log (y)
Exceso de velocidad	6007	4	8,70	2,16
No mantener distancia de seguridad	533	32	6,28	1,84
Adelantar cerrando	19	12	2,94	1,08
Adelantar invadiendo carril en sentido contrario	273	3	5,61	1,72
Adelantar invadiendo carril del mismo sentido en zigzag	70	2	4,25	1,45
Frenar bruscamente	38	2	3,64	1,29
Transitar con las puertas abiertas	57	1	4,04	1,40
Girar bruscamente	32	1	3,47	1,24

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 15.
Cálculo de las variables de las Ecuaciones (3)-(5) para determinar el coeficiente de correlación lineal entre las variables (x) y (y) transformadas.

Variable	Actos inseguros observados, x	x^2	Causas de los accidentes, y	y^2	xy
Exceso de velocidad	8,70	75,70	1,39	1,92	12,06
No mantener distancia de seguridad	6,28	39,42	3,47	12,01	21,76
Adelantar cerrando	2,94	8,67	2,48	6,17	7,32
Adelantar invadiendo carril en sentido contrario	5,61	31,47	1,10	1,21	6,16
Adelantar invadiendo carril del mismo sentido en zigzag	4,25	18,05	0,69	0,48	2,94
Frenar bruscamente	3,64	13,23	0,69	0,48	2,52
Transitar con las puertas abiertas	4,04	16,35	0	0	0
Girar bruscamente	3,47	12,01	0	0	0
	$\sum x = 38,93$	$\sum x^2 = 214,90$	$\sum y = 9,82$	$\sum y^2 = 22,28$	$\sum xy = 52,77$

Fuente: Adaptado de [22]

3.3.5. Correlación lineal entre las conductas inseguras y las causas de los accidentes con las variables transformadas.

Se calculó nuevamente el coeficiente de correlación lineal utilizando las Ecuaciones (2)-(5) y se definieron las variables para las ecuaciones en las Tablas 15 y 16. Se determina la significación de la correlación utilizando la Ecuación 6 y las variables descritas en la Tabla 17.

Tabla 16.
Variables de la Ecuación (2) para el cálculo del coeficiente de correlación lineal; con las variables transformadas.

Variable	Nombre de la variable	Valor
r	Coeficiente de correlación lineal	0,31
n	Número de pares ordenados para la correlación	8
SS(x)	Suma de cuadrados para (x)	25,45
SS(y)	Suma de los cuadrados para (y)	10,23
SS(xy)	Suma de los cuadrados para (xy)	4,99

Fuente: Adaptado de [22]

Tabla 17.
Variables de la Ecuación (6) para calcular el error estándar del coeficiente de correlación y la significación de la correlación.

Variable	Nombre de la variable	Valor
r	Coeficiente de correlación	0,31
n	Número de pares ordenados	8
Error estándar de r	Error estándar del coeficiente de correlación	0,39
t	Valor de t de student en tabla con n-2 grados de libertad	2,45
t * error estándar de r	Error estándar multiplicado por valor de t de Student	0,95

Fuente: Adaptado de [23]

Se encuentra que los datos transformados presentan una correlación baja positiva, de 0,31 que de acuerdo con el test de hipótesis r no es significativa.

4. Conclusiones y recomendaciones

El método de observación no participativa permitió identificar conductas inseguras de los conductores que no están contempladas como posibles causas de los accidentes de tránsito en el IPAT; el 46,6 % de estas conductas se pueden catalogar como distracciones e inatenciones de los conductores. Incluir estas conductas en el IPAT como posibles causas de los accidentes permitirá conocer mejor los factores que intervienen en los accidentes de tránsito y generar estrategias que mejoren la seguridad vial.

Para generar estrategias de seguridad basadas en el comportamiento para la prevención de accidentes de tránsito con efectos sostenidos en el tiempo es importante tener en cuenta que realizar diferentes conductas inseguras de forma simultánea aumenta la probabilidad de ocurrencia de los accidentes, por lo que se deben tener presentes todas las conductas inseguras, no solamente las más recurrentes. Adicionalmente se requiere que en futuros estudios se investiguen los aspectos motivacionales y la percepción del riesgo de los conductores respecto a las conductas inseguras.

Las conductas inseguras identificadas en los conductores de la empresa podrán modificarse mediante el aprendizaje de conductas seguras, lo que demuestra la validez y ventajas del procedimiento seguridad basada en el comportamiento como estrategia para la prevención de accidentes.

Aunque se determinó que la correlación entre las conductas inseguras y las causas de los accidentes es baja, es evidente que existe una correlación positiva, que permite explicar una parte de la variabilidad de las causas de los accidentes por las conductas inseguras que realizan los conductores. La introducción de más variables con técnicas de análisis multivariado permitirá en futuros estudios identificar la importancia que otras variables pueden tener sobre las conductas inseguras.

El muestreo estratificado es una herramienta que en este caso de estudio permitió planificar y organizar muy bien la observación en diferentes ambientes, evitando sesgos en la observación de las conductas. En este sentido es recomendable que en futuros estudios se establezca como se relacionan las condiciones particulares de una vía; como su geometría, flujo vehicular y clima con las conductas inseguras de los conductores.

Se puede establecer una relación entre la principal causa de los accidentes de bus que fue “no mantener distancia de seguridad” y la principal conducta insegura observada que fue el “exceso de velocidad”; esto de acuerdo con el Código Nacional de Tránsito Terrestre que determina que entre mayor sea la velocidad de los vehículos, mayor debe ser la distancia de seguridad. Es posible que accidentes en los que se definió “no mantener distancia de seguridad” como su causa, el “exceso de velocidad” haya sido un factor determinante, por esto, es necesario incluir en el IPAT como herramienta de investigación un procedimiento que permita calcular la velocidad de los vehículos en el momento de los accidentes de tránsito, así como lo hay para calcular la distancia entre vehículos.

El alto porcentaje de la conducta insegura “exceso de velocidad” observada en los conductores de la empresa puede estar relacionado con la geometría de las vías, por lo que sería recomendable investigarlo a profundidad en otro estudio esta posible relación, dado que el 75,7% de viajes que realiza la empresa son en la vía que comunica las ciudades de Sogamoso y Bogotá, y como se pudo evidenciar en la observación el 90,5% de esta vía es de doble calzada y la mayoría de sus tramos son planos y rectos; estas condiciones favorecen el aumento de la velocidad del tránsito vehicular. Se recomienda que las autoridades competentes realicen mayor vigilancia en el cumplimiento de la velocidad establecida en las señales de tránsito, ya que el exceso de velocidad aumenta la gravedad del accidente y la probabilidad de que ocurra.

Se recomienda al Gobierno Nacional modificar el Código Nacional de Tránsito Terrestre para que las autoridades de tránsito investiguen la causa de todos los accidentes de tránsito, sin hacer a un lado los accidentes que generaron daños únicamente materiales, y en los cuales los conductores llegaron a un acuerdo económico. Conocer la causa de la totalidad de los accidentes permitirá entender mejor los factores que intervienen en la seguridad vial e implementar estrategias adecuadas para la prevención de accidentes de tránsito.

Referencias

[1] Caso, A., Rey de Castro, J. y Rosales-Mayor, E., Hábitos del sueño y accidentes de tránsito en conductores de ómnibus interprovincial de Arequipa, Perú, Rev Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, [en línea]. 31(4), 2014. [Fecha de consulta: 10 de agosto de 2016]. Disponible en: http://biblio.uptc.edu.co:2084/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=b80f0c79-2b5a-42f0-baf5-488a78f6cba0%40sessionmgr101

[2] Montes, S., Ledesma, R. y Poó, F., Estudio y prevención de la distracción e inatención en la conducción, Avances en Psicología Latinoamericana, 32(1), pp. 115-129, 2014. DOI: 10.12804/apl32.1.2014.08

[3] Organización Mundial de la Salud., Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2013, Suiza, Departamento de Prevención de la Violencia y los Traumatismos y Discapacidad (VIP), 2013.

[4] Organización Mundial de la Salud., Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2015, Suiza, Departamento de Prevención de la Violencia y los Traumatismos y Discapacidad (VIP), 2015.

[5] Gutiérrez, Y., Velásquez, S. Seguridad vial en Colombia especial seguimiento a los resultados de la política pública, Colombia, Contraloría General de la Republica, 2012, 7 P.

[6] Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. Forensis 2013 datos para la vida. [en línea]. Bogotá, D.C. República de Colombia 2014 [consulta: 15 de septiembre de 2016], Cap. 5, Comportamiento de muertes y lesiones por accidente de transporte, Colombia, 2013. Disponible en: http://www.medicinalegal.gov.co/forensis

[7] Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. Forensis 2014 datos para la vida. [en línea]. Bogotá, D.C. República de Colombia 2015 [consulta: 15 de septiembre de 2016], cap. 10, Comportamiento de muertes y lesiones por accidentes de transporte. Colombia, 2014. Disponible en: http://www.medicinalegal.gov.co/forensis

[8] Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses. Forensis 2015 datos para la vida. [en línea]. Bogotá, D.C. República de Colombia 2016 [consulta: 15 de septiembre de 2016], cap. 10, Comportamiento de muertes y lesiones por accidentes de transporte. Colombia, 2015. Disponible en: http://www.medicinalegal.gov.co/forensis

[9] Ministerio de Transporte. Transporte en cifras Estadísticas 2015. Colombia, Oficina asesora de planeación, 2016.

[10] Norza, E., Granados, E., Useche, S., Romero, M. y Moreno, J., Componentes descriptivos y explicativos de la accidentalidad vial en Colombia: Incidencia del factor humano. Revista Criminalidad [En línea]. 56(1), 2014. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.pensamientopenal.com.ar/system/files/2014/08/doctrina39566.pdf#page=157

[11] Gutiérrez, M., Factores culturales que inciden sobre la ocurrencia de accidentes de trabajo en operadores de buses del sistema Transmilenio. Revista Iberoamericana de Psicología: Ciencia y Tecnología [En línea]. 2(1), 2009. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2016]. Disponible en: http://revistas.iberoamericana.edu.co/index.php/ripsicologia/article/view/173

[12] Castilla, O., Observación de conductas inseguras en el trabajo: un análisis metodológico. Universitas Psychologica [En línea]. 11(1), 2012. [Fecha de consulta: 17 de agosto de 2016]. Disponible en: http://biblio.uptc.edu.co:2092/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=25012363-d008-47d4-90d3-0b9ef1bc9574@sessionmgr4010

[13] Evgenikos, P., Yannis, G., Folla, K., Bauer, R., Machata, K. and Brandstaetter, C., Characteristics and causes of heavy goods vehicles and buses accidents in Europe. Transportation Research Procedia, 14, pp. 2158-2167, 2016. DOI: 10.1016/J.TRPRO.2016.05.231

[14] Rey de Castro, J. y Rosales-Mayor, M., Monitoreo del sueño en conductores de ómnibus y camiones: Factor relevante a considerar para la renovación de la licencia de conducir. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica [En línea]. 27(2), 2010. [Fecha de consulta: 17 de agosto de 2016]. Disponible en: http://biblio.uptc.edu.co:2091/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=2c8d4471-4144-44ca-819b-16e610071bed%40sessionmgr4010

[15] Rey de Castro, J., Conductores somnolientos en las carreteras del Perú: hallazgos y propuestas. Revista Médica Herediana [En línea]. 22(4), 2011. [Fecha de consulta: 12 de agosto de 2016]. Disponible

en: http://biblio.uptc.edu.co:2091/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=6&sid=2c8d4471-4144-44ca-819b-16e610071bed%40sessionmgr4010

[16] Liendo, G., Castro, C. y Rey de Castro, J., Cansancio y somnolencia en conductores de ómnibus interprovinciales: Estudio comparativo entre formalidad e informalidad. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública Herediana [En línea]. 27(2), 2010. [Fecha de consulta: 10 de agosto de 2016]. Disponible en: http://eds.a.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=7&sid=25012363-d008-47d4-90d3-0b9ef1bc9574%40sessionmgr4010

[17] Rey de Castro, J., Gallo, J. y Loureiro, H., Cansancio y somnolencia en conductores de ómnibus y accidentes de carretera en el Perú: Estudio cuantitativo. Rev Panam Salud Publica [En línea]. 16(1), 2004. [Fecha de consulta: 18 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.scielosp.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1020-49892004000700002

[18] Rosales, E., Egoavil, M., Duran, I., Montes, N., Flores, R., Rivera S., Alonso, C., Merino, L. y Rey de Castro, J. Accidentes de carretera y su relación con cansancio y somnolencia en conductores de ómnibus. Rev Med Hered, [En línea]. 20(2), 2009. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2016]. Disponible en: http://biblio.uptc.edu.co:2137/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=25148ab2-2b3f-4c07-b73c-1f1e107086e5@sessionmgr4006

[19] Aguilar-Barojas, S., Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. Salud en Tabasco [En línea]. 11(1-2), 2005. [Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2016]. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206

[20] Ministerio de Transporte. Manual de diligenciamiento del informe policial de accidentes de tránsito. Resolución 0011268. Bogotá, Colombia, 2012, 98 P.

[21] Ley No. 769. Código Nacional de Tránsito Terrestre. Ministerio de Transporte, Bogotá, Colombia, 6 de agosto de 2002.

[22] Jhonson, R. y Kuby, P., Análisis descriptivo y presentación de datos bivariados, Estadística Elemental, Lo Esencial, 10ª ed., México, Cengage Learning, 2004. pp. 145-173.

[23] Pita, S. y Pértega, S., Relación entre variables cuantitativas, Cad Aten Primaria [Online]. 4, 1997. [Fecha de consulta: 13 de agosto de 2017]. Disponible en: http://www.fisterra.com/gestor/upload/guias/var_cuantitativas2.pdf

[24] Organización Mundial de la Salud. Informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito, Ginebra, Departamento de Prevención de la Violencia y los Traumatismos y Discapacidad (VIP), 2004.

[25] Gallego, R.S., Análisis de datos multivariantes, Introducción al análisis de datos experimentales: Tratamiento de datos en bioensayos, Castillo de la plana, Tesis de grado, Universitat Jaume I, 2 Castellón, España, 003. pp. 103-136.

F.A. Torres-Sandoval, es Diseñador Industrial graduado en 2014 de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Duitama, Colombia; candidato a MSc. en Seguridad y Salud en el Trabajo de la UPTC. Docente de la Escuela de Diseño Industrial de la UPTC, Facultad Seccional Duitama. Sus áreas de interés son principalmente la seguridad y la higiene industrial.
ORCID: 0000-0002-3766-1027

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Administrativa e Ingeniería Industrial

Oferta de Posgrados

Especialización en Gestión Empresarial
Especialización en Ingeniería Financiera
Maestría en Ingeniería Administrativa
Maestría en Ingeniería Industrial
Doctorado en Ingeniería - Industria y Organizaciones

Mayor información:

E-mail: acia_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 02

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Parametric analysis of the geothermal power: Dry-Steam, flash steam and hybrid cycle

Martín Salazar-Pereyra [a], Agustín Mora-Ortega [a], Angélica E. Bonilla-Blancas [b], Raúl Lugo-Leyte [c] & Helen D. Lugo-Méndez [d]

[a] *División de Ingeniería Mecatrónica e Industrial, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México, México. msalazar@tese.edu.mx, amora@tese.edu.mx*
[b] *Centro de Tecnología Avanzada, CIATEQ, Estado de México, México. angelica.bonilla@ciateq.mx*
[c] *Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, CDMX, México. lulr@xanum.uam.mx*
[d] *Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa, CDMX, México. hlugo@correo.cua.uam.mx*

Received: July 5th, de 2017. Received in revised form: October 17th, 2017. Accepted: October 25th, 2017

Abstract
The thermodynamic analysis of the geothermal power plants with dry vapor, flash steam and hybrid cycles in function to the geothermal resource conditions and the pressure of the first flash chamber was made, considering the steam quality of the last stage of expansion as operating limit constraint; obtaining the specific work curves of the steam turbines and the temperature profiles of the binary cycle. For saturated steam configurations, the arrangement with three flash cameras presents the highest thermal and exergy efficiency, and steam turbines specific work, for example at a temperature of 200 ° C, the maximum work generated is 80.11 kJ / kg with a pressure of the first flash chamber of 6.0 bar, thermal and exergetic efficiency of 10.7% and 44.0% respectively, this is mainly due to the increase of steam enthalpy and exergy.

Keywords: Steam turbines; flash geothermal; thermodynamic analysis.

Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos

Resumen
En este trabajo se presenta el análisis termodinámico de las centrales geotérmicas con configuraciones de vapor seco, cámaras flash y ciclos híbridos en función de las condiciones del recurso geotérmico y la presión de la primera cámara flash, considerando la calidad del vapor de la última etapa de expansión como restricción límite de operación; se obtienen las curvas de trabajo de las turbinas de vapor y los perfiles de temperatura del ciclo binario. Para las configuraciones con vapor húmedo, el arreglo con tres cámaras flash presenta la mayor eficiencia térmica, exergética y de trabajo de las turbinas de vapor, por ejemplo para una temperatura de 200°C, el máximo trabajo generado es de 80.11 kJ/kg con una presión de la primera cámara flash de 6.0 bar, la eficiencia térmica y exergética de 10.7% y 44.0% respectivamente, esto se debe principalmente al aprovechamiento del aumento de la entalpía y exergía del vapor.

Palabras clave: Geotermoeléctrica; turbinas de vapor; análisis termodinámico.

1. Introducción

La generación de energía obtenida de fuentes de energía renovables es una alternativa a nivel mundial, tales como: la geotérmica, solar, eólica, entre otras. La energía aprovechada de los yacimientos geotérmicos es una fuente confiable para obtener vapor de proceso y energía térmica para calefacción o para generar energía motriz en una turbina de vapor [1-5]. Las centrales geotermoeléctricas son plantas térmicas que garantizan una producción constante de potencia eléctrica, debido al recurso comprobado de energía térmica en las cavidades de la tierra donde se instala la central, que

How to cite: Salazar-Pereyra, M., Mora-Ortega, A., Bonilla-Blancas, A.E., Lugo-Leyte, R. and Lugo-Méndez, H.D., Análisis Paramétrico de las Centrales Geotermoeléctricas: Vapor seco, Cámara Flash y Ciclos Híbridos DYNA, 84(203), pp. 273-282, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

asegurará una vida útil de producción de 20 años. Las plantas geotermoeléctricas en la República Mexicana generan el 2.2% de la producción bruta nacional de acuerdo al Programa de Obras de Inversión del Sector Eléctrico, POISE 2014-2028 [7]. Las plantas geotérmicas de mayor capacidad se encuentran ubicadas en zonas donde se tienen géiseres o yacimientos de vapor, tales como los Azufres I, II, III y IV en el estado de Michoacán; Humeros III en Puebla, Santa Rosalía y Cerro Prieto en Baja California Sur. En México, se cuenta con la segunda central de generación de energía geotérmica a nivel mundial que es Cerro Prieto I, II, III y IV con una capacidad instalada de 720 MW. Sin embargo, el aprovechamiento de este recurso natural se puede mejorar de acuerdo a las condiciones de operación de la central y de la configuración de los ciclos de vapor para incrementar la potencia generada y la eficiencia térmica. Por ejemplo, se utiliza un doble arreglo de cámara flash y separador para obtener más vapor para proceso a menor presión, generando una mayor potencia [6]. Chamorro et al. [1] muestran la relevancia de incrementar el número de cámaras flash sobre el mejoramiento de la eficiencia exergética; sin embargo, no establecen las presiones óptimas para cada temperatura del fluido geotérmico para obtener el máximo trabajo en las turbinas de vapor, ya que se puede ocasionar una pérdida de trabajo mayor al 10% si no se establece la presión de operación en la vecindad de la presión óptima.

En la actualidad, más de ochenta países utilizan la energía geotérmica de manera directa, entre los países con mayor capacidad instalada para usos directos de la geotermia se encuentran China con 17,870 MWt, Estados Unidos con 17,416 MWt y Suecia con 5,600 MWt. Sin embargo, sólo 46 países utilizan recursos geotérmicos para generar energía eléctrica. México ocupa el cuarto lugar en capacidad geotermoeléctrica con una producción de 1,081 MWt a través de 37 unidades geotérmicas de vapor seco, cámaras flash y sistemas híbridos [2]. La proyección al 2024 a nivel mundial es incrementar la capacidad instalada de generación hasta 80 000 MW eléctricos.

Las temperaturas de los fluidos geotérmicos se encuentran entre 100°C y 350°C. Para temperaturas menores a 150°C se utilizan ciclos híbridos para aprovechar esta energía de bajo potencial [10-13]. Cuando la temperatura es mayor a 150°C y dependiendo del tipo de fase del fluido que contenga el yacimiento, se genera energía en centrales con las especificaciones siguientes:

a) Vapor húmedo: se requiere implementar una cámara flash para separar el vapor de proceso que se expande en la turbina. Una desventaja de estos sistemas, es que sólo una fracción del fluido extraído del reservorio se puede utilizar. Sin embargo, se puede instalar una segunda cámara flash e incrementar la potencia generada. Del total de las plantas geotermoeléctricas a nivel mundial, el 40% son con cámara flash, contribuyendo con el 60% de la capacidad instalada.
b) Vapor húmedo con temperaturas menores a 150°C: Para estas condiciones se instalan ciclos binarios, es decir, después de la separación en la cámara flash se reutiliza el agua líquida para calentar o sobrecalentar el fluido secundario, para generar potencia adicional en un ciclo Rankine orgánico o Kalina. En la actualidad, se tienen 266 unidades de este tipo de un total de 536 unidades geotérmicas; sin embargo, sólo contribuyen en un 10% a la capacidad de generación instalada.
c) Vapor saturado seco: éste se suministra directamente a la turbina. El vapor se pasa previamente por un secador, en donde se elimina el porcentaje de agua líquida presente. La capacidad de generación de este tipo de centrales es mayor, debido a que trabajan con flujos completos y no con fracciones como son las centrales flash. El 11% de las centrales geotérmicas son de este tipo y corresponde al 26% de la capacidad instalada con respecto a la energía obtenida del recurso geotérmico.

Las centrales flash geotérmicas, utilizan una o dos cámaras flash dependiendo de la temperatura del vapor a la salida del reservorio geotérmico. El 88% de las unidades geotérmicas operan con sistemas que utilizan cámaras flash, debido a que los yacimientos con vapor húmedo son los más abundantes en la naturaleza. Adicionalmente, la mayoría operan con fluidos geotérmicos con temperaturas a la salida del reservorio menores a 200°C, que es una limitante natural en la operación, para no obtener la mayor potencia de generación. En la República Mexicana se tienen las tres configuraciones de centrales geotermoeléctricas: vapor seco, cámaras flash y sistemas híbridos, además se tiene proyectado al 2028 un incremento del 10% de la capacidad instalada actualmente. Por tal motivo, en este trabajo se realiza un análisis paramétrico desde el punto de vista termodinámico de las centrales geotérmicas, en un intervalo de temperaturas del vapor húmedo de 160°C a 200°C, para encontrar la presión óptima de operación de la primera cámara flash para generar la potencia máxima en la turbina de vapor. Así mismo establecer el comportamiento de las curvas de generación de potencia en función de la presión de la primera cámara flash y la factibilidad de colocar una segunda, tercera cámara o un ciclo híbrido, con la finalidad de establecer un análisis de las centrales que muestre las ventajas de diseñar una central geotermoeléctrica en función del recurso geotérmico y la demanda de potencia requerida.

2. Metodología

En la Fig. 1 se muestran las configuraciones de las centrales flash geotérmicas y de vapor saturado seco. El arreglo que utiliza el vapor saturado seco se muestra en la Fig. 1(a) donde el 98% del vapor entra directamente a la turbina y aproximadamente el 2% de agua líquida se elimina en el secador. Los ciclos de vapor flash geotérmicos se muestran en las Figs. 1 (b), (c) y (d). El fluido de trabajo inicial es separado después de pasar por la cámara flash, de tal manera que, la fracción de vapor es suministrada a la turbina para generar trabajo mecánico. Al final de la expansión, el vapor residual se condensa y se reinyecta al pozo, Fig. 1 (b). La Fig. 1 (c) muestra la configuración con dos cámaras flash, con la finalidad de recuperar una segunda fracción de vapor después de la primera cámara flash, esta segunda fracción de vapor se suministra a la turbina de baja presión para generar mayor trabajo. También se puede colocar un intercambiador de calor para un segundo ciclo de potencia orgánico en lugar de una segunda cámara flash.

La configuración de una central geotermoeléctrica con

tres cámaras flash se muestra en la Fig. 1(d), con el mismo objetivo que el esquema anterior, es decir, se incluye un tercer arreglo de cámara flash y separador, aprovechando una fracción más de vapor en la tercera expansión en la turbina de vapor para generar más trabajo mecánico.

Conforme se anexan las cámaras flash se recupera una cantidad mayor de vapor para generar trabajo en la turbina, sin embargo, no se compara con la potencia que se puede generar cuando se tiene disponible un reservorio de vapor saturado seco, a pesar de que estos trabajen con flujos principales de 30 ó 40 kg_{vapor}/s. La ventaja de los arreglos de cámaras flash se debe, a que pueden tener disponibles reservorios de flujos principales de hasta 100 kg_{vapor}/s.

En la Fig. 2 se muestran los diagramas temperatura-entropía de las centrales flash geotérmicas y de vapor saturado seco. Para las tres configuraciones con cámaras flash se muestra que las expansiones de la turbina de vapor se encuentran por fuera de la línea de Wilson, es decir para este tipo de ciclos geotérmicos las expansiones siempre serán húmedas, debido a que se encuentran en la región de vapor saturado pero con la calidad del vapor mayor o igual a 0.88; por consiguiente se tiene una operación segura, debido a que las propiedades termofísicas del vapor en esta zona presentan un comportamiento semejante al vapor sobrecalentado [8].

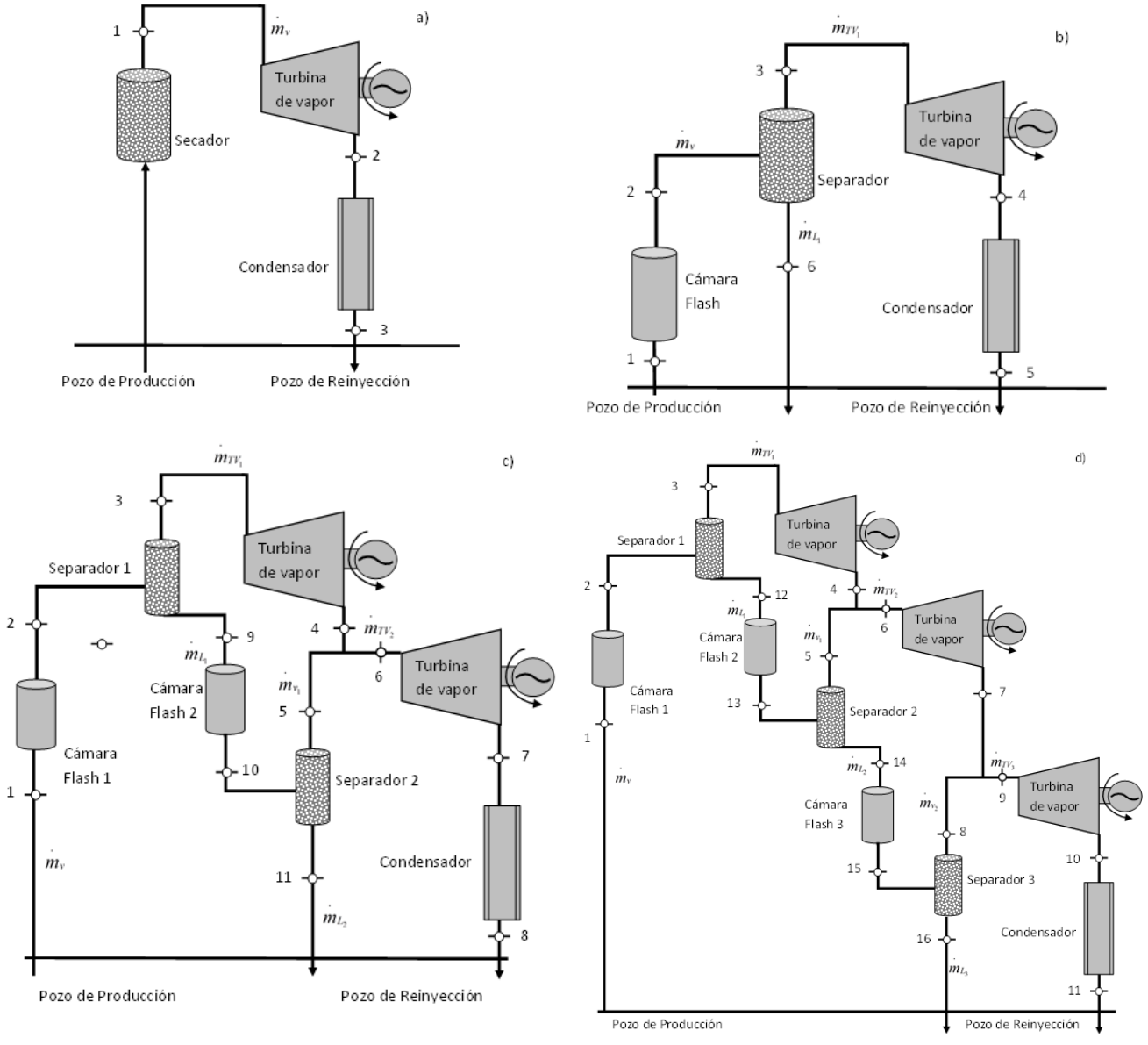


Figura 1. Centrales geotérmicas con: a) sin cámara flash, b) una cámara flash, c) dos cámaras flash y d) tres cámaras flash.
Fuente: Elaboración de los autores

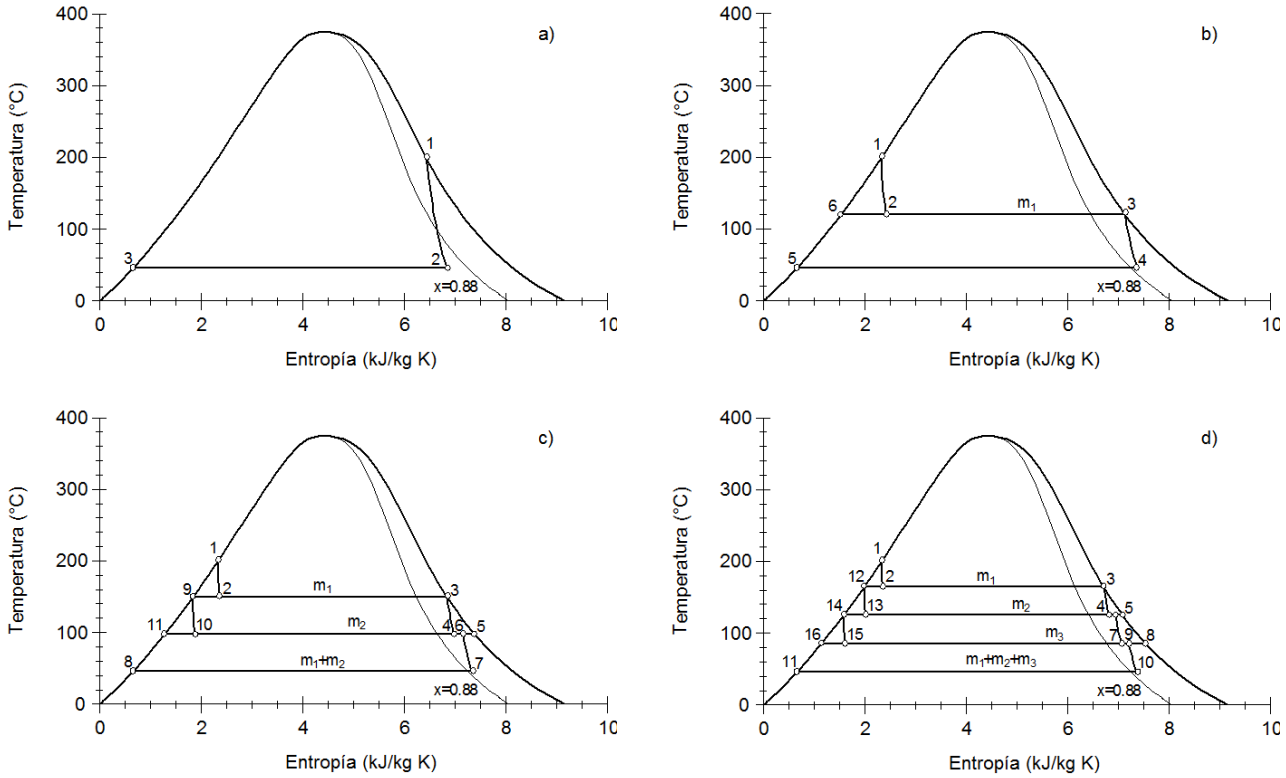


Figura 2. Diagrama T-s de las centrales geotérmicas con: a) sin cámara flash, b) una cámara flash, c) dos cámaras flash y d) tres cámaras flash.
Fuente: Elaboración de los autores

En la Fig. 2 (a) se muestra el diagrama T-s de una central geotérmica que opera con vapor saturado seco y una T_1=200°C, pero al final de la expansión (estado 2), la calidad del vapor es menor a 0.88; sin embargo, para una T_1 de 150°C, la calidad del vapor al final de la expansión es mayor a 0.88. A esta temperatura opera la central geotérmica Humeros III en el estado de Puebla, México. En las Figs. 2 (b), (c) y (d) se muestran que las condiciones de operación de la primera cámara flash se modifican al incrementar el número de cámaras flash, debido a que el trabajo generado en la turbina dependerá de dos factores asociados a la presión, P_2, y éstas son las fracciones de vapor que se pueden utilizar y el tirante térmico.

El recurso geotérmico considerado para todos los casos, es un flujo de 100 kg_{vapor}/s, con una temperatura de 200°C y la presión de saturación correspondiente de 15.54 bar. La presión de condensación es de 0.1 bar. La eficiencia isoentrópica de la turbina de vapor es, η_{SIT} =0.9.

Los balances de energía para las diferentes configuraciones de las centrales geotérmicas con base a las Figs. 1 y 2 se muestran a continuación:

Para la configuración con una, dos y tres cámaras flash, se tiene que la fracción masa es:

$$m_1 = \frac{\dot{m}_{TV_1}}{\dot{m}_V} = x_2 \,. \tag{1}$$

La segunda fracción masa para el arreglo con dos cámaras flash, se define:

$$m_2 = \frac{\dot{m}_{V_1}}{\dot{m}_V} = (1 - x_2)\, x_{10} \,. \tag{2a}$$

La segunda y tercera fracción masa para el arreglo con tres cámaras flash, es:

$$m_2 = \frac{\dot{m}_{V_1}}{\dot{m}_V} = (1 - x_2)\, x_{13} \,. \tag{2b}$$

$$m_3 = \frac{\dot{m}_{V_2}}{\dot{m}_V} = (1 - x_2)(1 - x_{13})\, x_{15} \,. \tag{3}$$

La eficiencia isoentrópica húmeda de la turbina se obtiene de acuerdo a la regla de Baumann, que establece que se debe de considerar la afectación por la cantidad de humedad que está presente durante el proceso de expansión, lo que implica, que la eficiencia isoentrópica de la turbina, η_{SIT}, disminuya [10]. Por ejemplo, la Ec. (4) se define para la central geotérmica con una etapa de expansión, como:

$$\eta_{Tw} = \eta_{SIT}\, \frac{(x_3 + x_4)}{2} \,, \tag{4}$$

donde x_3 es la calidad del vapor a la entrada y x_4 es la calidad a la salida de la turbina, obtenida al utilizar la η_{SIT}.

El trabajo por unidad de masa generado en las turbinas de vapor de acuerdo a sus configuraciones para:

Una cámara flash

$$w_{TV_{cf1}} = x_2(h_3 - h_4). \tag{5}$$

Dos cámaras flash

$$w_{TV_{cf2}} = x_2(h_3 - h_4) + \left(x_2 + \left[1 - x_2\right]x_{10}\right)\left(h_6 - h_7\right) \tag{6}$$

Tres cámaras flash

$$\begin{aligned} w_{TV_{cf3}} &= x_2(h_3 - h_4) + \left(x_2 + \left[1 - x_2\right]x_{13}\right)\left(h_6 - h_7\right) \\ &+ \left[1 - x_2\right]\left[1 - x_{13}\right]x_{15}\left(h_9 - h_{10}\right) \end{aligned}. \tag{7}$$

Para el ciclo híbrido, el balance de energía para calcular el perfil de temperaturas en el intercambiador de calor es

$$\dot{m}_{L_1}\left(h_6 - h_a\right) = \dot{m}_{sc}\left(h_{sc1} - h_{sc5}\right), \tag{8}$$

donde el ΔT_{pp} y ΔT_{alta} se definen como la diferencia de temperaturas del agua de la línea proveniente de la primera cámara flash y del fluido del ciclo secundario, (sc), Fig. 6.

$$\Delta T_{pp} = T_a - T_{sc5}, \tag{9a}$$

$$\Delta T_{alta} = T_6 - T_{sc1}. \tag{9b}$$

De acuerdo con Çengel [2], la eficiencia térmica para la central geotérmica se define como,

$$\eta_{th} = \frac{w_{TV_{cf}}}{e_{entrada}} = \frac{w_{TV_{cf}}}{h_1 - h_0}, \tag{10}$$

donde, h_0 es la entalpía del agua líquida a una temperatura de 15°C y una presión de 1 bar.

La exergía física por unidad de masa para cada uno de los estados termodinámicos se obtiene con el modelo siguiente,

$$\varepsilon_i = h_i - h_0 - T_0\left(s_i - s_0\right). \tag{11}$$

Las condiciones del estado muerto son consideradas para el vapor saturado húmedo a T_0= 15°C y P_0= 1 bar.

La eficiencia exergética es expresada de la manera siguiente [1],

$$\eta_\varepsilon = \frac{w_{TV_{cf}}}{\varepsilon_1} = \frac{w_{TV_{cf}}}{h_1 - h_0 - T_0\left(s_1 - s_0\right)}. \tag{12}$$

La exergía de expansión en la turbina de vapor

$$\varepsilon_{TV_{cf1}} = x_2\left(\varepsilon_3 - \varepsilon_4\right), \tag{13}$$

$$\varepsilon_{TV_{cf2}} = x_2\left(\varepsilon_3 - \varepsilon_4\right) + \left(x_2 + \left(1 - x_2\right)x_{10}\right)\left(\varepsilon_6 - \varepsilon_7\right), \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{TV_{cf3}} &= x_2\left(\varepsilon_3 - \varepsilon_4\right) + \left(x_2 + \left(1 - x_2\right)x_{13}\right)\left(\varepsilon_6 - \varepsilon_7\right) \\ &+ \left(1 - x_2\right)\left(1 - x_{13}\right)x_{15}\left(\varepsilon_9 - \varepsilon_{10}\right) \end{aligned}. \tag{15}$$

Las irreversibilidades específicas generadas en la expansión de la turbina [9].

$$\dot{i}_{TV_{cf}} = \sum_{i=1}^{n} m_i\left(s_i - s_{i+1}\right), \tag{16}$$

donde s_i es la entropía específica a la entrada de la turbina y s_{i+1} es la entropía específica de salida.

En la Fig. 3 se muestra el Diagrama de Sankey de la turbina de vapor para el arreglo de tres cámaras flash que resume de forma gráfica las modelos que se desarrollan en este trabajo: la exergía física por unidad de masa, la exergía de expansión, las irreversibilidades y el trabajo generado.

En las Figs. 4 (b), (c) y (d) se muestran los diagramas exergía-entalpía por unidad de masa para las configuraciones de una, dos y tres cámaras flash, respectivamente. Para estos arreglos de baja calidad de la energía, se aprovecha como máximo el 30% de la exergía en el estado 3. El estado 3 es el de mayor exergía con 831 kJ/kg, cuando se tiene un arreglo de tres cámaras. Las expansiones del vapor se encuentran en la zona de mayor contenido de exergía dentro de la región de vapor saturado. En las cámaras flash y separadoras las pérdidas de la calidad de la energía no representa pérdidas significativas que se cuantifiquen en la irreversibilidad total de los sistemas geotérmicos. Así mismo, la exergía a la entrada de segunda y tercera etapa de expansión se incrementa en promedio en 15 kJ/kg, al mezclarse las corrientes provenientes de la salida de la etapa anterior y de la fracción de vapor separada en la siguiente cámara flash.

La Fig. 4(a) muestra el diagrama exergía-entalpía con vapor saturado seco. El estado a la entrada de la turbina de

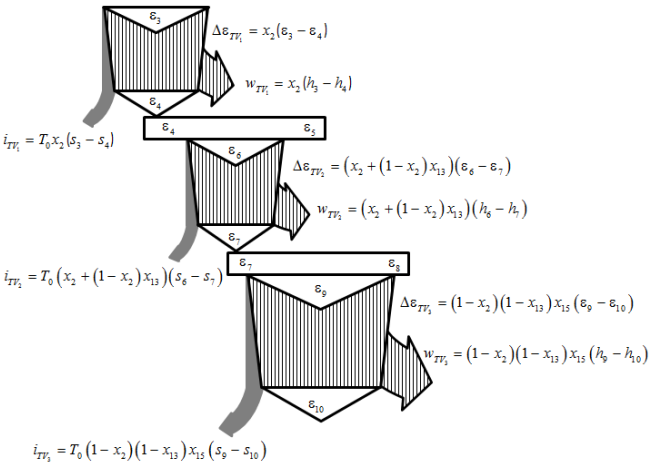


Figura 3. Diagrama de Sankey de la turbina de vapor con tres secciones. Fuente: Elaboración de los autores

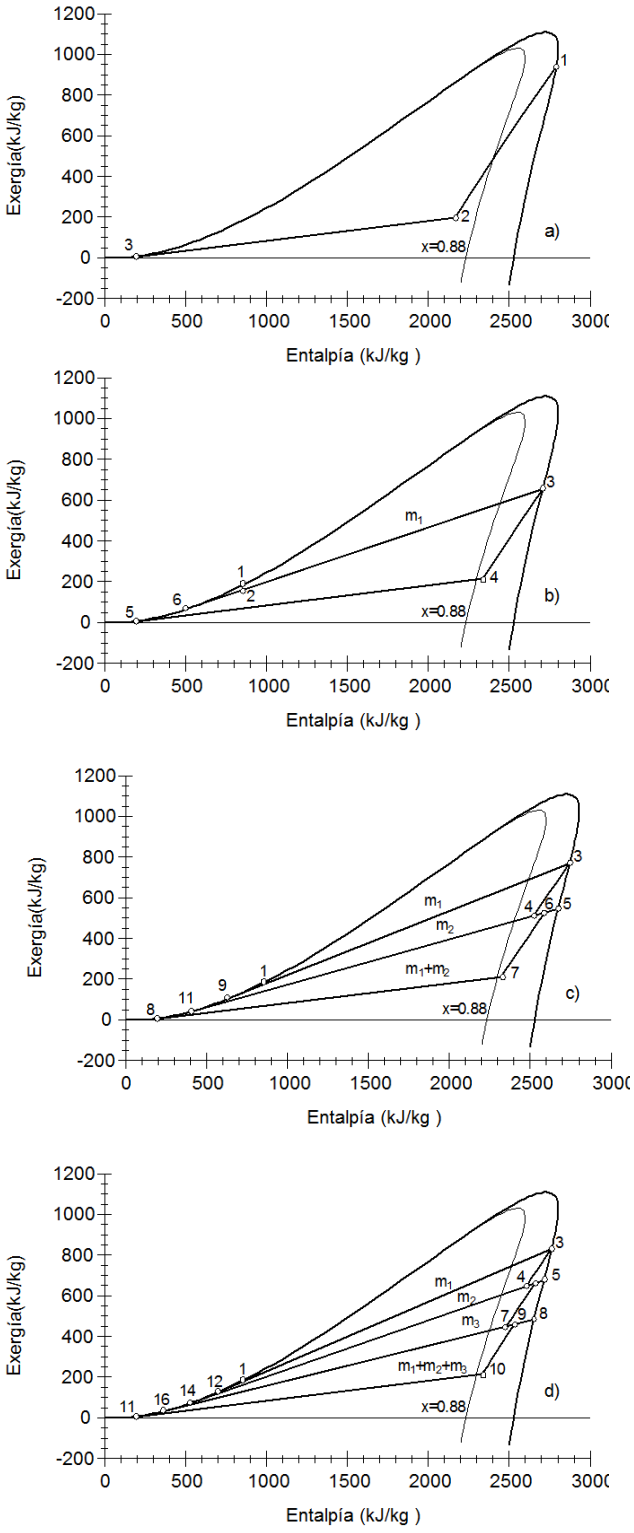


Figura 4. Diagrama exergía-entalpía de las centrales geotérmicas con: a) sin cámara flash, b) una cámara flash, c) dos cámaras flash y d) tres cámaras flash.
Fuente: Elaboración de los autores

vapor tiene mayor disponibilidad de la energía, con 940 kJ/kg, es decir, 109 kJ/kg más que el estado 3 con tres cámaras flash.

Con las cámaras flash se separa la fase de vapor del fluido geotérmico, incrementando así también, el contenido energético y exérgetico del vapor en más del 400% con respecto al estado 1, aumentado la disponibilidad para generar mayor trabajo útil, lo que implica que aunque se mantiene la presión y la temperatura entre los estados 2 y 3, el efecto del aumento del volumen específico, hace que el contenido de exergía y energía se incrementen, es decir, la exergía latente es mayor. Sin embargo, como es una energía más desordenada por estar a baja presión, las irreversibilidades en la expansión de la turbina también se incrementaran.

El trabajo de expansión generado en la turbina de vapor es función de la presión de operación de la cámara flash, debido a que de ésta depende la fracción que se separa en el tren de cámaras flash representados en las Figs. 2 (b), (c) y (d), así mismo se tiene que al aprovechar la mayor fracción de vapor, se reduce el tirante térmico en las secciones de la turbina de vapor, al disminuir la presión de saturación, P_2. En la Tabla 1, se presentan tres modelos matemáticos de optimización para encontrar el máximo trabajo en función de la presión de operación de la primera cámara flash. Las ecuaciones (5), (6) y (7) son evaluadas para encontrar el trabajo máximo generado por unidad de masa. Las líneas de las expansiones de la turbina deberán estar sujetas a la restricción de que la calidad del vapor sea mayor o igual a 0.88. Se utiliza la herramienta computacional "Solver de Excel", para realizar la simulación.

En la Tabla 2, se muestran los valores obtenidos para la presión de la primera cámara separadora, la calidad del vapor a la salida de las cámaras flash y el trabajo máximo generado en la turbina por unidad de masa. Los valores de la Tabla 1 muestran una variación menor al 1% con los propuestos por Chamorro et al [1].

Los valores de la Tabla 2, establecen las mejores condiciones de operación para las centrales de geotérmicas con cámaras flash; sin embargo, con el análisis paramétrico se puede establecer la pérdida en la generación de trabajo al variar la P_2.

Tabla 1.
Función objetivo y restricciones para los sistemas flash geotérmicos.

Una cámara flash	**Dos cámaras flash**	**Tres cámaras flash**
Max Z= $w_{TV_{cf1}}(P_2)$	Max $Z = w_{TV_{cf2}}(P_2)$	Max $Z = w_{TV_{cf3}}(P_2)$
Sujeto a:	Sujeto a:	Sujeto a:
$x_4 \geq 0.88$	$x_7 \geq 0.88$	$x_{10} \geq 0.88$
$P_{cond} < P_2 < P_{sat1}$	$P_{cond} < P_2 < P_{sat1}$	$P_{cond} < P_2 < P_{sat1}$
$P \in R^n$	$P \in R^n$	$P \in R^n$

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 2.
Presión en la primera cámara flash y la calidad del vapor en las tres cámaras flash.

Cámara Flash	**P_2 (bar)**	**x_1**	**x_2**	**x_3**	**w_{TV} (kJ/kg)**
1	1.98	0.16	-	-	58.77
2	4.22	0.11	0.10	-	75.20
3	6.00	0.08	0.08	0.07	80.11

Fuente: Elaboración de los autores

3. Resultados

En la Fig. 5 se muestran el comportamiento del trabajo generado en la turbina y la calidad del vapor al final de última etapa de expansión en función de la temperatura del fluido geotérmico y de la presión de la primera cámara flash de las centrales flash geotérmicas y de la que opera con vapor saturado seco.

La unidad que opera con vapor saturado seco es la que genera el mayor trabajo por unidad de masa; sin embargo, para el rango de temperaturas analizadas, la calidad del vapor es menor a 0.88, lo que implica que la turbina de vapor tenga un sistema de protección y control que permita mantener una operación segura a estas condiciones. La diferencia de tener un reservorio geotérmico con la temperatura de 200°C y de 160°C, implica una disminución de 146 kJ/kg, lo que representa una reducción del 23.25 % en la generación de trabajo. Con respecto a los arreglos flash geotérmicos, la configuración con 3 cámaras flash genera mayor trabajo en la turbina de vapor, esto se debe a la mayor cantidad de vapor que se expande en la tercera etapa de la turbina, tal como se muestra en la Fig. 5(d).

Para la unidad que tiene una sola cámara flash, el sistema es más sensible a las variables de presión y temperatura del vapor. Las mejores condiciones para obtener el trabajo máximo se obtiene en la vecindad de la P_2=2 bar, lo que establece que el efecto de la cámara es más significativa al separar la mayor cantidad de vapor seco que mantener el mayor tirante térmico que se pueda tener al elevar la presión de la cámara separadora, Fig. 5 (b).

Con respecto a los sistemas geotérmicos que tienen dos y tres cámaras flash, el efecto de la variación de la presión de la primera cámara se amortigua para valores superiores de la T_1=180°C, es decir, al incrementar el número de cámaras flash y de etapas de expansión en la turbina de vapor, el sistema es más robusto y por lo tanto existe la posibilidad de que sólo fluctué la generación de trabajo en un intervalo de 5 kJ/kg, lo que representa con respecto al trabajo máximo, una disminución del 6%. Para valores de la T_1 menores a 180°C, por este mismo efecto se pierde hasta 10 kJ/kg, lo que representa una disminución del trabajo del 18%.

Con los arreglos que tienen más de dos cámaras flash se trabaja en una región segura, debido a que la calidad del vapor en la última etapa de expansión en la turbina es mayor a 0.88. Para la unidad que tiene una cámara flash, la operación segura se tiene con presiones inferiores a 3.5 bar. Por otra parte, al incrementar el número de cámaras flash de dos a tres, se tiene un incremento del 6.6% en promedio en la generación de trabajo.

Las presiones óptimas de la primera cámara separadora para generar el máximo trabajo obtenidas con el análisis paramétrico presentado en la Fig. 5, son coincidentes con los encontrados con el método de optimización numérica,

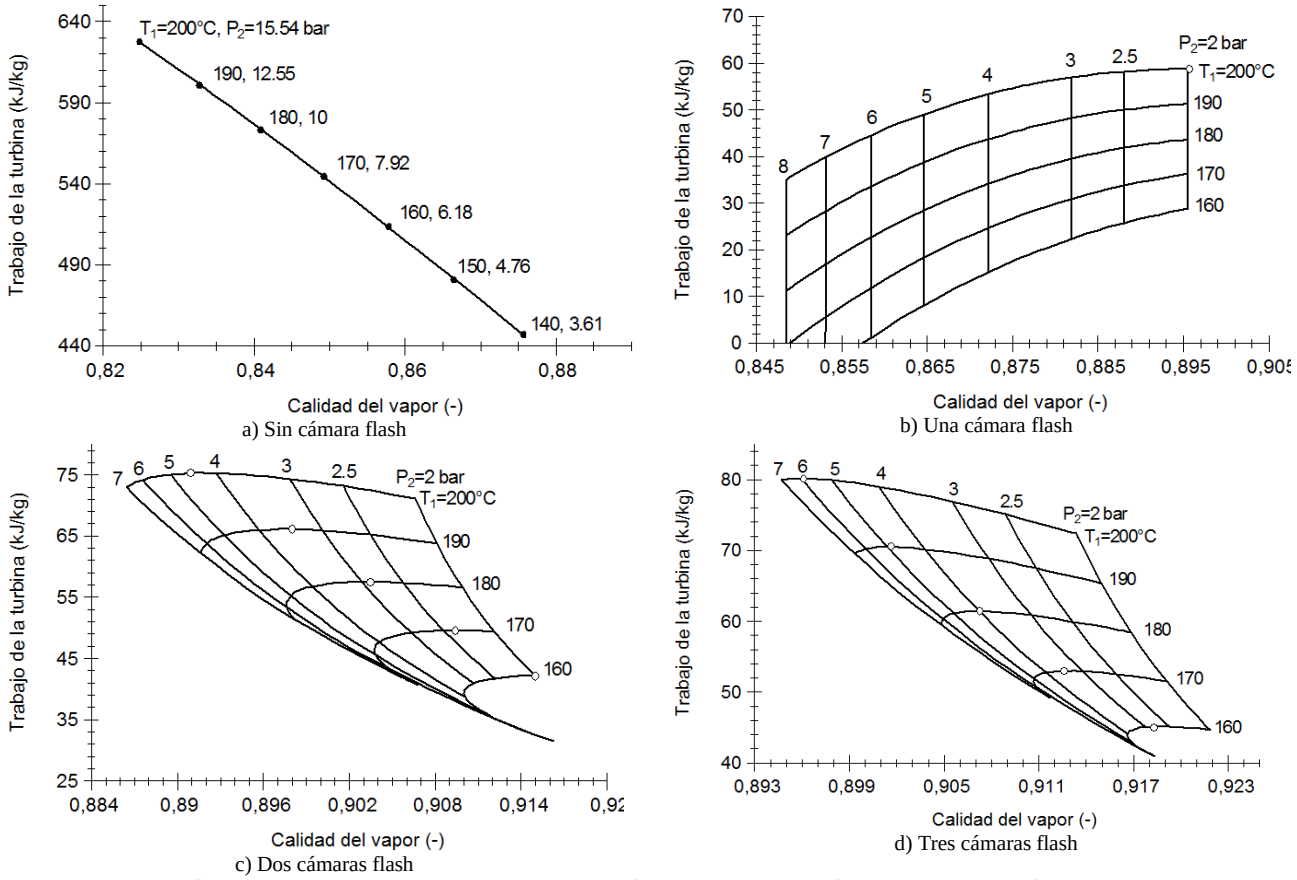


Figura 5. Trabajo específico de la turbina de vapor-calidad del vapor de la última etapa de expansión de las centrales geotérmicas.
Fuente: Elaboración de los autores

reportados en la Tabla 2. Éstos se marcan en las Fig. 5 con círculos sobre las isotermas de las T_1. Para el caso de una cámara flash con temperaturas del recurso geotérmico inferiores a 200°C, las presiones óptimas se encuentran entre 1.95 y 1.03 bar.

Los ciclos híbridos generalmente se instalan cuando se tienen temperaturas inferiores de 160°C en el reservorio geotérmico. En las Figs. 6 a) y b) se muestran los perfiles de temperatura del intercambiador utilizando tres diferentes fluidos secundarios, amoniaco, refrigerante HFC-134a y propano. Este arreglo se considera debido a la temperatura inferior del reservorio geotérmico que implica la infactibilidad de colocar una segunda cámara flash. Sin embargo, se coloca un segundo ciclo de potencia donde se puede obtener hasta un porcentaje del 15% adicional de la potencia obtenida de la turbina de vapor principal, como se muestra en las Tablas 3 y 4.

El propano, C_3H_8, es el mejor fluido secundario para el ciclo híbrido, debido a que requiere una menor cantidad de energía para realizar el cambio de fase. En las Tablas 3 y 4 se muestra que dependiendo de las propiedades termofísicas del fluido se produce mayor trabajo de expansión, sin embargo en el intercambiador de calor se puede evaporar un mayor flujo

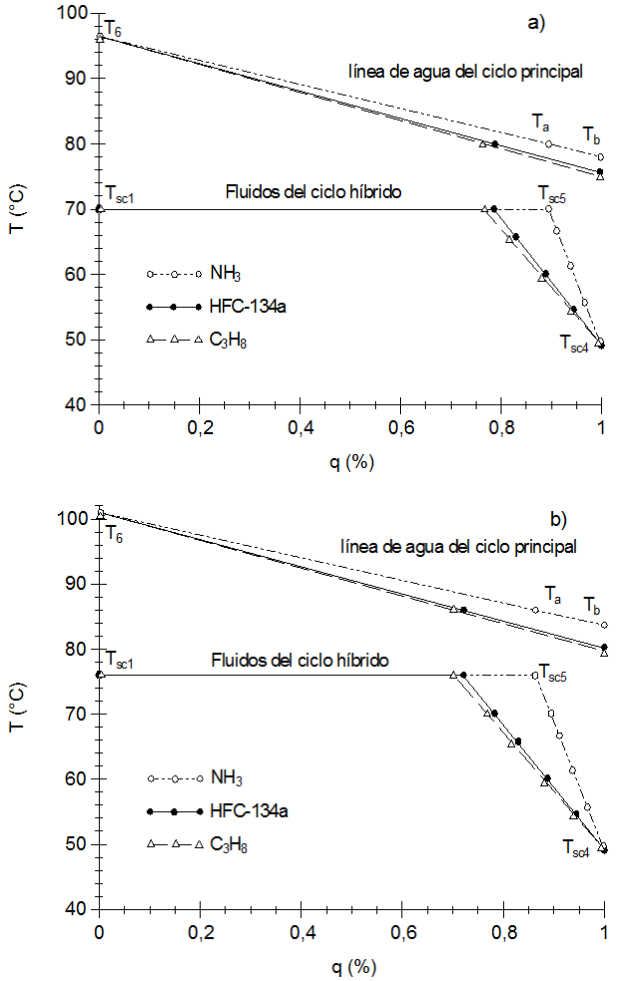


Figura 6. Perfil de temperaturas en el intercambiador de calor para una temperatura del vapor principal a) T_1=150°C y b) T_1=160°C.
Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 3.
Resultados para los fluidos del ciclo híbrido a condición T_{v1}=150°C y T_6=96.45°C.

Fluido Secundario	w_{Tsc} (kJ/kg)	$\dot{m}_{sc}$ (Kg/s)	$\dot{w}_{Neta_{sc}}$ (kW)	$\dot{w}_{Tsc} / \dot{w}_{TV_{cf1}}$ (%)
NH_3	56.28	6.40	360.44	0.13
HFC-134a	7.84	48.36	379.60	0.14
C_3H_8	14.68	27.27	400.35	0.15

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 4.
Resultados para los fluidos del ciclo híbrido a condición T_{v1}=160°C y T_6=101.0°C.

Fluido Secundario	w_{Tsc} (kJ/kg)	$\dot{m}_{sc}$ (Kg/s)	$\dot{w}_{Neta_{sc}}$ (kW)	$\dot{w}_{Tsc} / \dot{w}_{TV_{cf1}}$ (%)
NH_3	69.16	6.18	427.16	0.13
HFC-134a	9.56	48.80	466.57	0.15
C_3H_8	17.45	26.95	470.52	0.15

Fuente: Elaboración de los autores

a las condiciones de operación. El HFC-134a presenta un comportamiento similar al propano, tal como lo muestran en su trabajo Velez F. et al [11]. Con referente al análisis exergético, el ciclo secundario contribuye en menos del 5% a las irreversibilidades del ciclo binario, debido a que la mayor irreversibilidad se genera en la turbina de vapor del ciclo con una cámara flash.

El sistema con 3 cámaras flash genera mayor trabajo específico, y por consiguiente también la mejor eficiencia térmica, Fig. 7. La diferencia entre operar con 2 y 3 cámaras flash es menor al 0.63% en el incremento de la eficiencia térmica y sólo se puede aumentar en 476 kW la potencia generada. Con respecto a la eficiencia exergética, al comparar el arreglo de tres y dos cámaras flash, se tiene un incremento del 2.16%. Sin embargo, la diferencia entre operar con una y dos cámaras incrementa en 9% la eficiencia exergética, lo que implica reducir las pérdidas de la disponibilidad de la energía por las irreversibilidades del sistemas.

La eficiencia térmica para estos sistemas es menor al 12%, debido a la entalpía de baja calidad; sin embargo, la eficiencia exergética se aproxima a las eficiencias de los sistemas de

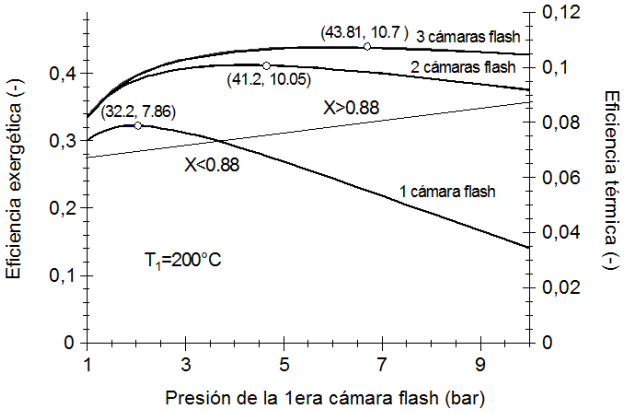


Figura 7. Eficiencias exergéticas y térmicas de las geotermoeléctricas con una, dos y tres cámaras flash para T_1=200°C.
Fuente: Elaboración de los autores

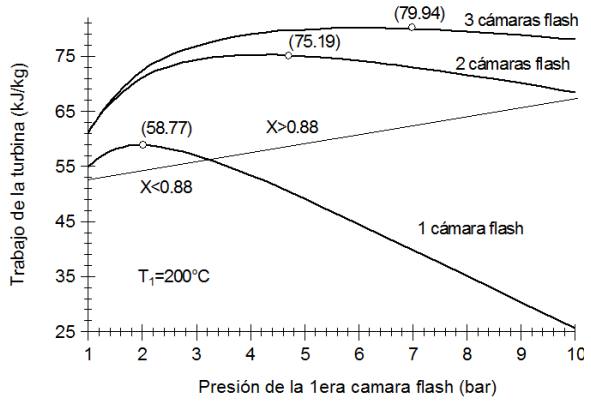


Figura 8. Exergía e irreversilidad por unidad de masa para arreglos de las geotermoeléctricas con una, dos y tres cámaras flash para T_1=200°C.
Fuente: Elaboración de los autores

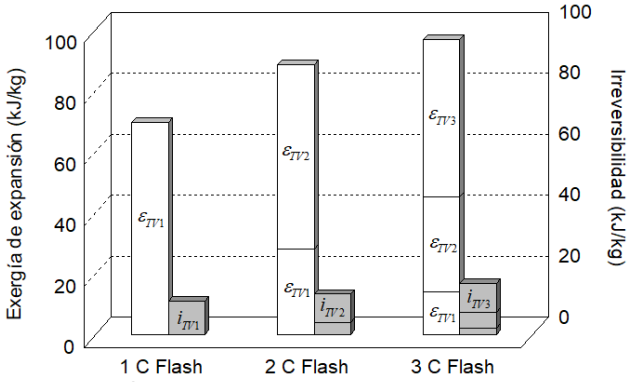


Figura 9. Exergía e irreversilidad por unidad de masa para arreglos de las geotermoeléctricas con una, dos y tres cámaras flash por estapa de expansión para T_1=200°C.
Fuente: Elaboración de los autores

generación de energía convencionales, básicamente por el incremento de la exergía latente, al separarse la fracción de vapor a través de las cámaras flash, que aumenta la disponibilidad de la energía para obtener mayor trabajo útil.

Las irreversibilidades generadas en la expansión de la turbina de vapor se incrementan, al aumentar el número de expansiones, sin embargo, también se incrementa el trabajo generado. Las mayores irreversibilidades se generan en la última etapa de expansión de las turbinas, debido al mayor flujo de vapor que circula en éstas, tal como se muestra en las Figs. 8 y 9.

Así mismo, las mayores irreversibilidades se tienen en los valores de la presión óptima para obtener el máximo trabajo, es decir, que no existe la posibilidad de minimizar las irreversibilidades en estos sistemas. Lo mismo sucede al incrementar el número de cámaras flash, el trabajo aumentó y se incrementan las irreversibilidades. Sin embargo, el sistema más irreversible es con una cámara flash, debido a que su pendiente es más pronunciada y genera menos trabajo, como se muestra en la Fig. 9.

4. Conclusiones

Las plantas de generación de potencia que utilizan como fuente de energía la geotérmica, en específico vapor húmedo, presentan un buen desempeño cuando integran en su configuración dos cámaras flash. El implementar una tercera cámara flash no incrementa de forma significativa la eficiencia térmica ni la generación de potencia, debido a que se incrementan las pérdidas de la disponibilidad de la energía en la tercera sección de la expansión en la turbina de vapor.

El análisis termodinámico a las centrales geotérmicas muestra que al incluir cámaras flash en los sistemas, se incrementa el trabajo de expansión y adicionalmente la seguridad en la operación por mantener la calidad del vapor mayor a 0.88. Sin embargo, como sistemas de baja entalpía, no se presenta la opción de minimizar la generación de irreversibilidades, debido a que se aprovecha el efecto del incremento en el volumen específico, al mantener la presión y temperaturas constantes en la cámara separadora y la turbina de vapor, incrementando su energía y la exergía latente.

Así mismo, con el análisis paramétrico se obtuvieron las presiones de la cámara flash para obtener el máximo trabajo en la turbina, lo que establece un rango de operación para estos sistemas en la vecindad de estos valores que son coincidentes con las presiones de las centrales flash geotérmicas en operación actual.

En el intervalo de temperaturas de 200°C a 160°C, para una central geotérmica con una cámara flash, el trabajo máximo se obtiene en promedio con la P_2= 2 bar, con una variación menor al 1% en el trabajo generado. Al implementar dos cámaras, la P_2 se debe de aumentar, lo que implica un incremento promedio del trabajo generado de 27% y del 36% con tres cámaras con respecto al obtenido con la configuración con una cámara flash. Así mismo, para las temperaturas del recurso geotérmico menores a 170°C, con las configuraciones de dos y tres cámaras se tiene una diferencia de 1 kJ/kg en el trabajo generado, al considerar la presión óptima con respecto a la presión, P_2=2 bar, es decir, la operación se puede realizar considerando las condiciones de una cámara flash.

Referencias

[1] Chamorro, C.R., Mondéjar, M.E., Ramos, R., Segovia, J.J., Martín, M.C. and Villamañán, M.A., World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies, Energy 42, pp 10-18, 2012. DOI: 10.1016/j.energy.2011.06.005

[2] Yunus, A., Çengel and Boles, M.A., Termodinámica, Ed. McGraw-Hill, 2015.

[3] Ordaz, A.R., Flores, M. y Ramírez, G., Potencial geotérmico de la República Mexicana. Revista Mexicana de Geoenergía, [en línea]. 24(1), pp. 50-58, 2011. Disponible en: http://geotermia.org.mx/geotermia/revistageotermia/Geotermia-Vol24-1.pdf

[4] Bayer, P., Rybach, L., Blum, P. and Brauchler, R., Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews 26, pp 446-463, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.039

[5] Barbier, E., Geothermal energy technology and current status: An overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews 6, pp 3-65, 2002. DOI: 10.1016/S1364-0321(02)00002-3

[6] Fridleifsson, I.B., Geothermal energy for the benefit of the people, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 5(3), pp 299-312, 2001. DOI: 10.1016/S1364-0321(01)00002-8

[7] Programa de Obras e Inversión del Sector Eléctrico, POISE 2014-2028. CFE, México, [en línea]. pp 1-370. Disponible en:

http://www.amdee.org/Publicaciones/POISE-2014-2028.pdf
[8] Lugo, R., Salazar, M., Zamora, J.M., Torres, A. y Toledo, M., Análisis exergético de una central termoeléctrica, Científica, [en línea]. 13(1), pp. 17-25, 2009. Disponible en: http://www.redalyc.org/pdf/614/61412184004.pdf
[9] Kotas, T.J., The exergy method of thermal plant analysis; Butterworths: London, UK, 1985.
[10] DiPippo, R., Geothermal power plants. 2nd ed. Oxford, UK: Elsevier; 2008.
[11] Vélez, F., Chejne, F. and Quijano, A., Thermodynamic analysis of R134a in an organic rankine cycle for power generation from low temperature sources. DYNA, 81(185), pp. 153-159, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n185.37598
[12] Chen, H., Goswami, Y. and Stefanakos, E., A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 14(9), pp. 3059-3067, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.006
[13] Aneke, M., Agnew, B. and Underwood, C., Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant. Applied Thermal Engineering, 31(10), pp. 1825-1832, 2011. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.02.028

M. Salazar-Pereyra, received the BSc. Eng in Energy in 2001, the MSc. degree in Mechanical Eng. in 2003, and the PhD degree in Mechanical Eng. from Universidad Autónoma Nacional de Mexico, México in 2013. He is a full time professor in the Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, México since 2003, where he is a member of the researching group of energy efficiency and renewable energy. He has published and presented several papers in indexed and refereed journals. His research interests include: energy systems, design and simulation of power plants, exergy and exergoeconomic method applied to energy processes and others renewable energies systems. He is currently a member of CONACYT's National System of Researchers.
ORCID: 0000-0001-6487-3087.

A. Mora-Ortega, received the PhD degree in Mechanical Eng. from Universidad Autónoma Nacional de Mexico, México in 2015. He is a full time professor in the Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, México since 2015, where he is a member of the researching group of energy efficiency and renewable energy and the American Physics Society. His research interests are about energy system and energy renewable.
ORCID: 0000-0001-5200-3527.

A.E. Bonilla-Blancas, received the BSc. Eng in Chemical in 2000, the MSc. degree in Chemical Eng. in 2004, and the PhD degree in Materials Eng. from Universidad Autónoma Nacional de Mexico, México in 2010. She is a full time research in the Centro de Tecnología Avanzada, CIATEQ, México since 2011, where she is a member of the researching group of polymers and energy efficiency. She has published and presented several papers in indexed and refereed journals. Her research interests include: energy systems, design and simulation of polymer behavior and mold manufacturing. She is currently a member of CONACYT's National System of Researchers.
ORCID: 0000-0003-0534-5932.

R. Lugo-Leyte, received the PhD degree in Mechanical Eng. from Instituto Politécnico Nacional, México in 2002. He is a full time professor in the Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México since 1980. He has published and presented several papers in indexed and refereed journals. His research interests include: energy systems, design and simulation of power plants, exergy and exergoeconomic method applied to energy processes and others renewable energies systems.
ORCID: 0000-0001-6578-0691.

H.D. Lugo-Méndez, received the PhD degree in Chemical Eng. from Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa, México in 2017. She has published and presented several papers in indexed and refereed journals. Her research interests include: energy systems, design and simulation of power plants, exergy and exergoeconomic method applied to energy processes and others renewable energies systems.
ORCID: 0000-0002-4418-7896.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Effect of solid wastes leachates on a tropical soil

Alejandro Quintero Ramírez, Yamile Valencia González & Luis Augusto Lara Valencia

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. aquinte@unal.edu.co, yvalenc0@unal.edu.co, lualarava@unal.edu.co

Received: April 03rd, 2017. Received in revised form: September 07th, 2017. Accepted: October 25th, 2017.

Abstract
Disposal of solid wastes has become a common problem for public administrations due to the high population growth rates and the unavailability of land in large cities. Besides, the increase of long-term rainfalls combined with poor runoff water collection systems in sanitary landfills causes greater production of leachate at the disposal sites. This paper examines the impact of solid wastes leachates on a tropical soil throughout the geotechnical characterization of two samples of residual soil, both sharing the same origin, one of them exposed to the effect of solid wastes leachates for over 15 years and the other one in natural soil conditions (uncontaminated). For this purpose, various laboratory tests were carried out to determinate the physical, chemical, structural, mechanical and mineralogical properties of soil samplings. The results suggest that the exposition of the contaminated sample to leachates modify significantly their physical, chemical, structural, hydro-mechanical and mineralogical properties, showing a degradation of the geotechnical behavior of soils exposed to contaminants. These should serve to raise awareness in environmental authorities about the inadequate disposal of solid wastes and other contaminants thrown directly into the soil.

Keywords: Soil contamination; geotechnical characterization; environmental management.

Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical

Resumen
Debido al alto índice de crecimiento demográfico y la poca disponibilidad de tierra que enfrentan las grandes ciudades, la disposición de residuos sólidos se ha convertido en una problemática constante para las administraciones; adicionalmente, se suma el aumento de las lluvias por largos periodos lo que combinado con prácticas deficientes en la captación de aguas de escorrentía en los rellenos sanitarios, ocasiona una mayor producción de lixiviados en los sitios de disposición. Para estudiar el efecto que pueden generar los lixiviados de residuos sólidos en los suelos tropicales, se caracterizaron geotécnicamente dos muestras de suelo residual del mismo origen, una expuesta al efecto de lixiviados de residuos sólidos por más de 15 años y otra en condiciones naturales (no contaminada), con el objeto de estimar el efecto que genera la presencia del contaminante en las propiedades geotécnicas de dicho suelo residual. La investigación se realizó mediante una campaña de ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades físicas, químicas, estructurales, mecánicas y mineralógicas de los suelos. Los resultados permitieron establecer que la exposición de la muestra contaminada a los lixiviados genera cambios significativos en sus propiedades físicas, químicas, estructurales, hidro-mecánicas y mineralógicas. En consecuencia, se presenta una degradación del comportamiento geotécnico de los suelos expuestos a contaminantes, lo que debe servir como base para generar conciencia en las autoridades ambientales y que se impongan normativas más rígidas ante la disposición inadecuada de lixiviados y en general cualquier tipo de contaminante lanzado directamente al sub-suelo.

Palabras clave: Contaminación de suelos; caracterización geotécnica; gestión ambiental.

1. Introducción

La gestión de los residuos sólidos urbanos constituye hoy en día un importante problema ambiental, económico y social en todo el mundo, principalmente debido a que el volumen de residuos crece más rápidamente que la población mundial. (Renou et al., 2008). Las malas prácticas de manejo y control en los rellenos sanitarios, pueden convertir a los rellenos en una potencial fuente de contaminación hidrogeológica, debido al riesgo que existe en el caso de que los lixiviados se infiltren y lleguen al agua subterránea, representando una alta fuente de toxicidad y un alto riesgo de contagio de

How to cite: Quintero-Ramírez, A., Valencia-González, Y. and Lara-Valencia, L.A., Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical DYNA, 84(203), pp. 283-290, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

enfermedades cancerígenas (Park & Batchelor, 2002). Por lo tanto, los lixiviados son reconocidos como un importante problema ambiental y su evaluación y gestión de riesgos se considera esencial.

Ante este escenario, es clara la importancia del control de las capas de suelo compactado para la prevención del avance de los frentes de contaminación; así como el efecto que los lixiviados tienen en las propiedades geotécnicas de los suelos expuestos a dichos contaminantes.

La investigación actual cumple un papel muy importante en el aporte a la gestión ambiental desde el punto de vista geotécnico, ya que presenta los cambios que ocurren en las propiedades geotécnicas de un suelo residual por la contaminación con lixiviados generados de un relleno de residuos sólidos conformado en el año 1995.

Se espera contribuir al entendimiento de las alteraciones que sufre un suelo expuesto a contaminación, resaltar la importancia que se le debe dar al manejo de los residuos sólidos, a su disposición final y al posterior vertimiento de los lixiviados, a los cuidados que hay que tener con los lugares que en un futuro sean destinados para la disposición de éstos residuos, y al desarrollo de métodos de prevención de riesgos que puedan ser causados por los malos manejos que se le da hoy en día a los residuos sólidos y los lixiviados.

2. Descripción de la zona de estudio

El sitio en estudio está localizado en la subregión Oriente del departamento de Antioquia-Colombia, en la zona rural del municipio de El Santuario, específicamente en la vereda El Señor Caído, a 1.5 km al Occidente de la zona urbana del municipio, en los alrededores del relleno sanitario municipal a una distancia aproximada de 50 km de la ciudad de Medellín por la Ruta Nacional 60 (Autopista Medellín – Bogotá), de acuerdo al sistema de coordenadas geográficas mundial, WGS 84, está georreferenciada en las coordenadas 6°8'25.31" Latitud Norte y 75°16'30.30" Longitud Oeste. El municipio de El Santuario está localizado sobre la cordillera central, hace parte de la subregión del Altiplano del Oriente Antioqueño que está integrada por los Municipios de El Retiro, La Ceja, La Unión, El Carmen de Viboral, El Santuario, Marinilla, Guarne, San Vicente y Concepción. Presenta una altitud media de 2150 msnm en la cabecera municipal, con una altura máxima de 2500 msnm y mínima de 2120 msnm (PBOT El Santuario, 2000). El promedio de precipitación anual para el municipio de El Santuario es de 2795 mm, con variaciones entre 2000 y 3000 mm (EE.PP. El Santuario, 2015a). El régimen de precipitación es bimodal, con dos períodos mayores de lluvias en marzo – mayo y septiembre – noviembre, intercalados con dos estaciones menos húmedas. El municipio presenta una temperatura promedio variando entre 12°C y 18°C (CORNARE, 2006), su paisaje es irregular de colinas redondeadas y vertientes cortas, unidad de vertientes abruptas y escarpes y unidad de planicies aluviales (CORNARE, 2006).

Geológicamente en este sector predomina la unidad ígnea plutónica denominada Batolito Antioqueño de edad Cretácica y compuesto principalmente por tonalitas y granodioritas. Esta unidad presenta contactos intrusivos con el basamento metamórfico Triásico de la Cordillera Central, representado en el Complejo El Retiro, al cual pertenecen las rocas del Néis de la Ceja. La intrusión de las rocas plutónicas del Batolito ha creado una aureola de contacto con desarrollo de cornubianitas (Rodriguez, et al, 2005).

3. Metodología

3.1. Exploración de campo

Los sitios de toma de muestras están localizados en los alrededores del relleno sanitario del municipio de El Santuario. La muestra natural (no contaminada) fue tomada en un talud adyacente a la zona de disposición de residuos sólidos dónde se extrae material para cubrir los residuos recién depositados en el relleno. La muestra contaminada (afectada por lixiviados) fue tomada en la parte baja del sitio de disposición de los residuos sólidos en el sector Sur del relleno, específicamente en el sitio de descarga de las cunetas de aguas lluvia a la parte exterior del relleno. Las cunetas de aguas lluvias son de sección trapezoidal y descargan las aguas en cunetas naturales (sin recubrimiento) localizadas en el cerramiento del lote. Éstas están diferenciadas de las cunetas de los lixiviados de sección triangular a lo largo de su trazado dentro del relleno, sin embargo, existe un punto de confluencia entre ambos tipos cunetas en el sector Sur-Occidental del relleno, en el que se genera un paso de lixiviado desde las cunetas triangulares (lixiviados) hacia las cunetas trapezoidales (aguas lluvias). Este fenómeno de paso de lixiviados entre cunetas se da principalmente en las épocas de lluvias, donde existe un mayor caudal de lixiviado y las cunetas triangulares superan su capacidad hidráulica, generando un reboce de lixiviados que es captado por las cunetas de aguas lluvias. La zona de recolección de la muestra contaminada ha estado en contacto con el lixiviado durante un largo periodo de tiempo, lo que garantiza que el sub-suelo de este sitio está bajo la influencia del líquido lixiviado. Se recolectaron varias muestras alteradas (muestras de cajón) e inalteradas (muestras en bolsa), tanto en estado natural como contaminada con el fin de realizar una completa caracterización de los materiales (caracterización física, química, mineralógica, estructural y mecánica las muestras de suelo).

3.2. Caracterización física

Los ensayos de caracterización física son realizados en muestras alteradas para obtener las propiedades índice de los materiales, la clasificación de las muestras recuperadas, entre otras propiedades de interés. Estos ensayos consisten en la determinación del contenido de humedad (ASTM D2216-10, n.d.), Gravedad específica de los sólidos (ASTM D854-10, n.d.), Análisis granulométrico por tamizado y por hidrómetro con y sin agente defloculante (ASTM D422-63, n.d.), Límites de consistencia (ASTM D4318-10, n.d.) y Clasificación Miniatura Compactada Tropical (MCT) rápida (Nogami & Villibor, 1995).

3.3. Caracterización mineralógica y estructural

Al momento de caracterizar geotécnicamente un suelo, específicamente un suelo tropical, es de gran importancia conocer la composición mineralógica y microestructural de estos, ya que en gran parte sus características y

comportamiento físico y mecánico/hidráulico dependen de su composición mineralógica y estructura. Los ensayos efectuados para esta caracterización corresponden a la microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos X. El Microscopio Electrónico de Barrido es una de las principales herramientas para la caracterización de materiales, en él es posible obtener imágenes digitales de alta resolución que ayudan en la identificación de diversos rangos micro estructurales de los materiales, así como de análisis topográficos, en este caso la muestra se usa inalterada. La difracción de rayos X, es el método más utilizado para la identificación de los minerales del suelo de grano fino, como las arcillas, que no pueden verse usando equipos ópticos, y para el estudio de la estructura cristalina; permiten determinar los espaciamientos entre los planos atómicos de los minerales y los ángulos a los cuales se dan las difracciones de los rayos-X, parámetros que son conocidos para muchos materiales cristalinos, lo que permite su identificación por comparación. En este caso las muestras fueron analizadas bajo la técnica del polvo.

3.4. Caracterización química

Esta caracterización se realiza con el fin de observar la variación en las propiedades químicas de las muestras, inducidas por el proceso de contaminación al que fueron sometidas, para ello se determinó el pH en agua (NTC 3651), pH en Cloruro de Potasio KCl (NTC 3651), Al, Ca, Mg, K, P y elementos menores (Cu, Fe, Mn, Zn) (NTC – 5151), Capacidad de Intercambio Catiónico Equivalente CICE (NTC-5268. Numeral 4.1. Método: A. Saturación con acetato de amonio. Método cuantificación: Volumétrica.). Los valores de pH en agua y en KCl permiten el cálculo del punto de carga cero ($PZC= 2pH_{KCl} - pH_{H20}$), punto en el cual se equilibran las cargas positivas y negativas del medio (Lavorenti & Alves, 2005); así como la Carga Neta (Carga Neta = pH_{H2O}-PZC) que permite determinar que muestra se encuentra más agregada.

3.5. Caracterización mecánica

Los ensayos realizados en la caracterización mecánica son ejecutados en muestras inalteradas, ya que estos intentan representar el estado de la muestra en el terreno. Estos ensayos entregan parámetros mecánicos del suelo al ser sometidos a solicitaciones externas. Fueron entonces, efectuados ensayos de corte directo tipo Consolidado Drenado CD (natural y saturado) para encontrar los parámetros de resistencia al corte de un suelo (ASTM D3080-11, n.d.), ensayos de compresión simple (ASTM D2166-13, n.d.), ensayos duplo-edométricos en condiciones saturadas y sin saturar que pueden proporcionar otros parámetros del suelo a parte de la consolidación, como son el índice de colapso o expansión de las muestras (ASTM D2435-11, n.d.), determinación de la curva característica de retención de agua por el método del papel filtro con trayectoria mixta, o sea secando y humedeciendo partir de la humedad natural del material (ASTM D5298-10, n.d.), *Pinhole Test* o ensayo de orificio de aguja que se realizó bajo los lineamientos de la norma brasilera NBR 14114/98 de la Asociación Brasilera de Normas Técnicas (ABNT). Los ensayos de caracterización mecánica se realizan bajo un mismo valor de contenido de humedad natural en ambas muestras con el objetivo de eliminar esa variable en las comparaciones.

Cabe resaltar que todos los ensayos de caracterización fueron ejecutados como mínimo tres veces con el objetivo de garantizar la repetitividad, y se ensayaron tanto las muestras en estado natural como contaminado para analizar la influencia del contaminante.

4. Resultados, análisis y discusión

4.1. Caracterización física

A continuación se presentan los resultados de la caracterización física de las muestras, la Tabla 1 resume las principales propiedades físicas analizadas.

Se observó un aumento del 14% en el valor de límite líquido y una disminución de un 37% del índice de plasticidad de la muestra contaminada con respecto a la muestra natural. El aumento del límite líquido en la muestra contaminada puede obedecer principalmente al incremento de partículas de tamaño limo en el suelo y la disminución del índice de plasticidad afecta de manera significativa las propiedades físicas de la muestra contaminada, ya que se disminuye el rango en el que los materiales se comportan plásticamente. Estas variaciones se atribuyen además, al cambio en la naturaleza del líquido al interior de los vacíos de la muestra. La desagregación de las partículas debido a la presencia de lixiviado, tiende a aumentar el área de superficie específica de suelo, lo que lleva a una alta absorción de agua que cambia los valores de los límites (Sunil et al., 2009).

Tabla 1.
Propiedades físicas de las muestras analizadas.

Propiedad física	Muestra natural	Muestra contaminada
Contenido de humedad natural, $\mathbf{w_{nat}}$ [%]	25 – 32	25 – 32
Límite líquido con humedad natural, **LL** [%]	37	43
Límite plástico con humedad natural, **LP** [%]	21	33
Índice de plasticidad, **IP** [%]	16	10
Clasificación fracción fina según **USCS**	CL	ML
Clasificación **MCT**	NS'/NA' (No lateritico Limo arenoso/arena limosa)	NS'-NG' (No lateritico Limo arenoso/arcillas limosa-arenosas)
Peso unitario húmedo γ_h [kN/m^3]	17.88	17.64
Gravedad específica de los sólidos, **Gs**	2.78	2.80
Relación de vacíos, **e**	0.96	1.09

Fuente: Los Autores

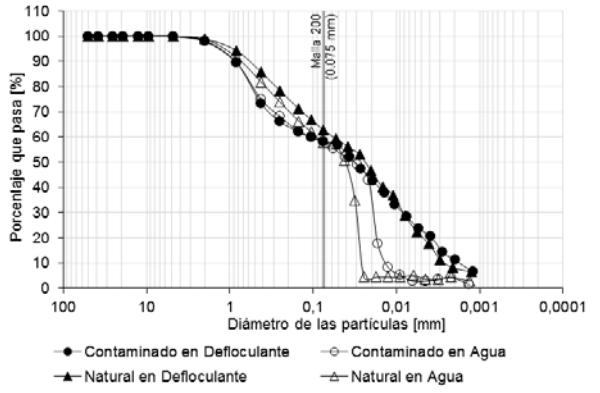


Figura 1. Curvas granulométricas por tamizado e hidrómetro (en agua y en agente defloculante) de las muestras natural y contaminada.
Fuente: Los Autores

Las clasificaciones mediante la metodología MCT mostraron diferencias en la contracción diametral de las muestras (Contracción muestra natural 0.75 y muestra contaminada 1.23). La contracción diametral de la muestra contaminada aumentó un 65 % con respecto a la contracción de la muestra natural. Este cambio se debe al incremento de iones en el suelo debido a los lixiviados del contaminante, lo que genera que haya mayor atracción entre las partículas de arcilla ocasionando agregaciones inestables en la estructura de la muestra contaminada. La contracción en los suelos puede ocasionar en los horizontes superficiales grietas que desencadenen en problemas de estabilidad (Quintero & Valencia, 2012).

La diferencia en el parámetro de contracción diametral se ve reflejado en el cambio del grupo de clasificación de las muestras al pasar de NS'/NA' en estado natural a NS'-NG' en estado contaminado. El cambio en el grupo de clasificación es congruente con los cambios presentados en las granulometrías de las muestras, en las que se evidenció un aumento en las partículas de grano fino en la muestra contaminada.

El aumento en el índice de vacíos fue de un 14 % al pasar de la muestra natural a la muestra contaminada, aumento debido a la agregación que se presenta en el suelo al contaminarse con el lixiviado y que se confirmará en los análisis químicos y estructurales.

Con relación a la gravedad específica de los sólidos, no se observan grandes variaciones ya que como se verá en el análisis de la mineralogía, no se presentan variaciones mineralógicas que se reflejen en cambios del Gs.

En el caso de la granulometría (Fig. 1), las variaciones más representativas se observan al analizar los resultados de los hidrómetros de ambas muestras en agua, donde la muestra contaminada presenta mayor porcentaje de materiales finos que la muestra natural. Esto se debe a que el lixiviado actúa defloculando más la muestra produciendo un efecto desagregador de las partículas, las cuales perderían estabilidad en presencia de agua, que posteriormente mostrará influencia en la resistencia al corte, siendo esta menor en la muestra contaminada. Se puede constatar que la presencia de lixiviados en las muestras aumenta la cantidad de partículas finas de tamaño limo al compararla con una muestra sin contaminar

Tabla 2.
Composición química de las muestras analizadas.

	Natural	Contaminada
Potencial Hidrógeno en agua **pH** (H_2O)	3.65	5.17
Potencial Hidrógeno en Cloruro de potasio **pH** (KCl)	3.46	5.04
Materia Orgánica **M.O.** [%]	0.03	0.4
Capacidad de Intercambio Catiónico Equivalente **CICE**	3.8	0.7
Aluminio **Al** [meq/100 g suelo]	0.07	0.57
Calcio **Ca** [meq/100 g suelo]	0.12	0.74
Magnesio **Mg** [meq/100 g suelo]	0.01	3.56
Potasio **K** [meq/100 g suelo]	0.02	2.58
Sodio **Na** [meq/100 g suelo]	4	8.2
Punto de Carga Cero **PZC**	3.27	4.91
Carga Neta	0.38	0.26

Fuente: Los Autores

(Oztoprak & Pisirici, 2011). Para el caso en que se usa defloculante, al igual que en las muestras analizadas en agua, se presenta un mayor contenido de partículas finas en la muestra contaminada, sin embargo, la proporción no es tan significativa. En conclusión, el lixiviado genera en sí un efecto desagregador que deja de ser relevante con el uso del defloculante.

4.2. Caracterización química

En la Tabla 2 se presenta la caracterización química, donde se observa claramente un aumento en los elementos "bases" (Al, Ca, Mg, K y Na), este aumento pudo estar favorecido por el arrastre de dichos elementos a través del lixiviado, acumulándolos en el perfil de estudio. Es evidente además una disminución en el pH de la muestra contaminada generado por la descomposición de materia orgánica proveniente del lixiviado.

Como los valores del pH en agua están por encima de los valores de PZC (PZC= $2pH_{KCl} - pH_{H20}$), sin pasar por éste al contaminar el material, el suelo no sufre desagregación por efecto del lixiviado. Adicionalmente, al ser el valor de carga neta (Carga Neta= pH_{H2O}-PZC) menor para la muestra contaminada, está se encuentra un poco más agregada que la muestra natural, generando mayor porosidad del material como se constató en los resultados de relación de vacíos.

4.3. Caracterización mineralógica y estructural

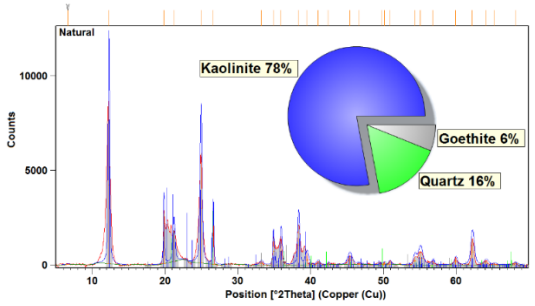


Figura 2. Difractograma de rayos X de la muestra natural.
Fuente: Los Autores

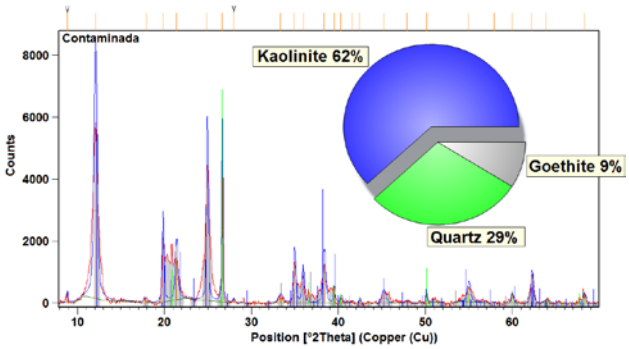


Figura 3. Difractograma de rayos X de la muestra contaminada.
Fuente: Los Autores



Figura 4. Imagen Microscopio Electrónico de Barrido de la muestra Natural, aumento 100x.
Fuente: Los Autores

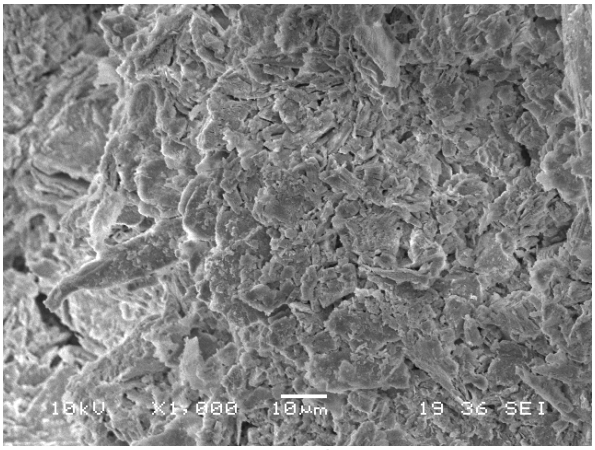


Figura 5. Imagen Microscopio Electrónico de Barrido de la muestra Contaminada, aumento 100x.
Fuente: Los Autores

Como se puede observar en las Figs. 2 y 3, se ve que la mineralogía de ambas muestras está conformada por Caolinita, Cuarzo y un pequeño trazo de goethita.

El ensayo de difracción de Rayos X, muestra que los minerales que componen los suelos analizados son en términos generales los mismos en ambas muestras, sin originarse o desaparecer algún mineral a causa de la lixiviación a la que se someten las muestras, lo que indica que dicho proceso de lixiviación y el lixiviado como tal no ejerce ningún efecto que altere la mineralogía de los materiales. Dentro de la interpretación de los resultados se marcaron los minerales principales detectados en ambas muestras, de existir otros minerales diferentes a los reportados corresponden a trazas muy pequeñas de estos por lo tanto el equipo no es capaz de detectarlos.

Por medio de las imágenes de la microscopía (Figs. 4 y 5) se pueden observar claramente las variaciones estructurales que sufre el suelo al contacto con los lixiviados. Se genera una atracción entre las partículas del material en la muestra contaminada, apareciendo aglomeraciones (que podría estar vinculado a una mayor contracción de la muestra contaminada debido a la deshidratación, tal como se constató en el ensayo MCT), disminuyendo los macro y microporos, pero aumentando los poros intermediarios, como se verá en las curvas características de retención de agua; dicho incremento en los vacíos intermediarios consigue generar un aumento en el índice de vacíos total de la muestra contaminada comparada con la muestra natural.

4.4. Caracterización mecánica

Curva Característica de retención de agua.

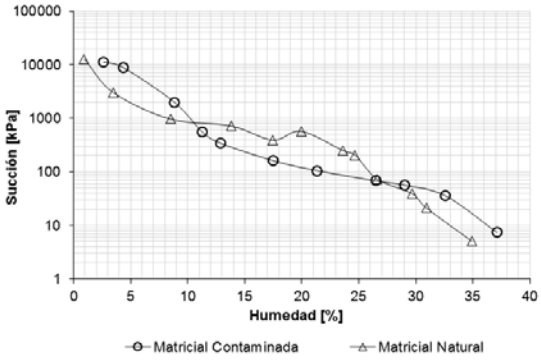


Figura 6. Curvas características de las muestras analizadas (Succión matricial vs humedad).
Fuente: Los Autores

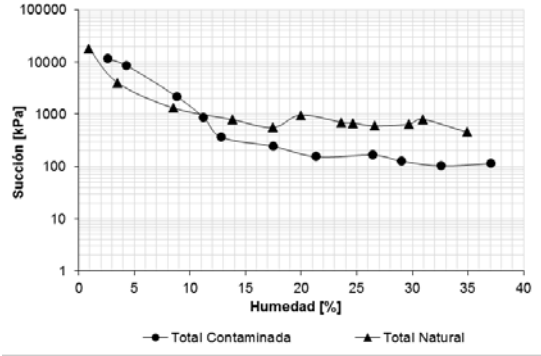


Figura 7. Curvas características de las muestras analizadas (Succión total vs humedad)
Fuente: Los Autores

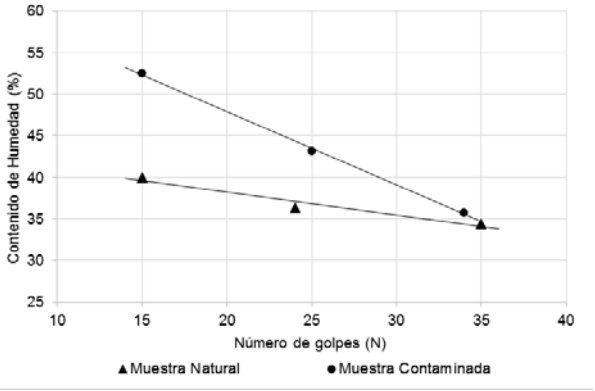


Figura 8. Curva de fluidez de las muestras.
Fuente: Los Autores

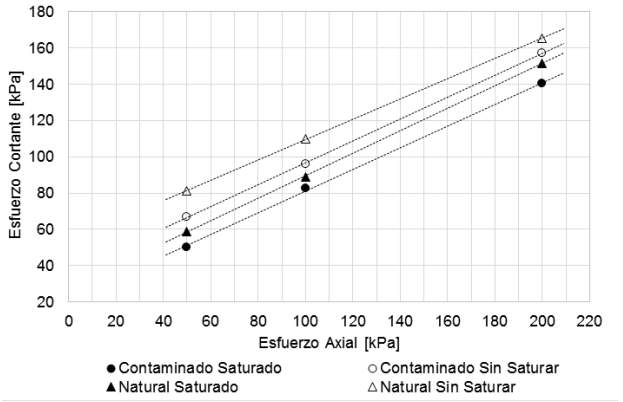


Figura 9. Esfuerzo axial vs esfuerzo cortante de las muestras estudiadas.
Fuente: Los Autores

Se observa una disminución en la succión matricial (Fig. 6) en la zona de los poros de tamaño intermedio en la muestra contaminada, poros comúnmente formados por partículas de tamaño limos. Esta aseveración tiene lógica si se observan los resultados de la granulometría por hidrómetro, donde se obtuvo una mayor defloculación en el rango de los limos en la muestra contaminada. La presencia de lixiviados en la muestra contaminada afecta las partículas de dicho tamaño generando dispersión. La defloculación aumenta los vacíos de la zona de poros de tamaño intermedio, al aumentar dichos vacíos las succiones en esa región son menores en la muestra contaminada.

Para la succión total se observa un comportamiento peculiar en los valores de succión asociados a humedades mayores a 10%, ya que con el aumento en el contenido de sales minerales presentado en la caracterización química, se esperaría una mayor succión en la muestra contaminada debido al incremento en las sales disueltas del líquido percolante, lo cual generaría una menor presión de vapor en el medio entre el papel filtro y la muestra y por ende una mayor succión (Fig. 7). Pero como se observa en la curva de fluidez de los materiales (Fig. 8), el mayor aporte por succión osmótica en el suelo contaminado se tiene para humedades mayores a las obtenidas en el ensayo de succión.

En las zonas de los macroporos y microporos es evidente una mayor succión en la muestra contaminada, lo que se confirma mediante la microscopía electrónica de barrido, dónde se observó un tamaño mayor en los poros de la muestra natural, y macro y micro poros de menor tamaño en la muestra contaminada.

4.5. Resistencia al corte directo

El comportamiento mecánico con relación a la resistencia al corte de las muestras se ve afectado significativamente por la presencia de lixiviados (Fig. 9). Se observa que la muestra contaminada sin saturar presenta una disminución en la resistencia con respecto a la muestra natural sin saturar, lo que nos indica que solo el efecto de los lixiviados tiene gran incidencia en la disminución de resistencia de las muestras; efecto que puede ser constatado con la granulometría (Fig. 1), donde el punto de inflexión de la curva sin defloculante obtenida para el suelo contaminado corresponde a un menor tamaño de grano lo que podría estar apuntando para una instabilidad de los agregados o de los paquetes de arcilla en presencia de agua.

Tabla 3.
Parámetros de resistencia al corte de las muestras analizadas de acuerdo a la modalidad de ensayo realizada (Saturada y sin saturar).

	Cohesión [kPa]	**Fricción [°]**
Natural Sin Saturar	54	29
Natural Saturada	27	32
Contaminada Sin Saturar	36	31
Contaminada Saturada	22	31

Fuente: Los Autores

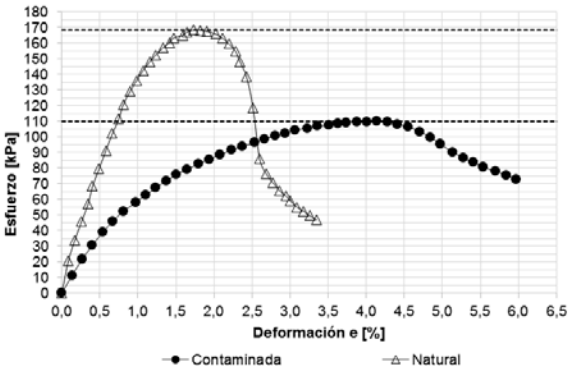


Figura 10. Resistencia a la compresión inconfinada de las muestras.
Fuente: Los Autores

Además se dio una disminución en la resistencia de las muestras debida a la saturación de los materiales y a la presencia de lixiviados en la estructura de los mismos que se ve reflejada en la disminución de la cohesión de la muestra contaminada saturada en comparación con la muestra natural saturada de un 18% (Tabla 3), lo que representa por ejemplo una disminución del 12% del esfuerzo cortante, τ, para un esfuerzo normal σ= 50 kPa.

4.6. Resistencia a la compresión inconfinada

En términos de deformación se observa que la muestra contaminada soporta una mayor deformación antes de la falla

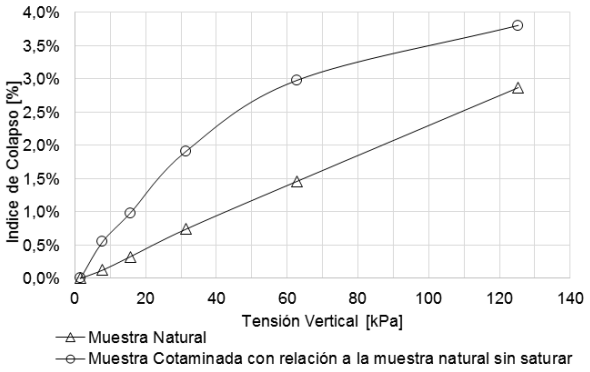


Figura 11. Tensión vs Índice de colapso total.
Fuente: Los Autores

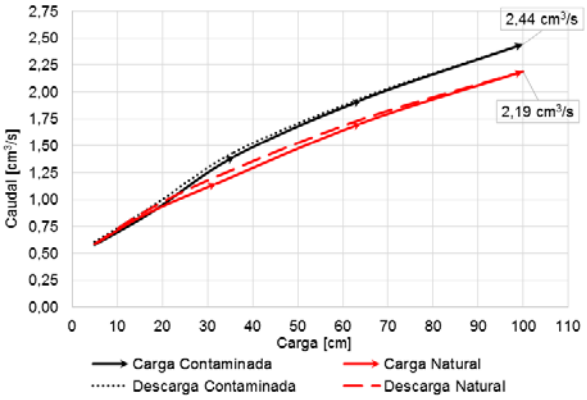


Figura 12. Resultados de los ensayos *pinhole test* de las muestras.
Fuente: Los Autores

y a lo largo del desarrollo del ensayo; sin embargo, a pesar de soportar mayores deformaciones, su resistencia es un 35 % menor que la resistencia correspondiente a la muestra natural, tal disminución se relaciona directamente al proceso de lixiviación al que ha sido sometida la muestra contaminada (Fig. 10).

Las curvas son indicativo de dos estructuras diferentes, apuntando para una mayor floculación en la muestra natural y una mayor dispersión en la contaminada (Camapum De Carvalho, et al., 1987).

4.7. Consolidación unidimensional

Para el ensayo de consolidación, se determinó el índice de colapso total en función de la saturación (Fig. 11), el comportamiento obtenido mostró que el suelo contaminado es más colapsible que el suelo natural. Se presentaron aumentos hasta de 1.5% en el índice de colapso total al pasar de suelo natural a suelo contaminado, lo cual corresponde a un incremento hasta del 50% en dicho valor. La estimación cuantitativa del Índice de colapso (I) se efectuó a partir de las ecuaciones. (1) a (3) según Jennings & Knight (1975):

$$I = \frac{\Delta e_c}{\left[1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}}\right) \times e_{0(medio)}\right]} \quad (1)$$

$$\Delta e_c = \left[\left(\frac{e_{nat}}{e_{0(nat)}}\right) - \left(\frac{e_{sat}}{e_{0(sat)}}\right)\right] \times e_{0(medio)} \quad (2)$$

$$e_{0(medio)} = \frac{\left(e_{o(nat)} + e_{0(sat)}\right)}{2} \quad (3)$$

Donde $e_{0(nat)}$ y $e_{0(sat)}$ son las relaciones de vacíos inicial de la muestra en estado de humedad natural y saturada; y e_{nat} y e_{sat} son las relaciones de vacíos final en estado de humedad natural y saturada.

4.8. Pinhole test

Con relación a los resultados de los ensayos de *pinhole test*, se puede ver que la curva del suelo natural esta levemente por encima de la curva del suelo contaminado, evidenciando un mayor caudal en la muestra contaminada (se presenta un aumento del 10 % del caudal de salida para una carga hidráulica de 100cm) esto se debe a como fue descrito en el ensayo de compresión simple, a que la estructura de la muestra natural es floculada y la de la contaminada es dispersa., lo que representa una mayor erodabilidad en la muestra contaminada por ende una mayor susceptibilidad a procesos erosivos (Fig. 12).

5. Conclusiones

En términos generales, se logró evidenciar cambios importantes en las propiedades físicas, químicas, estructurales y mecánicas de las muestras, producidas por la presencia de lixiviados de residuos sólidos durante un periodo de tiempo prolongado; sin embargo el mayor efecto, se presenta en las propiedades químicas, afectando notoriamente la estructura del material con consecuencias importantes en las propiedades hidro/mecánicas del suelo, tornando el material inestable y vulnerable ante situaciones externas.

A pesar de existir una normativa clara en cuanto al tratamiento que se debe dar a los lixiviados, siguen existiendo sitios tales como botaderos ilegales o incluso rellenos sanitarios municipales que generan un impacto negativo en el ambiente, al incumplir con los requerimientos mínimos de disposición final de residuos sólidos y vertimiento de lixiviados. Se resalta entonces, la necesidad de generar conciencia no solo en las autoridades ambientales sino en la comunidad en general, en lo concerniente a la regulación en la disposición final de residuos sólidos, para que cumplan con todas las normativas de manejo integral de los residuos y sus lixiviados. Lo cual evitará una contaminación del suelo de fundación; previniendo así, futuros problemas geotécnicos de consideración.

Si bien los resultados de esta investigación muestran un efecto en las propiedades geotécnicas del suelo producido por la presencia de lixiviados del relleno sanitario, cabe resaltar que las prácticas de manejo de vertimientos de lixiviados llevadas a cabo por la entidad encargada de la administración del relleno sanitario, cumplen con las normas técnicas y están regidas y controladas por un Plan de gestión del riesgo para el manejo de vertimiento de lixiviados avalado por la Corporación Autónoma Regional CORNARE. Se deberá

tener especial cuidado con el paso accidental de lixiviados desde las cunetas instaladas para dicho fin a las cunetas de aguas lluvias, realizando un aislamiento entre los dos sistemas de cunetas.

Referencias

[1] Dirassouyan, F., Givaudan, J.G., Moulin, P., Poulain, S. and Renou, S., Landfill leachate treatment: Review and opportunity, Journal of Hazardous Materials, 150(3), pp. 468-493, 2008. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.077.

[2] Batchelor, B. and Park, J.Y., A multi-component numerical leach model coupled with a general chemical speciation code, Water Research, 36(1), pp. 156-166. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00207-X.

[3] Administración municipal de El Santuario. Plan básico de ordenamiento territorial para el municipio de El Santuario, Antioquia. Acuerdo N°02 del 2000 del 5 de marzo del 2000. El Santuario, COL. Administración municipal de El Santuario, 2000.

[4] EE.PP. Plan de Manejo Ambiental Relleno Sanitario municipio de El Santuario. El Santuario, COL. Empresas Públicas de El Santuario, 2015.

[5] CORNARE. Plan de ordenación y manejo de las cuencas bodegas y el salto. Orden de Trabajo número 315-2004. El Santuario, COL. Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare, 2006.

[6] MINMINAS. Geología de la Plancha 147 Medellín Oriental. Medellín, COL. Ministerio de Minas y Energía, 2005.

[7] ASTM. Standard test method for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by mass. D2216-10. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2010.

[8] ASTM. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. D854-10. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2010.

[9] ASTM. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. D4318-10. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2010.

[10] Nogami, J.S. e Villibor, D.F., Pavimentação de Baixo Custo com solos lateríticos, Vilibor, Sao Paulo, 1995.

[11] ICONTEC. Calidad del agua. Determinación del pH. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. NTC 3651-94. Bogotá, COL. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012.

[12] Alves, M.E. y Lavorenti, A., Point of zero salt effect: Relationships with clay mineralogy of representative soils of the Sao Paulo State, Pedosphere, 15(5), pp. 545-553, 2005.

[13] ASTM. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. D3080-11. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2011.

[14] ASTM. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. D2166-13. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2013.

[15] ASTM. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using. D2435-11. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2011.

[16] ASTM. Standard test method for the measurement of soil potential (suction) using filter paper. D5298–03. Philadelphia, U.S. American Society for Testing and Materials, 2003.

[17] ABNT. Solo-solos argilosos dispersivos- identificação e classificação por meio do ensaio do furo e agulha (pinhole test). NBR 14114/98. São Paulo, BR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.

[18] Nayak, S., Shrihari, S. and Sunil, B.M., Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil, Engineering Geology, 106(1-2), pp. 20-25, 2009. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.12.011.

[19] Quintero, A. y Valencia, Y., Variación de las propiedades geotécnicas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos en un suelo tropical. XVI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Bogotá D.C., Colombia, Octubre 2012.

[20] Oztoprak, S. and Pisirici, B., Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate, Engineering Geology, 121(3-4), pp. 110-122, 2011. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.05.005.

[21] Ministére de L'équipament. La reconstitution des éprovettes en laboratoire. Rapport de recherche LPC N°145. Toulouse, FR. Ministére de L'équipament, 1987.

[22] Jennings, J.E. and Knight, K. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. 6th Regional Conference for African on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Durban, South Africa, pp. 99-105, 1975.

A. Quintero-Ramírez, graduado de Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia, en el año 2011, con Maestría en Ingeniería – Geotecnia en el 2017 de la Universidad Nacional de Colombia Ha trabajado en consultoría en geotecnia desde 2011. Dentro de las líneas de investigación se incluye los suelos tropicales, los suelos residuales y la contaminación de suelos.
ORCID: 0000-0001-8349-2853

Y. Valencia-González, graduada de Ingeniera Civil de la Universidad Nacional de Colombia en el 2001, con Maestría en Ingeniería – Geotecnia en el 2005 de la Universidad Nacional de Colombia. En el 2009 recibió su título de Doctora en Geotecnia y posteriormente realizó un año de estudios posdoctorales en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesora asociada del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: suelos tropicales, biotecnología, fundaciones y control de vibraciones.
ORCID: 0000-0002-5389-2212

L.A. Lara-Valencia, graduado de Ingeniero Civil de la Universidad Nacional en el 2005, con Maestría en Estructuras y Construcción Civil en el 2007 de la Universidad de Brasilia. En el 2011 recibió su título de Doctor en Estructuras y Construcción Civil en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: Control de vibraciones, dinámica de estructuras y suelos tropicales.
ORCID: 0000-0002-2718-6234



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Maestría en Ingeniería – Estructuras
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Sugarcane bagasse and its potential use for the textile effluent treatment

Juan Carlos Cueva-Orjuela[a], Angelina Hormaza-Anaguano[b] & Andrés Merino-Restrepo[b]

[a] *Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jccuevaor@unal.edu.co,*
[b] *Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia ahormaza@unal.edu.co, ramerinor@unal.edu.co*

Received: December 22th, 2016. Received in revised form: September 26th, 2017. Accepted: October 20 th, 2017

Abstract
In Colombia, sugarcane represents the second product with a large area of cultivation. It is estimated that from sugar mills about 6 million tons of sugarcane bagasse, SCB, are produced, of which 5 million are inefficiently used for burning boilers. SCB is mainly composed of cellulose, hemicellulose and lignin, allowing its use as a potential adsorbent. Particularly, the aim of this work was to evaluate the viability of using SCB for the adsorption of basic red 46, BR46, in aqueous solution. The effect of factors such as point of zero charge, solution pH, particle size, adsorbent dosage, initial dye concentration, contact time and ionic strength was evaluated using a statistical design of experiments. A removal of 86.4 % was obtained and the further optimization of the process through a response surface design, allowed to achieve a maximum adsorption of 95.0 %. These results suggest SCB is a promising alternative of a non-conventional adsorbent that could be applied for treating dyed effluents.

Keywords: Agricultural wastes; basic dyes; adsorption; statistical design of experiments; bromatological analysis.

Bagazo de caña de azúcar y su potencial aprovechamiento para el tratamiento de efluentes textiles

Resumen
En Colombia, la caña de azúcar representa el segundo cultivo con mayor extensión. Se estima que a partir de los ingenios azucareros se producen aproximadamente 6 millones de toneladas de bagazo de caña de azúcar, BCA, de los cuales 5 millones son utilizados ineficientemente para la quema de calderas. El BCA está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, posibilitando su uso como un potencial adsorbente. En particular, en esta investigación se evaluó la viabilidad del BCA para la remoción del rojo básico 46, RB46, en solución acuosa. El efecto de factores tales como el punto de carga cero, pH de la solución, tamaño de partícula, dosificación del adsorbente, concentración inicial del colorante, tiempo de contacto y fuerza iónica fueron evaluados a través de un diseño estadístico. Se obtuvo una remoción del 86.4% y la posterior optimización del proceso, a través un diseño de superficie de respuesta, permitió alcanzar una adsorción máxima del 95.0%. Estos resultados sugieren que el BCA representa una alternativa promisoria de un adsorbente no convencional que puede ser aprovechado para el tratamiento de efluentes coloreados.

Palabras clave: Residuos agrícolas; colorantes básicos; adsorción; diseño estadístico de experimentos; análisis bromatológico.

1. Introduction

Sugarcane, *Saccaharum officinarum*, is a tropical perennial grass with thick and fibrous stems; it grows mainly in tropical regions and is characterized by its high content of sucrose, which is processed to obtain sugar [1]. This crop is one of the most important products in the world with approximately 420 million tons of sugarcane harvested per year [2] and it is widespread in the American continent because of climatic conditions that improve its production [1]. In Colombia, this product ranks second in extension, after coffee, with 249,384 hectares, contributing significantly to the agricultural gross domestic product (GDP). About 61.0% of that harvested area goes to the production of raw cane sugar; 32.0 % to the production of sugar and the remaining 7.0

How to cite: Cueva-Orjuela, J.C., Hormaza-Anaguano, A. and Merino-Restrepo, A., Sugarcane Bagasse and its Potential Use for the Textile Effluent Treatment DYNA, 84(203), pp. 291-297, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

% to sugar-cane liquors, honey and forage [3].

The sugarcane processing in the above mentioned activities generates tons of SCB, which is mainly composed of cellulose, hemicellulose and lignin. It is estimated that about 54 million dry tons of bagasse are annually produced worldwide [4]. According to the Association of Sugarcane Growers of Colombia, Asocaña, the annual production of SCB amounts to 6 million tons in sugar mills; approximately 5 million of them are used as fuel in the boilers thereof [5], but the energy efficiency of this process is lower than the one of other fuels for boilers, closed to 30.0 % [6]. SCB has also been used for xylitol production, however this process generates some toxic compounds, making it more expensive due to further purification methods for this sugar alcohol obtention [7]. These disadvantages suggest the search for an alternative use of this agricultural waste, for instance, as an adsorbent for industrial effluent treatment.

In this regard, polluted effluents from textile industry have become a serious environmental problem due to the presence of highly toxic organic substances such as synthetic dyes. The total annual dye production in the world is around 7×10^5 metric tons, from which 5-10 % are released in the effluents [8,9]. Synthetic dyes are characterized by their low biodegradability as a consequence of their recalcitrant nature, standing for a real threat to the aquatic environment.

Their accumulation in ecosystems leads to several effects such as acute and chronic toxicity for aquatic biota [10]. In addition, there have been reported serious damages to human health due to their mutagenic and carcinogenic characteristics [11].

Among the technologies for treating dye-contaminated water, adsorption has been classified as an inexpensive, efficient, novel and easy methodology to be implemented for removing pollutants [12,13]. Activated carbon is one of the most used adsorbents given its large specific surface area, appropriate pore size distribution, and high surface reactivity. However, this support is relatively costly and its regeneration is a difficult process [14]. The above has led in recent years to explore new low cost and efficient materials with the ability to adsorb dyes, finding that different industrial and agricultural wastes show a high potential to remove this kind of pollutants [13,15]. Particularly, we have explored several agricultural by-products such as rice husk, corn cob, banana peel and flower wastes for the adsorption of different dyes [16-18].

BR46 is a synthetic dye with extensive use in the textile industry, characterized by the presence of the azo group, which is often associated with a cancer-causing activity. Several reports indicate carcinogenic effects are increased by aromatic amines, which are generated after the fragmentation of the azo group [19,20]. Therefore, the removal of BR46 from wastewater represents a relevant research topic. Apparently, there have been no reports to date of BR46 adsorption onto SCB, although this agricultural waste has been extensively used as adsorbent in the removal of these pollutants, including different chemical nature such as acidic, basic, anionic and cationic dyes, highlighting its adsorptive capacity [21-24]. However, most of these studies assessed the chemically modified SCB in order to improve the adsorption efficiency but increasing the process costs [25,26]. In addition to the previously mentioned, only Ong *et al.*, optimized the removal of three cationic dyes onto this agricultural residue through a statistical design [27], the other researches were conducted under a univariate method, therefore there is a lack of information about the interaction between the main factors and their effect in the adsorption process.

The aim of this work was to establish the feasibility of using SCB as an alternative, potential and low-cost adsorbent for the removal of BR46. A full 2^4 factorial and a central composite designs of experiments were performed in order to optimize the process and obtain the correlation between the factors that affect the adsorption efficiency. The selected parameters were point of zero charge (PZC), solution pH, particle size, adsorbent dosage, initial dye concentration, contact time and effect of ionic strength.

2. Materials and methods

2.1. Adsorbent pre-treatment

The agricultural by-product SCB was acquired in a local market of the city of Medellin. The pre-treatment included washing with deionized water and 2.0 % (v/v) hydrogen peroxide to remove organic materials, then drying in an oven at 100 °C for 48 h. After that, the SCB was milled and sieved to obtain a particle size between 0.3-1.0 mm. The adsorbent with these characteristics was stored in airtight containers for subsequent assays.

2.2. SCB Bromatological analysis and its PZC determination

SCB compositional analysis was performed in the Laboratory of Chemical and Bromatological Analysis at the Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. In particular, the percentages of neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), and lignin were determined according to the Van Soest method [28]. Native starch, nitrogen and ash were measured by the polarimetry, Kjeldahl and direct incineration methods, respectively.

Bagasse PZC was determined using the methodology described by Farahani and co-workers [29]. For this, the initial pH of 50.0 mL distilled water solutions were adjusted by adding drops of 0.1 M HCl and 0.1 M NaOH. Then, 0.5 g of SCB were added to each Erlenmeyer flask, containing the solution in the pH range between 2.0 to 11.0. After that, each flask was shaken thoroughly for 48 h at room temperature and the final pH of the solution was measured. PZC of this by-product corresponds to the intersection with diagonal of the curve that represents the final pH in function of the initial pH.

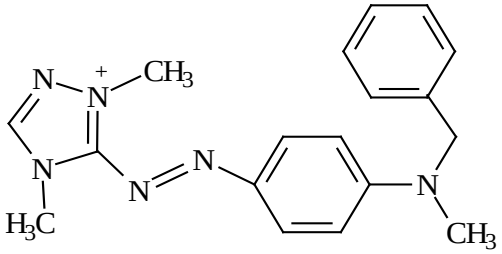


Figure 1. Chemical structure of BR46.
Source: The authors.

Table 1.
Values of the levels in the 2^4 full factorial design.

Factors	C (mgL^{-1})	D (gL^{-1})	T (h)	pH
Low	10.0	1.25	1	5.0
High	40.0	5.00	4	7.0

Source: The authors.

Table 2.
Values of the levels in the response surface design.

Parameter	Low	Medium	High
C (mgL^{-1})	10.0	25.0	40.0
D (gL^{-1})	0.25	3.75	7.25

Source: The authors.

2.3. Preparation of the dye solution

BR46 is a cationic dye that belongs to the azo compounds group, with a molecular weight of 357.5 $gmol^{-1}$, a maximum adsorption wavelength of 532 nm and a Colour Index (CI) 110825. This dye was purchased in the local company Colorquimica S.A. and its structure is shown in Fig. 1. The respective calibration curve was performed with different concentrations in the range of 1.0 to 40.0 mgL^{-1}, using a spectrophotometer UV-Vis Lambda 35, double-beam Perkin Elmer.

2.4. Adsorption of BR46 dye

Some preliminary assays were carried out to establish the influence of the variables pH and particle size in the BR46 removal onto SCB. For solution pH, it was evaluated the range of 2.0 to 11.0, a greater removal between 5.0-7.0 was found. Regarding particle size, the intervals 0.3-0.5 mm, 0.5-0.7 mm and 0.7-1.0 mm were selected, obtaining better adsorption between 0.3-0.7 mm; for this reason, this variable remained constant in the following assays.

These initial tests were performed using a stock solution of 40.0 mg of dye per liter of deionized and distilled water. Subsequently, 40.0 mL volumes were taken, their respective pH values were fixed and then they were mixed with SCB at 200 rpm for 6 h under batch system at room temperature. After that, the percentage of BR46 removal was quantified using Eq. (1). All tests were performed in triplicate for statistical support with a SCB dosage of 3.0 g L^{-1}. In particle size assay, a pH value of 6.0 was selected.

$$\%Removal = \frac{C_o - C_f}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Where C_0 and C_f are the initial and final concentration of the dye, respectively.

2.5. Statistical design of experiments

2.5.1. 2^4 Full factorial design

The selected factors in the design of experiments were adsorbent dosage (D), initial dye concentration (C), contact time (T) and solution pH. A randomized 2^4 full factorial design with three replicates was conducted to reduce the number of required experiments for both optimizing the process and determining the most influential factors of the adsorption and their interactions. The factors with their upper and lower limits are shown in Table 1. The experimental design was performed and analyzed with the software Statgraphics Centurion XV.II free version.

2.5.2. Central composite design (CCD)

The factorial design showed that the most significant factors in the BR46 adsorption were C and D, achieving a removal level of 86.4 %. With the purpose of improving the efficiency of the process, a randomized response surface design with a central point and three replicates was carried out. The factor levels are depicted in Table 2.

2.6. Effect of the ionic strength

The effect of the ionic strength was measured under the best conditions for BR46 adsorption onto SCB obtained through the statistical designs. This effect was analyzed with solutions of sodium and calcium chloride in the range of 0.0 to 0.2 $molL^{-1}$ at room temperature.

3. Results and discussion

3.1. SCB compositional analysis

The bromatological analysis showed 90.2 % NDF, 65.9 % ADF, and 6.8 % lignin, therefore, 59.1 % cellulose and 24.3 % hemicellulose. It is worth mentioning that other authors have obtained 40-50 % cellulose and 20-30 % hemicellulose for this agricultural waste. Concerning the lignin percentage, the obtained value was lower compared to the reported in related studies, around 18-25 % [4,30]. This difference can be explained mainly as a consequence of the geographical location, its respective soil composition and the sugarcane variety.

Due to the low ash content in bagasse, equal to 0.83 %, this waste provides advantages in terms of microbial bioconversion process compared to other agricultural by-products, such as banana peel or rice husk with ash content of 10.0 % and 17.5 %, respectively [31,32]. Regarding native starch and nitrogen content, no values were detected with the used techniques.

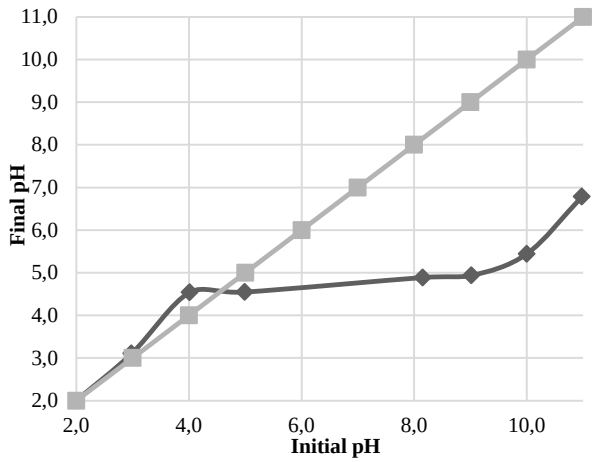


Figure 2. Bagasse PZC.
Source: The authors.

3.2. Bagasse PZC evaluation

The PZC is defined as the pH value in which the total external and internal net charge of the functional groups of the adsorbent material surface is neutral and does not contribute to the solution pH; thus, the number of positive and negative sites is equal [33]. PZC is an important property when studying the ability of a specific adsorbent to retain certain pollutants, in this case, a dye with an ionic charge [34]. Fig. 2 displays the final pH depending on the initial pH, where the PZC corresponds to the point where the curve intersects the diagonal, leading to a value of 4.85.

In this sense, if the solution is below a pH of 4.85, SCB surface becomes positively charged, but if it is above this value, its surface charge will be negative. The second situation would favor the removal of positively charged dyes such as BR46, since a higher ion affinity is achieved between the dye and the SCB surface. In this respect, it is worth mentioning that the obtained value is close to the previous described range, from 5.0 to 6.0, for SCB [33,35], this difference could be associated with the previously described compositional variations of the material surface, in terms of the proportions of its constituent polymers.

3.3. Screening assays of BR46 removal

Preliminary assays showed that pH has a greater effect than particle size in the BR46 adsorption process. The evaluated pH range was 2.0-11.0. The removal of this dye remained around 90.0 % between 5.0 and 7.0. Therefore, this interval was selected for a further analysis in a full factorial design. In addition, it should be noted that this pH range is higher than the PZC of SCB, leading to a negatively charged surface and improving the dye removal.

The selected particle sizes were: 0.3-0.5 and 0.5-0.7 mm and given that a similar removal percentage was obtained with them, a particle size of 0.3-0.7 mm was selected for the factorial design. Particle sizes smaller were not evaluated because when carrying out the process in continuous system, this parameter could hinder the dynamic motion of the fluid, generating a large resistance and an increase in the obstruction [36].

3.4. 2^4 full factorial design analysis

In Fig. 3, the Pareto chart points out that the most important factor in the BR46 removal is the SCB dosage with a positive effect. This fact is explained because of a greater amount of SCB, a greater surface area to adsorb the dye will be available, increasing proportionally the removal. After dosage, the second most important factor is the BR46 initial concentration, but in contrast to the dosage, its effect is negative. Thus, an increase in this factor leads to a reduction in the BR46 adsorption, because the surface would be saturated with dye and there will be no area available for the removal process. On the other hand, contact time and pH were statistically significant in the removal process with a positive effect, however their standardized effects are minor compared to the previously described factors, therefore, they can remain constant in a further optimization process.

In Fig. 4, the estimated response surface at a fixed pH value of 6.0 and a contact of 2.5 h is showed. Dark gray to black areas delimit removal percentages greater than 80.0 %, which corresponds to initial dye concentrations below 15 mgL^{-1}.

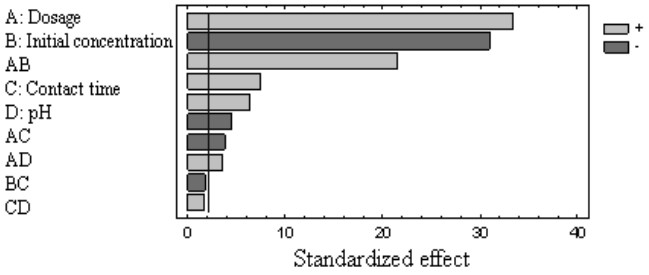


Figure 3. Standardized Pareto chart for the 2^4 full factorial design at $p = 0.05$.
Source: The authors.

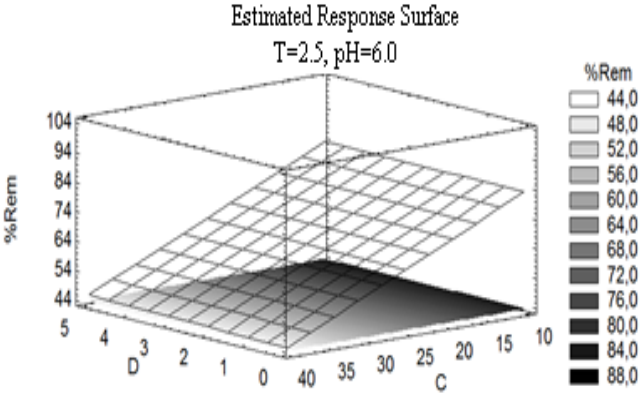


Figure 4. Estimated response surface plot at pH = 6.0 and 2.5 h for BR46 adsorption onto SCB.
Source: The authors.

In the 2^4 full factorial design a mathematical model was obtained, which is described in Eq. (2):

$$\%Rem = 67.5929 + 0.119544 \times A - 1.63006 \times B + 4.10485 \times C + 4.02035 \times D + 0.00616092 \times A \times B - 0.0129298 \times A \times C - 0.0163211 \times A \times D + 0.0502861 \times B \times C + 0.0360705 \times B \times D - 0.376979 \times C \times D \quad (2)$$

This equation allows reaching a maximum BR46 removal of 86.4 % under an initial concentration of 10.0 mgL^{-1}, a dosage of 3.3 gL^{-1}, a contact time of 4.0 h and pH = 6.0. The adjusted correlation coefficient was 98.7 %, value that represents a satisfactory fit of the proposed model.

Even though the obtained results offer a fairly good removal of this pollutant, a CCD was carried out in order to optimize the adsorption process of BR46 from aqueous solution onto SCB.

3.5. Central Composite Design (CCD)

Particularly, the dosage interval was wider ranging from 0.25 to 7.25 gL^{-1} while the interval of BR46 initial concentration was maintained between 10-40 mgL^{-1}. Contact time and pH factors were fixed at 2.0 h and 6.0 units, respectively. Despite the contact time was a significant factor, its low standardized effect makes possible to diminish it for reducing the process length (Fig. 3). For this fact, the contact time was fixed at the minor value selected in the initial factorial design. It is worth mentioning that dosage factor was expressed in mass units since the volume for all assays was kept at 40.0 mL.

Fig. 5 shows that the factors of quantity, A, and its interaction with itself, AA, are those that most affect the percentage of BR46 removal. However, the former effect was positive pointing out that the removal exhibits a growing tendency with the increasing of the available surface area, whereas the latter was negative due to the presence of a concave curvature, which allows determining a maximum removal point for this factor in the experimental space.

The initial dye concentration, B, has a negative effect on the BR46 removal process. Nevertheless, it is smaller than the exhibited by the previous factors. The above is explained because of, unlike the A factor, the B factor interval was not modified due to the negative effect found in the 2^4 full factorial design.

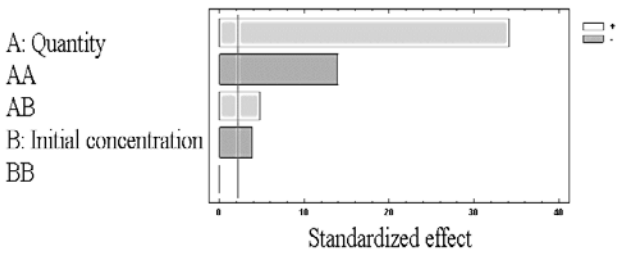


Figure 5. Standardized Pareto chart for the CCD at $p = 0.05$.
Source: The authors.

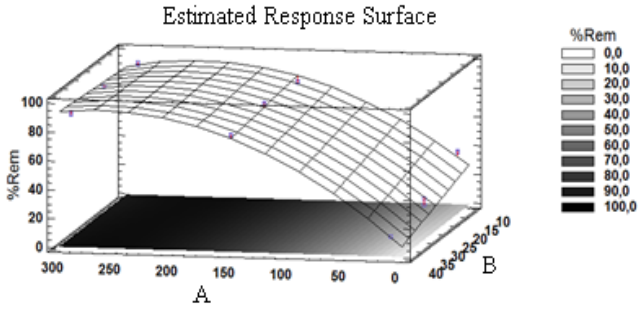


Figure 6. Estimated response surface plot at pH = 6.0 and 2 h for BR46 removal onto SCB.
Source: The authors.

Fig. 6 shows that the surface is concave with a maximum removal percentage of 95.0 % for this azo dye under the following conditions: 40 mg L^{-1} initial concentration and 6.7 g L^{-1} dosage. The adsorption efficiency increased significantly, suggesting that an expansion in the dosage interval was suitable for this central composite response surface model.

Eq. (3) describes a mathematical model, with an adjusted correlation coefficient of 98.8%, for the central composite surface design.

$$\%Rem = 34.1417 + 0.551142 \times A - 0.680429 \times\times B - 0.00124804 \times A^2 + 0.00281607 \times A \times B - 0.000107407 \times B^2 \quad (3)$$

Thus, under the best previously mentioned conditions, in this research it was possible to remove a maximum quantity of 5.7 mg of BR46 per gram of SCB. In this regard, it is important to mention that a similar amount of this dye, 5.8 mg of BR46, was removed with the agricultural waste rice husk, using an adsorbent dosage of 2.75 gL^{-1} in a contact time of 6.5 h [37], suggesting that the SCB offers a similar adsorptive capacity with a more than three times faster kinetic rate than the exhibited by this agricultural by-product of recognized adsorptive properties.

3.6. Effect of ionic strength

Dye-contaminated effluents from the textile industry usually contain several types of salts. Their presence leads to a high ionic strength that can affect the performance of the adsorption process [38-40]. Fig. 7 shows that by increasing NaCl concentration, the BR46 removal percentage was reduced. This behavior can be attributed to the competition between BR46 cations and the positive ions of the monovalent salt (Na^+) for the adsorption active sites. However, it was observed a slight increase of adsorption capacity of this dye at 0.1 M NaCl, which could be interpreted according to the reported by Alberghina *et al.*, who found that the addition of salts to the dye solution promote intermolecular forces, like Van der Waals, ion- dipole and dipole-dipole, that mediate the dimerization process of this compounds [41].

A similar tendency is described by the divalent salt, $CaCl_2$, until a concentration of 0.15 M. After this point,

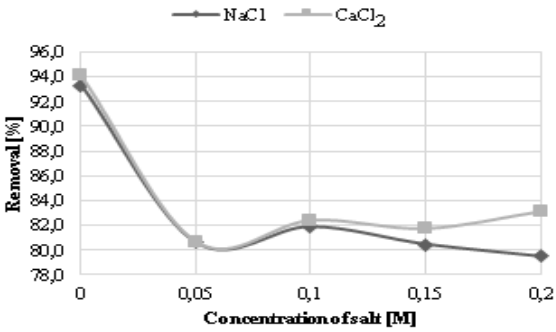


Figure 7. Effect of salt concentration in the removal of BR46 (pH: 6.0, BR46 initial concentration: 40 mgL^{-1}, SCB dosage: 6.7 gL-1, particle size: 0.3-0.7 mm and contact time: 2.0 h).
Source: The authors.

an increase of 1.37 % for the BR46 removal is registered. A high salt concentration leads to a reduction in electrostatic interactions, this phenomena could be associated to the screening effect caused by the high amount of dissolved ions that favors the interactions between the adsorbent surface and the dye molecule [40].

Finally, it is worth noting that a general reduction of dye adsorption using NaCl and $CaCl_2$ was observed by Han and co-workers, who evaluated the ionic strength in the removal of the cationic dye methylene blue onto natural zeolite [39]. Besides, the effect of NaCl addition in the adsorption process of BR46 onto pine tree leaves was evaluated, finding a decrease of the removal percentage [42].

4. Conclusion

The results of the bromatological analysis of SCB are similar to those reported by other authors, with values of 59.1 % cellulose and 24.3 % hemicellulose. In the case of lignin, a percentage of 6.8 % was obtained, that is, three times less than the reported in the literature, probably due to the geographical location where this product is grown and its respective soil composition. On the other hand, its low ash content, less than 1.0 %, suggests its possible application as substrate in cultures of microorganisms. The 2^4 full factorial design permitted to establish that dosage and initial dye concentration were the most significant factors in the BR46 adsorption onto SCB. The subsequent optimization of the process through a central composite design, allowed reaching a maximum dye removal of 95.0 % under 40 mgL^{-1} initial concentration, 6.7 gL^{-1} dosage, 6.0 pH value and 2.0 h contact time. The results suggest that the agro industrial by-product SCB represents a non-conventional adsorbent for an efficient BR46 removal from aqueous solution. This aspect points out a novel approach of SCB in the decontamination processes of dye effluents focused on an environmental improvement.

Acknowledgements

The authors express acknowledgments to the Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Faculty of Science, for the infrastructure of the Laboratory of Experimental Chemistry and to COLCIENCIAS for the financial support through the Project code 111871250685.

References

[1] Ramírez, M.Á., Cultivos para la producción sostenible de biocombustibles: Una alternativa para la generación de empleos e ingresos. Servicio Holandés de Cooperación Al Desarrollo SNV, I pp. 16, 2008.

[2] Jena, S.D. and Poggi, M., Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming. European Journal of Operational Research, 230(2), pp. 374-384, 2013. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.04.011.

[3] Osorio-Cadavid, G., Buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela. Medellín, ISBN 9789253059102, 2007. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.

[4] Moubarik, A. and Grimi, N., Valorization of olive stone and sugar cane bagasse by-products as biosorbents for the removal of cadmium from aqueous solution. Food Research International, 73 pp. 169-175, 2015. DOI: 10.1016/j.foodres.2014.07.050.

[5] Higuera, J.M., Sector azucarero generará 264 MW/hora de energía. Portafolio, 2011.

[6] Aguilar, D., Producción de etanol a partir de bagazo de caña panelera mediante un sistema híbrido de fermentación y pervaporación. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, 2011.

[7] Solenzal, A., Ortiz, Y., Viñals, M., Maganelly, E. and Acosta, E., Purificación de hidrolizado de bagazo de caña de azúcar con carbón activado y resinas de intercambio iónico. Ciencia y Tecnología Alimentaria, 5(2), pp. 124-128, 2006. DOI: 10.1080/11358120609487682.

[8] Zolinger. H., Colour chemistry-Synthesis, Properties of organic dyes and pigments. VCH Publishers, New York, 1987.

[9] Toh, Y.C., Yen, J.J.L., Obbard, J.P. and Ting, Y.P., Decolourisation of azo dyes by white-rot fungi (WRF) isolated in Singapore. Enzyme and Microbial Technology, 33(5), pp. 569-575, 2003. DOI: 10.1016/S0141-0229(03)00177-7.

[10] Walsh, G.E., Bahner, L.H. and Horning, W.B., Toxicity of textile mill effluents to freshwater and estuarine algae, crustaceans and fishes. Environmental Pollution. Series A, Ecological and Biological, 21(3), pp. 169-179, 1980. DOI: 10.1016/0143-1471(80)90161-0.

[11] Alves-de Lima, R.O., Bazo, A.P., Salvadori, D.M.F., Rech, C.M., Palma-Oliveira, D. de, and Aragão-Umbuzeiro, G. de., Mutagenic and carcinogenic potential of a textile azo dye processing plant effluent that impacts a drinking water source. Mutation Research Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 626(1-2), pp. 53-60, 2007. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2006.08.002.

[12] Volesky, B., Sorption and biosorption. BV Sorbex, ISBN 9780973298307, 2003. DOI: 0973298308.

[13] Bhatnagar, A. and Sillanpää, M., Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment-A review. Chemical Engineering Journal, 157 (2-3), pp. 277-296, 2010. DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.007.

[14] Bhatnagar, A. and Minocha, A.K., Assessment of the biosorption characteristics of lychee (Litchi chinensis) peel waste for the removal of Acid Blue 25 dye from water. Environmental Technology, 31(1), pp. 97-105, 2010. DOI: 10.1080/09593330903370000.

[15] Crini, G., Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. Bioresource Technology, 97(9), pp. 1061-1085, 2006. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.001.

[16] Rojas, J. y Hormaza, A., Evaluación de la biodegradación del colorante azul brillante utilizando hongos de la podredumbre blanca y sus consorcios. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 19(1), pp. 179-187, 2016.

[17] Jaramillo, A., Jiménez, S., Merino, A. y Hormaza, A., Obtención de un inóculo fúngico para la degradación de un colorante azo por fermentación en estado sólido. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 17(2), pp. 577-586, 2014.

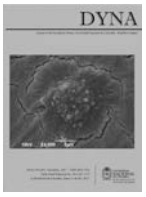
[18] Villada, Y., Hormaza, A. and Casis, N., Uso de la cascarilla de arroz para la remoción de azul de metileno en columnas de lecho empacado. Tecno Lógicas, 17(33), pp. 43-54, 2014.
[19] Brown, M.A. and Vito, S.C., De Predicting azo dye toxicity. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 23(3), pp. 249-324, 1993. DOI: 10.1080/10643389309388453.
[20] Nigam, P., Banat, I.M., Singh, D. and Marchant, R., Microbial process for the decolorization of textile effluent containing azo, diazo and reactive dyes. Process Biochemistry, 31(5), pp. 435-442, 1996. DOI: 10.1016/0032-9592(95)00085-2.
[21] Khoo, E.C., Ong, S.T. and Ha, S.T., Removal of basic dyes from aqueous environment in single and binary systems by sugarcane bagasse in a fixed-bed column. Desalination and Water Treatment, 37(1–3), pp. 215-222, 2012. DOI:10.5004/dwt.2012.2219.
[22] Zhang, Z., O'Hara, I.M., Kent, G.A. and Doherty, W.O.S., Comparative study on adsorption of two cationic dyes by milled sugarcane bagasse. Industrial Crops and Products, 42(1), pp. 41-49, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.05.008.
[23] Zhang, Z., Moghaddam, L., O'Hara, I.M. and Doherty, W.O.S., Congo Red adsorption by ball-milled sugarcane bagasse. Chemical Engineering Journal, 178 pp. 122-128, 2011. DOI: 10.1016/j.cej.2011.10.024.
[24] Kanawade, S.M., Low cost Sugarcane Bagasse Ash as an Adsorbent for dye removal from dye effluent. International Journal of Chemical Engineering and Applications, 1(4), pp. 309-318, 2010. DOI: 10.7763/IJCEA.2011.V2.103.
[25] Yu, J.X., Zhu, J., Feng, L.Y. and Chi, R.A., Simultaneous removal of cationic and anionic dyes by the mixed sorbent of magnetic and non-magnetic modified sugarcane bagasse. Journal of Colloid and Interface Science, 451 pp. 153-160, 2015. DOI: 10.1016/j.jcis.2015.04.009.
[26] Ferreira, B.C.S., Teodoro, F.S., Mageste, A.B., Gil, L.F., Freitas, R.P. de, and Gurgel, L.V.A., Application of a new carboxylate-functionalized sugarcane bagasse for adsorptive removal of crystal violet from aqueous solution: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. Industrial Crops and Products, 65(1), pp. 521-534, 2015. DOI: 10.1016/j.indcrop.2014.10.020.
[27] Ong, S.-T., Khoo, E.-C., Keng, P.-S., Hii, S.-L., Lee, S.-L., Hung, Y.-T. and Ha, S.-T., Plackett–Burman design and response surface methodological approach to optimize basic dyes removal using sugarcane bagasse. Desalination and Water Treatment, 25(1–3), pp. 310-318, 2011. DOI: 10.5004/dwt.2011.1974.
[28] Van Soest, P.J., and Wine, R.H., Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. Journal of the Association of Official Analytical Chemists, 50(1), pp. 50-55, 1967.
[29] Farahani, M., Abdullah, S.R.S., Hosseini, S., Shojaeipour, S. and Kashisaz, M., Adsorption-based cationic dyes using the carbon active sugarcane bagasse. Procedia Environmental Sciences, 10 (PART A), pp. 203-208, 2011. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.035.
[30] Andrade, M.F. and Colodette, J.L., Dissolving pulp production from sugar cane bagasse. Industrial Crops and Products, 52 pp. 58-64, 2014. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.09.041.
[31] Pandey, A., Soccol, C.R., Nigam, P. and Soccol, V.T., Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: Sugarcane bagasse. Bioresource Technology, 74(1), pp. 69-80, 2000. DOI: 10.1016/S0960-8524(99)00142-X.
[32] Zuleta-Correa, A., Evaluación del proceso de degradación de un colorante sintético tipo azo mediante un sistema de fermentación en estado sólido. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, 2013.
[33] Franks, G.V. and Meagher, L., The isoelectric points of sapphire crystals and alpha-alumina powder. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 214(1–3), pp. 99-110, 2003. DOI: 10.1016/S0927-7757(02)00366-7.
[34] Vázquez-González, A., Fernández-Bogo, S., Delgado-Martín, J., Falcón-Suárez, I., Barrientos-Rodríguez, V., Juncosa-Rivera, R., Missana, T., Alonso-de los Ríos, U. and Martin, P.L., Determinación del punto isoeléctrico de residuos de grano fino y su potencial uso en la neutralización de aguas ácidas. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, 9, pp. 255-256, 2008.
[35] Alomá, I., Martín-Lara, M.A., Rodríguez, I.L., Blázquez, G. and Calero, M., Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions by biosorption on sugarcane bagasse. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 43(2), pp. 275-281, 2012. DOI: 10.1016/j.jtice.2011.10.011.
[36] Trivizadakis, M.E., Giakoumakis, D. and Karabelas, A.J., A study of particle shape and size effects on hydrodynamic parameters of trickle beds. Chemical Engineering Science, 61(17), pp. 5534-5543, 2006. DOI: 10.1016/j.ces.2006.03.025.
[37] Álvarez-Herazo, M., Alemán-Romero, A. and Hormaza-Anaguano, A., Remoción de rojo básico de un efluente textil simulado: un caso de aplicación de la cascarilla de arroz. Producción + Limpia, 6(1), pp. 66-75, 2011.
[38] Benaïssa, H., Influence of ionic strength on methylene blue removal by sorption from synthetic aqueous solution using almond peel as a sorbent material: Experimental and modelling studies. Journal of Taibah University for Science, 4, pp. 31-38, 2010. DOI: 10.1016/S1658-3655(12)60024-7.
[39] Han, R., Zhang, J., Han, P., Wang, Y., Zhao, Z. and Tang, M., Study of equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters about methylene blue adsorption onto natural zeolite. Chemical Engineering Journal, 145(3), pp. 496-504, 2009. DOI: 10.1016/j.cej.2008.05.003.
[40] Malekbala, M.R., Khan, M.A., Hosseini, S., Abdullah, L.C. and Choong, T.S.Y., Adsorption/desorption of cationic dye on surfactant modified mesoporous carbon coated monolith: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 21 pp. 369-377, 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.02.047.
[41] Alberghina, G., Bianchini, R., Fichera, M. and Fisichella, S., Dimerization of Cibacron Blue F3GA and other dyes: Influence of salts and temperature. Dyes and Pigments, 46(3), pp. 129-137, 2000. DOI: 10.1016/S0143-7208(00)00045-0.
[42] Mahmoodi, N.M., Hayati, B., Arami, M. and Lan, C., Adsorption of textile dyes on Pine Cone from colored wastewater: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. Desalination, 268(1-3), pp. 117-125, 2011. DOI: 10.1016/j.desal.2010.10.007.

J. Cueva-Orjuela, completed his BSc. Eng in Biological Engineering at Universidad Nacional de Colombia, Medellín Campus in 2015. He is an Environment and Development master student and was a member of the "Synthesis, Reactivity and Transformation of Organic Compounds" research group. His researching experience in the environmental field, specifically in the treatment of dye-polluted effluents, has improved thanks to his participation in Master's projects and his expertise in high-tech equipment. He has attended several worldwide congresses.
ORCID: 0000-0002-6409-7599

A. Hormaza-Anaguano,, completed her BSc. degree in Chemistry at Universidad de Nariño, Colombia in 1994; her MSc. degree in Chemical Science at Universidad del Valle, Cali, Colombia in 1997; and her PhD degree in Natural Sciences at the Johannes Gutenberg-University Mainz, Germany, in 2003. She began working at Universidad Nacional de Colombia Medellín Campus in 1997 as an assistant professor and she is currently a full-time associate professor in the School of Chemistry, Science Faculty, Universidad Nacional de Colombia, Medellín Campus. Since 2003 she has been the director of the Research Group "Synthesis, Reactivity and Transformation of Organic Compounds", SIRYTCOR, whose research lines are focused on the treatment of industrial effluents, exploration and evaluation of alternative adsorbents, adsorption and desorption, and biological processes by solid state fermentation.
ORCID: 0000-0001-5825-3885

A. Merino-Restrepo, completed his BSc. Eng in Biological Engineering at Universidad Nacional de Colombia, Medellín Campus in 2016. He is MSc. Biotechnology student and a member of the Research Group "Synthesis, Reactivity and Transformation of Organic Compounds" (SIRYTCOR). His research experience in the environmental topic, specifically in the treatment of dye-polluted effluents and biological degradation processes through Solid State Fermentation, has strengthened due to his important participation in Master's projects and his expertise in high-end equipment. He has taken part in several research projects.
ORCID: 0000-0001-6818-3251

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Influence of thermal residual stresses on the free vibration of reinforced laminates

Martha L. Sánchez [a], Gil Capote [b] & Julián Carrillo [a]

[a] *Programa de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. martha.sanchez@unimilitar.edu.co, wilmer.carrillo@unimilitar.edu.co*
[b] *Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. gcapoter@unal.edu.co*

Received: July 30th, de 2017. Received in revised form: October 10th, 2017. Accepted: October 30th, 2017

Abstract
The use of laminated composite materials has increased in modern engineering, mainly in those projects that require an assurance of good strength and durability. It has been found that some properties of the material that ensure proper performance can be affected by the occurrence of residual stresses caused by the manufacturing process. In this paper, the influence of thermal residual stresses on the free vibration of reinforced plates is analyzed. For the experimental study, a square, reinforced, prepreg laminate was used. The laminate was reinforced using two different types of reinforcement: lateral and perimetral. The plates were prepared using two different techniques. The first group of laminates was prepared by curing the reinforcement at 177 °C. The second group of laminates was prepared by secondary bonding of the reinforcement to the laminate at room temperature (22 °C). A numerical model was elaborated for comparison with the experimental results. Accuracy was observed when comparing experimental and numerical results, showing that the presence of residual thermal stress affects the value of the natural frequencies of free vibration and the characteristic modal form of reinforced plates. Regardless of the type of reinforcement used, a notable increase in these values was observed, even when the element was simply supported.

Keywords: Laminates; thermal stresses; free vibration; frequency; cure temperature.

Influencia de las tensiones térmicas residuales en la vibración libre de laminados reforzados

Resumen
El uso de compuestos laminados se ha incrementado en la ingeniería moderna, fundamentalmente en proyectos en los cuales se requiere garantizar una adecuada resistencia y durabilidad. Se ha comprobado que algunas de las propiedades del material pueden ser afectadas por la aparición de tensiones residuales durante el proceso de manufactura. En este artículo, la influencia de las tensiones térmicas residuales en la vibración libre de compuestos laminados es analizada. Para el estudio experimental se empleó un laminado cuadrado de tipo pre-impregnado. El laminado fue reforzado usando dos tipos de refuerzos: laterales y perimetrales. Las placas fueron elaboradas usando dos diferentes técnicas: el primer tipo de laminados fue elaborado curando tanto la placa como los refuerzos a 177 °C de manera simultánea y posteriormente enfriados a la temperatura de servicio, mientras que para el segundo tipo de placas tanto las láminas como los refuerzos fueron preparados de forma independiente y pegados a temperatura de operación (22 °C). Un modelo numérico fue elaborado para comparar estos resultados con los resultados experimentales. Una buena precisión fue observada al comparar resultados numéricos y experimentales, mostrando que la presencia de tensiones térmicas residuales afecta el valor de las frecuencias naturales de vibración libre y la forma modal característica. Independientemente del tipo de refuerzo empleado, un notable incremento en estos valores fue observado, cuando el elemento se encuentra simplemente apoyado.

Palabras clave: Laminados; tensiones térmicas; vibración libre; frecuencia; temperatura de cura.

1. Introduction

Structural elements made from laminated composite materials are widely used in modern industry, mainly in applications related to mechanical, civil, and aerospace engineering. However, in spite of the many advantages (high

How to cite: Sánchez, M.L., Capote, G. and Carrillo, J., Influence of thermal residual stresses on the free vibration of reinforced laminates DYNA, 84(203), pp. 298-305, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.
Revista DYNA, 84(203), pp. 298-305, December, 2017, ISSN 0012-7353
DOI: http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n203.66672

mechanical strength, low weight, etc.) of the material, it is necessary to consider that factors such as the thickness of the structural element can affect the mechanical performance, mainly in the case of laminated plates, in which the small thickness is a factor that can lead to the appearance of large amplitude oscillations in the element.

According to Naghsh and Azhari, the study of the phenomenon of free vibration that may occur in this type of structure plays an important role in structural design, because it can generate a significant increase in the strains, causing further membrane stresses, which alter the conditions of stiffness of the plate, and also can cause changes in the values of natural frequency and their characteristic modes of free vibration [1]. Due to the complexity involved in the study of the phenomenon of vibration in composite laminates and the importance of its effects on adequate structural design, this issue has aroused the interest of many researchers over the last few years.

Recently, several investigations have focused on the theoretical analysis of the problem of the free vibration of composite materials. Belytschko et al. presented a review of the theory that allowed the numerical modeling of this type of material using finite elements [2]. Quoc et al. proposed a numerical method to efficiently evaluate problems of vibration in laminated plates [3], while Ganapathi et al. presented results that analytically evaluated the free vibrations of simply supported panels [4].

Research conducted in recent years has shown that factors such as the temperature and the moisture content can play a fundamental role in the free vibration of composite laminates. Naidu and Sinha developed a formulation of finite elements that allows checking the hydrothermal effects on the determination of the frequencies of free vibrations in panels of different shape, curvature, and thickness, showing that the influence of environmental conditions on the performance of composite materials depends on the humidity levels, the temperatures acting on the material, and the geometric characteristics of the structural element [5].

Natarajan et al. presented results that report the influence of the content of humidity and the temperature gradient on the performance of composite plates. This research, carried out via the finite element method, presents results that prove that with the increase of uniform conditions of temperature and humidity, the variations in the natural frequency of free vibration do not behave linearly and can generate instability in the structural element, depending on the values of the temperature and humidity and the relationship between the width and the thickness of the plate [6].

Over the years, several studies have reported that the appearance of residual stresses associated with the curing process of composite materials may affect the mechanical performance of composites [7–10]. According to Hosseini-Toudeshky and Mohammadi, it is important to note that these stresses are the result of the inhomogeneity of the material and its anisotropic behavior, which is evident from the differences that exist in Young's modulus values and the thermal expansion coefficient of the constituent materials of the composite [11]. The residual stresses remain in the material for its lifetime and can generate adverse effects such as loss of dimensional stability, delamination, and other types of premature failure, which may place the structural integrity of an element at risk [12–15].

Almeida and Hansen introduced the idea of using the stresses that arise during the manufacturing process of composites to improve the mechanical performance of reinforced laminates and demonstrated numerically that residual thermal stresses can be used to increase the natural frequency of free vibration of reinforced plates [16]. Sanchez and Almeida reported experimental results that constitute a first approach to the mechanical characterization of laminates reinforced with different types of reinforcements, providing experimental values of the frequency of free vibration for plates with reinforcements of different types [17]. These theoretical and experimental studies served as motivation for the present study, which evaluates the effect of thermal residual stresses on the free vibration of plates with different types of reinforcements in experimental and numerical form.

For the development of this research, plates with two types of reinforcement, lateral and perimetral, were analyzed. According to the classical laminate theory [18], and taking into account that all plies that conform a laminate have an associated orientation angle, one method of presenting the sequence of the plies in symmetrical laminates is to define the laminas from the outside to the inside of the laminate, indicating with a number the angle formed by the fibers with the reference direction and, by means of a subscript, the number of consecutive laminas having this orientation. Due to the symmetry of the laminate, only the sequence of plies on one side will be expressed, and the subscript S is used to indicate that the laminate is symmetrical. A parenthesis is used to delimit the orientation of the fabric, while the use of a bracket indicates the orientation of the laminate from the outermost layer to the median plane.

The plates were prepared via the method of pre-impregnation described by Besednjak, using a fabric base consisting of four laminas oriented $[(0.90)]_S$, on which the reinforcements were placed [19]. To induce the residual thermal stresses, two study groups were created, by varying the technique used in the process of the bonding and curing of the reinforcements. For each of the study groups, the fundamental natural frequency of free vibration and the characteristic modal forms were determined.

2. Experimental procedures

For the experimental work, a square laminate of 350 mm in width, symmetrical, of carbon/epoxy of low stiffness, and with a high coefficient of thermal expansion was used. The laminated plates were developed using a base prepreg fabric with orientation [0/90]s, on which reinforcements 35 mm wide were placed, located in different positions: lateral and perimetral (see Fig. 1). The lay-up sequences used in the laminates are shown in Table 1.

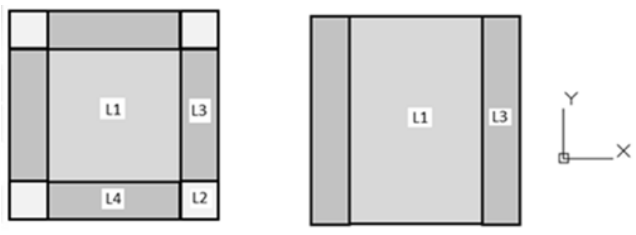


Figure 1. Geometry of the laminated plates.
Source: The authors.

Table 1.
Lay-up sequences used in the composites plates (CF is the base fabric, CT is the reinforcement and S represents the symmetry of the laminate).

Laminate	Lay-up sequence
L1	$[(0,90)^{CF}]_S$
L2	$[(0/90)_2{}^{CT}/(0,90)^{CF}]_S$
L3	$[90_4{}^{CT}/(0,90)^{CF}]]_S$
L4	$[0_4{}^{CT}/(0,90)_2{}^{CF}]_S$

Source: The authors.

Table 2.
Nomenclatures for identification of the studied plates.

Reinforcement	First series of plates	Second series of plates
Longitudinal	LB	LC
Perimetral	PB	PC

Source: The authors.

Table 3.
Properties of constituent materials.

Properties	Carbon epoxy prepreg (CF)	Tape (CT)
Longitudinal modulus of elasticity E_1, MPa	130100	66600
Transversal modulus of elasticity E_2, MPa	9400	66600
Poisson's ratio υ_{12}	0.30	0.05
In plane shear modulus G_{12}, MPa	5800	4600
Transversal shear modulus G_{13}, MPa	5800	4600
Transversal shear modulus G_{23}, MPa	3360	3360
Longitudinal thermal expansion coefficient α_1, $^0C^{-1}$	$-0.9x10^{-6}$	$1.79x10^{-6}$
Transversal l thermal expansion coefficient α_2, $^0C^{-1}$	$27x10^{-6}$	$1.79x10^{-6}$
Ply thickness t, mm	0.17	0.35
Density ρ, g/cm^3	1.56	1.56

Source: The authors.

Two series of laminates were studied, in which the curing conditions of the reinforcements were varied. In the first series, the laminates and their reinforcements were made independently and glued at room temperature, producing laminates reinforced without thermal residual stresses. For the second series, the laminates and the reinforcements were processed simultaneously at a high temperature and were subsequently cooled to the operating temperature, thus inducing thermal residual stresses in the material. According to Besednjak, laminates that are processed at temperatures close to 180°C are characterized by their excellent physical and mechanical properties and are widely used in the aerospace industry [19]. For this reason, it was decided to perform the processing at a temperature of 177 °C. The nomenclature used to identify the two groups of plates analyzed in the present paper is shown in Table 2.

For the elaboration of the laminate, the pre-impregnation (prepreg) technique was used. The cure process consisted of submitting a material to a cycle in an autoclave at two levels of temperatures, selected according to the suggestion of the provider of the constituent materials. The entire process of preparation of the laminate was carried out by an aeronautical company that has extensive experience in the processing of such materials. The post-curing process was not performed, in accordance with the manufacturer's recommendations. To reduce uncertainties and normalize the effects of the processing that was carried out, all the plates were prepared simultaneously and under the same conditions inside the autoclave. The curing temperature was 177 °C, which is recommended by the manufacturer for high-temperature pre-impregnated laminates. The prepreg used in the preparation of the plates was provided by the supplier Hexcel Composites and corresponds to the name T7G190-12"-F584-21: 34%. The properties of the constituent materials necessary for the development of this experiment were taken from the catalogues of the company that provided the material, and are shown in Table 3.

This experimental study allowed characterizing the dynamic behavior of the plates in terms of the determination of the natural frequencies of free vibration in order to evaluate the effect of thermal residual stresses. The tests were conducted by exciting the plates by impulsive force and measuring their response. To achieve excitation, an impact hammer model PCB 086C03 of mass 0.16 kg, 21.6 cm in length, ±2224 N measuring range pk, and resonance frequency ≥22 kHz was used. A load cell was attached to the end of the hammer to register the applied impact. To measure the response of the plate, accelerometers were placed on the plate surface. The signal captured by the accelerometers was sent to a dynamic signal conditioner model PCB 480E09, which amplified the signal and sent it to the analyzer model HP 35665 A. The analyzer received and processed signals and determined the natural frequencies of free vibration using an internal algorithm based on the use of fast Fourier transform (FFT).

The modal analysis test was divided into four stages:

Stage 1: Placement of the accelerometer at the point of excitation.

Stage 2: Excitation of the structure with a hammer. The generated signals were amplified by a dynamic signal amplifier.

Stage 3: Amplified signals were taken to the signal analyzer. This calculates the Fourier spectrum and determines the response function.

Stage 4: The excitation was repeated the predetermined number of times. The analyzer averages the value of the functions obtained in each test. In this study, 50 hammer impacts were established for each test.

In order to carry out the test, the plate was simply supported at its vertices (see Figs. 2, 3). The location of the accelerometer, as well as the point of excitation of the plate, were carefully selected so that the points did not match up with nodal plate lines, since this could impede the capture of the vibration. It should be noted that if the accelerometer or the excitement of the plate is on a nodal line, it will not be excited and therefore will not be detected during the test. For that reason, for the location of the accelerometer, the coordinates (284; 70) mm were selected for the point of impact the coordinates (70; 284) mm, taking as the origin of the reference system (x, y) the lower left edge of the studied plates. For greater accuracy in capturing free vibration modes and a decreased noise number, twelve consecutive repetitions per test were done, and the average frequency was determined. Fig. 3 shows the experimental setup of the assembly.

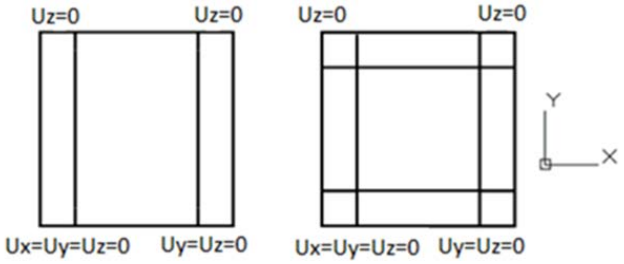
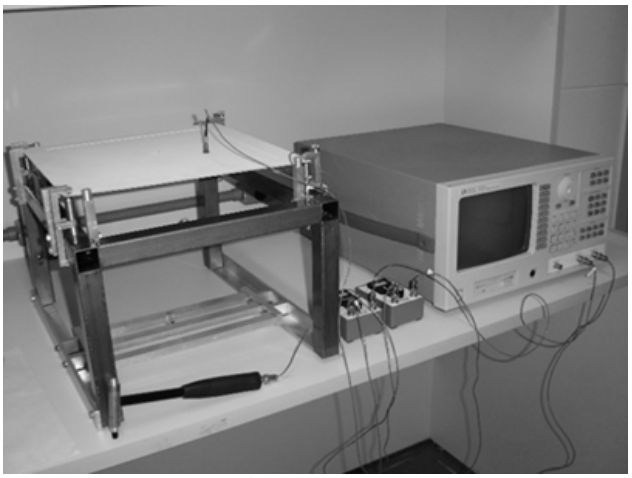


Figure 2. Boundary conditions. Displacements in relation to the reference system are represented by the letter U.
Source: The authors.


Figure 3. Experimental setup for determining the free vibration frequencies.
Source: The authors.

A model of numerical approximation was applied to compare the results with those obtained experimentally. The model assumes that the properties of the material are constant and that the plate is simply supported at its four vertices. ABAQUS® was used to obtain the values that allowed determining the natural frequency and its corresponding modal forms [19]. To consider the effect of the generated thermal residual stresses, a preliminary step, in which a uniform temperature field was applied to the plate without restrictions on its supports, was employed. This pre-charge condition, in addition to the geometric nonlinearity of the analyzed plates, was considered in a second stage of calculation, in which the magnitude of the eigenvalues and their characteristic modal forms were determined.

An element of type S8R was selected for the finite element mesh. This element is a shell element of a standard type, quadratic with 6 degrees of freedom for each node. The selection of the mesh was based on a convergence test. From the solution obtained for the first natural frequency of free vibration, different structured meshes were compared, changing only the number of elements. Based on the test of convergence and the processing time, a 16000-element mesh was selected.

3. Results and discussions

The amplitude as a function of the frequencies of the free vibration, obtained with the dynamic signal analyzer for the

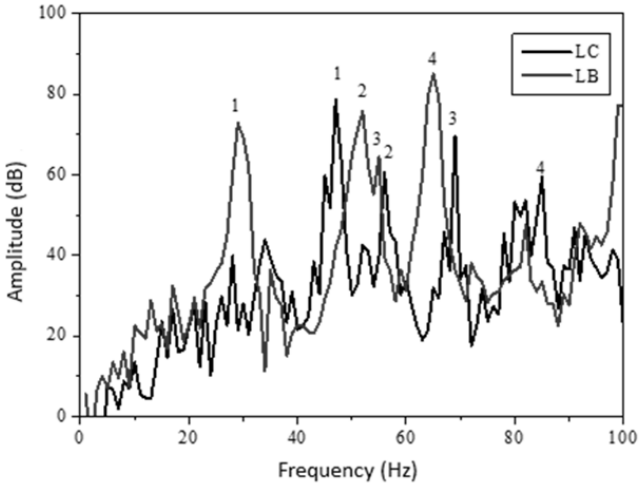


Figure 4. Frequency responses obtained experimentally for lateral reinforcement plates.
Source: The authors.

studied plates, is shown in Figs. 4 and 5. In these figures, the values that characterize the behavior of the reinforcement plates for the two-study series are shown in Table 2. Frequency peaks that characterize the first four modes of free vibration are listed for each plate (see the numbers in the figures).

From the experimental results shown in Figs. 4 and 5, it can be seen that the induction of thermal residual stresses in the plates generated an increase in the values of the first natural frequency of free vibration, regardless of the type of reinforcement used, resulting in an increase of approximately 40% for plates with perimetral reinforcement and about 50% for plates with lateral reinforcements. On analyzing the response spectra, similar results for natural frequencies associated with modes 2, 3, and 4 of free vibration were observed. However, the rate at which this increase in the value of certain frequencies occurs decreases for modes 3 and 4, which verifies that the increase in the stiffness of the plates in the presence of residual thermal stresses follows a non-proportional behavior. Another important aspect was determining the influence of the type of reinforcement used, showing that for the four eigenmodes found, the value of the natural frequency was higher in plates with perimetral reinforcement.

The experimental results were compared with the results obtained with the numerical model. In order to consider the residual thermal stresses, the numerical model was developed in two stages:

Step 1: Apply a uniform temperature field to determine the stresses generated.

Step 2: Calculate the first four free vibration modes and the corresponding natural frequency values. In this stage, pre-load stresses associated with those previously calculated in Step 1 are considered.

The average values were determined from the values obtained experimentally for the four modes of free vibration of the tested plates, in order to compare them with the values reported by the numerical model. The maximum error between the results was 17%. The results are shown in Tables 4, 5, 6, and 7.

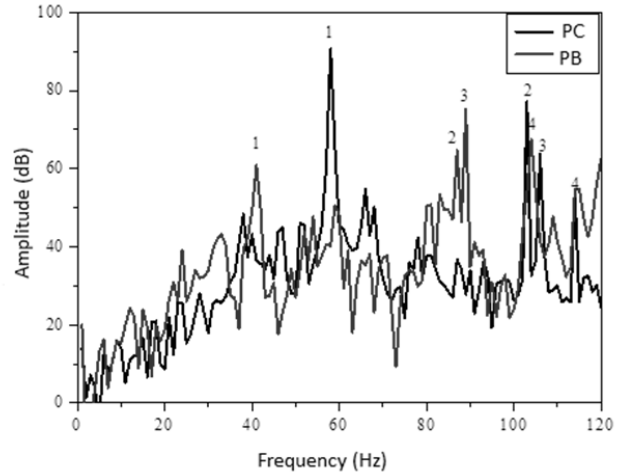


Figure 5. Frequency responses obtained experimentally for perimetral reinforcement plates.
Source: The authors.

Table 4.
Natural frequencies of free vibration (Hz) for plates with perimeter reinforcement type "PB".

Mode	PB 1	PB 2	PB 3	PB 4	Arithmetic average	Average deviation	Numerical model
1º	34	41	37	39	38	2.3	42
2º	84	87	83	85	86	2.5	89
3º	86	89	87	90	88	1.5	92
4º	93	104	92	96	96	3.9	104

Source: The authors.

Table 5.
Natural frequencies of free vibration (Hz) for plates with perimeter reinforcement type "PC".

Mode	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	Arithmetic average	Average deviation	Numerical model
1º	48	54	51	59	53	3.5	57
2º	100	94	98	106	100	3.5	105
3º	104	100	102	106	103	2.0	108
4º	113	110	108	115	112	2.5	120

Source: The authors.

Table 6.
Natural frequencies of free vibration (Hz) for plates with perimeter reinforcement type "LB".

Mode	LB 1	LB 2	LB 3	LB 4	Arithmetic average	Average deviation	Numerical model
1º	27	32	26	34	30	3.3	35
2º	56	54	53	58	55	1.8	54
3º	62	65	60	63	63	1.5	58
4º	70	72	77	74	74	2.3	69

Source: The authors.

The validation of the results was performed by calculating the difference between the natural frequency of the numerical and experimental models for each of the studied modes [20]. The results are shown in Table 8.

Graphical representation of the experimental results as a function of the analytical frequencies are shown in Figs. 6, 7, 8, and 9. The graph also shows a linear regression line. Due to the accumulation of errors, the points corresponding to the high frequencies exhibit greater dispersion. The graph shows how the values fit very well to the line. The linear regression lines obtained show high values of the correlation coefficient ($R^2 \geq 0.97$) and slope values near 1.

Table 7.
Natural frequencies of free vibration (Hz) for plates with perimeter reinforcement type "LC".

Mode	LC 1	LC 2	LC 3	LC 4	Arithmetic average	Average deviation	Numerical model
1º	45	47	43	42	44	1.8	48
2º	58	56	57	64	59	2.6	60
3º	65	70	65	69	67	2.3	75
4º	82	85	85	86	85	1.3	88

Source: The authors.

Table 8.
Correlation of natural frequencies (%)

Mode	PB	PC	LB	LC
1º	10.53	7.55	16.67	9.09
2º	3.49	5.00	-1.82	1.69
3º	4.55	4.85	-7.94	11.94
4º	8.33	7.14	-6.76	3.53

Source: The authors.

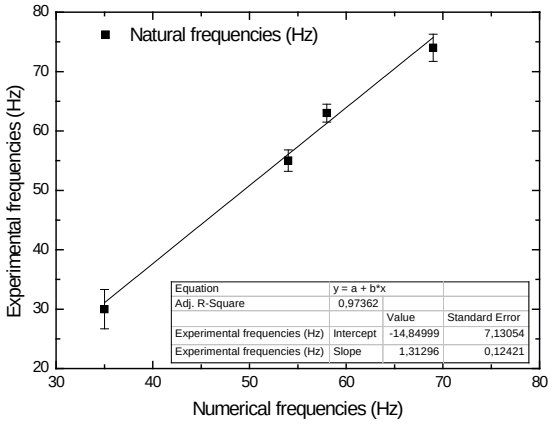


Figure 6. Validation of results for *"LB"* plates.
Source: The authors.

In order to detect possible changes in the characteristic modal forms in the numerical model, different ranges of temperatures between the service temperature (22 °C) and the processing temperature of the laminate (177 °C) were evaluated. In this way, the mapping behavior of the mode shape depending on the thermal gradient that is generated in the material was obtained. Figs. 10 and 11 show the modal forms that are characteristic for the first four modes of free vibration obtained with the numerical model at temperatures of 22 °C, 50 °C, 100 °C, and 177 °C for laterally and perimetrally reinforced plates, respectively.

The results shown in Fig. 10 demonstrate that the temperature variation from room temperature (22 °C) to the

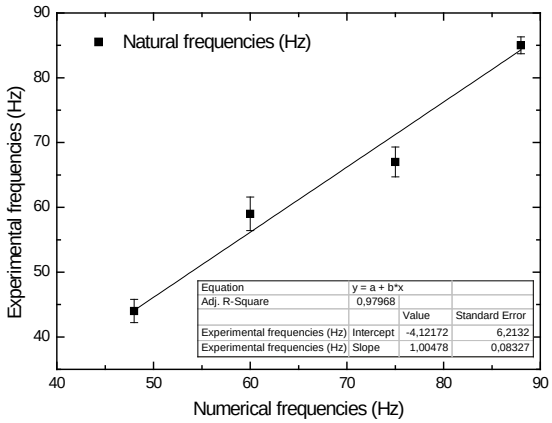


Figure 7. Validation of results for *"LC"* plates.
Source: The authors.

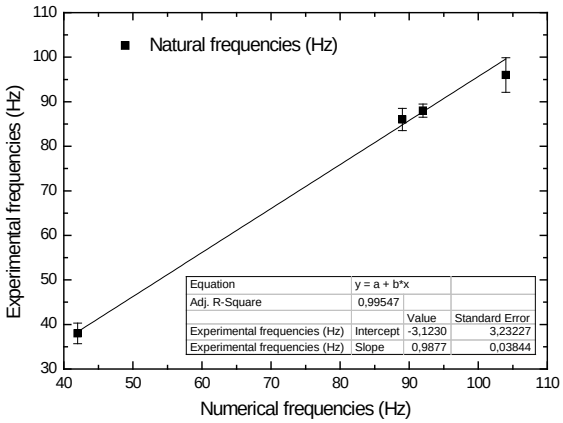


Figure 8. Validation of results for *"PB"* plates.
Source: The authors.

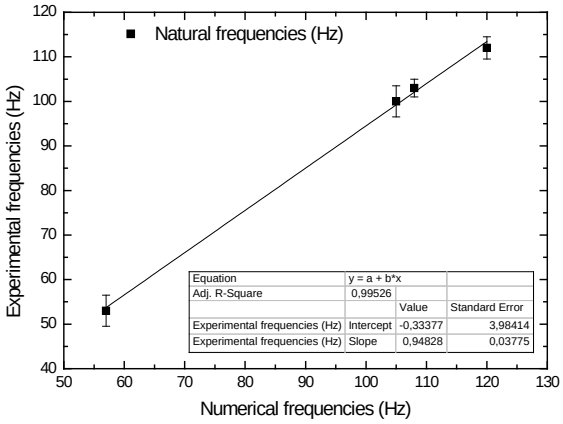


Figure 9. Validation of results for *"PC"* plates.
Source: The authors.

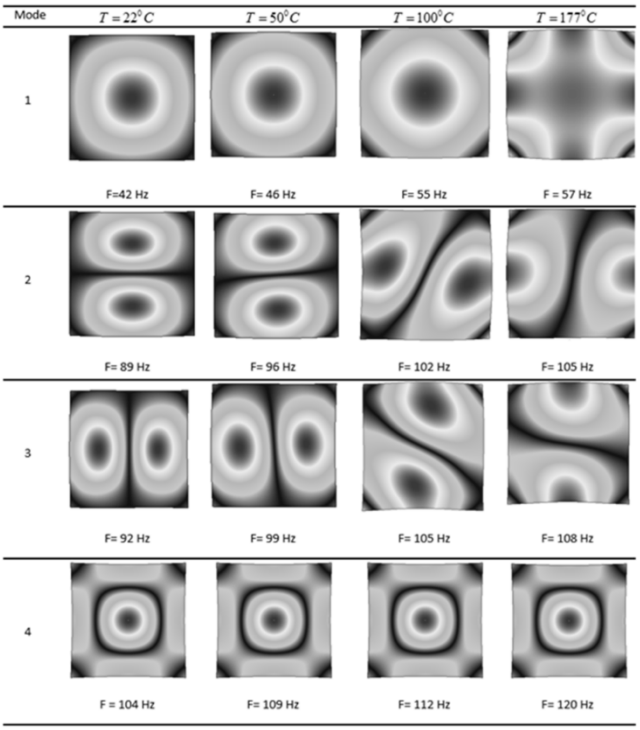


Figure 10. Characteristic mode shape depending on temperature variation for plates with perimeter reinforcement. T is the temperature and F is the frequency of free vibration.
Source: The authors.

cure temperature (177 °C) does not generate significant changes in the mode shape that characterizes the first four modes of free vibration when reinforcement plates are placed around the perimeter. Only a modification of the mode shape that characterizes the first mode and a rotation in the mode shape associated with the second and third modes of free vibration can be seen. On the other hand, for the plates reinforced laterally (Fig. 11), variations in the characteristic mode shape were observed in all four modes analyzed.

Analyzing the variation of the natural frequencies of free vibration with the difference in the temperature, it can be seen that when generating a temperature gradient of 155 °C, an increase of approximately 35% in the characteristic value of the first natural frequency of free vibration occurred in all the plates studied, regardless of the type of reinforcement used. The increase in the other modes studied did not exceed 20% for plates with perimetral reinforcement, but can reach almost 30% on plates with lateral reinforcements. The obtained results are supported by those presented by Almeida and Hansen [16], where increases in the results determined numerically of up to 50% for the value of the first natural frequency of free vibration for reinforced graphite/epoxy laminate and about 20% for the other studied modes were reported.

From the obtained results, we can suggest that the type of reinforcement used affected the residual thermal stresses, which are distributed in the element. It was proven that upon placing a reinforcement symmetrically distributed around the plates, where the reinforcement forms a frame around the perimeter of laminate, a more uniform distribution of stress was produced when compared with stress in the plates with

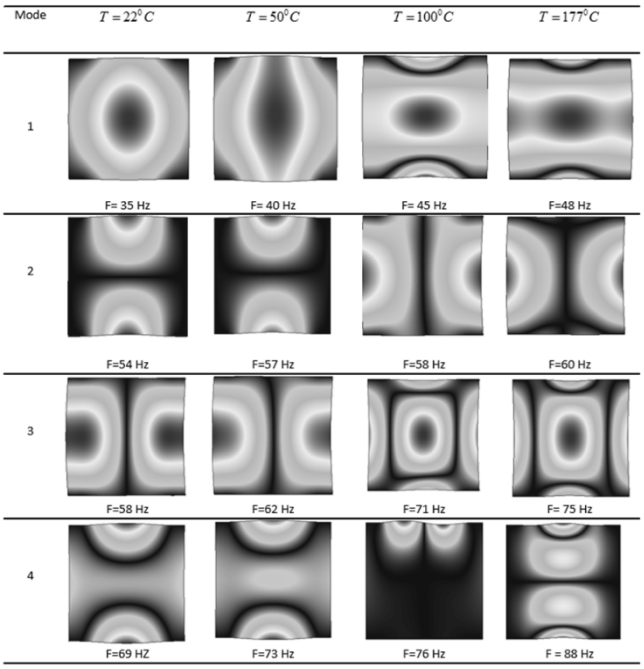


Figure 11. Characteristic mode shape depending on the temperature variation for plates with lateral reinforcement. T is the temperature and F is the frequency of free vibration.
Source: The authors.

lateral reinforcements. These stresses affect both the magnitude of the frequency and their characteristic mode shape; however, each vibration mode can be affected differently. It should be noted that while some vibration modes do not exhibit changes in their characteristic form, others may undergo significant variations. From the obtained results, it is possible to note that induction of residual thermal stresses in reinforcing plates can increase the properties of the structural element independently of the type of reinforcement used, this behavior being more notable in the plates reinforced around the perimeter.

4. Conclusions

The research presented in this paper shows experimentally and numerically that the presence of residual thermal stress affects the value of the natural frequencies of free vibration and the characteristic modal shape of reinforced plates. Regardless of the type of reinforcement used, the laminated plate may exhibit a notable increase in these properties when the element is simply supported.

The experimental results confirm previous research reports with respect to raising the possibility of achieving an increase in the value of the natural frequency of free vibration generated by the induction of residual thermal stresses in the material, which could be used in the design of reinforced laminates, thus improving the mechanical performance of the material or avoiding the negative effects that can be generated in it, depending on structural requirements. However, it is important to note that the proper design of composite structures requires a thorough analysis of the global behavior of the structure, in which important parameters involved are the properties of the constituent materials, the orientation of the laminas, the geometric position of the reinforcements, and the manufacturing process used. Proper selection of the temperature and the type of processing plays an important role in reducing the possible occurrence of premature failure of laminated plates.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support received for this paper from Nueva Granada Military University, UMNG, Universidad Nacional de Colombia, FAPESP, and CNPq agencies.

References

[1] Nagash, A. and Azhari, M., Non-linear free vibration analysis of point supported 76, pp. 64-76, 2015. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2015.05.008.

[2] Belytschko, T., Gracie, R. and Ventura, G., A review of extended/generalized finite element methods for material model. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 17(4), pp. 1-24, 2009. DOI: 10.1088/0965-0393/17/4/043001.

[3] Quoc, B.T., Ngoc, N.M. and Chuanzeng, C., An efficient meshfree method for vibration analysis of laminated composite plates. Computational Mechanics, 48, pp. 175-93, 2011. DOI: 10.1007/s00466-011-0591-8.

[4] Ganapathi, M., Kalyani, A., Mondal, B. and Prakash, T., Free vibration analysis of simply supported composite laminated panels. Composite Structures, 90, pp. 100-103, 2009. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.02.003.

[5] Naidu, N.V.S. and Sinha, P.K., Nonlinear free vibration analysis of laminated composite shells in hygrothermal environments. Compos Struct 77, pp. 475-483, 2007. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.08.002.

[6] Natarajan, N., Deogekar, P.S., Manickam, G. and Belouettar, S., Hygrothermal effects on the free vibration and buckling of laminated composites with cutouts. Composite Structures, 108, pp. 848-855, 2014. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.10.009.

[7] Gascoigne, H.E., Residual surface stresses in laminated cross-ply fiber-epoxy composite materials. Experimental Mechanics, 34, pp. 27-36, 1994.

[8] Zhang, J.T., Zhang, M., Pavier, M.J. and Smith, D.J., Residual stresses created during curing of a polymer matrix composite using a viscoelastic model. Composites Science and Technology 130, p.p. 20-27, 2016. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.05.002.

[9] Abouhamzeh, M., Sinke, J., Jansen, K.M.B. and Benedictus, R., Closed form expression for residual stresses and warpage during cure of composite laminates. Composite Structures, 133(1), pp. 902-910, 2015. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.07.098.

[10] Kravchenko, O.G., Kravchenko, S.G. and Pipes, R.B., Cure history dependence of residual deformation in a thermosetting laminate. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 99, pp. 186-197, 2017. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.04.006.

[11] Hosseini-Toudeshky, H. and Mohammadi, B., Thermal residual stresses effects on fatigue crack growth of re-paired panels bounded with various composite materials. Composite Structures, 89, pp. 216-223, 2009. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.07.029.

[12] Ersoy, N. and Vardar, O., Measurement of residual stresses in layered composites by compliance method. Journal of Composite Materials, 34, pp. 575-598, 2000.

[13] Kim, J.W., Lee, J.H., Kim, H.G., Kim, H.S. and Lee D.G., Reduction of residual stresses in thick-walled composite cylinders by smart cure cycle with cooling and reheating. Composite Structures, 75, pp. 261-266, 2006. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.04.029.

[14] Jaeger, R. and Koplin, C., Measuring and modelling residual stresses in polymer-based dental composites. Chapter in: Residual Stresses in Composite Materials, 2014, pp. 293-310.

[15] Delette, G., Laurencin, J., Murer, S. and Leguillon, D., Effect of residual stresses on the propagation of interface cracks between dissimilar brittle materials: Contribution of two and three-dimensional analyses. European Journal of Mechanics - A/Solids, 35, pp. 97-110, 2012. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2012.02.001.
[16] Almeida, S.F.M. and Hansen, J.S., Natural frequencies of composites plates with tailored thermal residual-stresses. International Journal of Solids and Structures, 36(3), pp. 3517-3539, 1999. DOI: 10.1016/S0020-7683(98)00154-1.
[17] Sánchez, M.L. and Almeida, S.F., Comportamiento mecánico de placas compuestas bajo el efecto de tensiones térmicas residuales. Revista Colombiana de Materiales, 5, pp. 61-66, 2013.
[18] Besednjak A., Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones. Edicions UPC. Edicions, 2005.
[19] Jones, R., Mechanics of Composite Materials, 2nd ed. Taylor and Francis, Philadelphia, PA.
[20] Abaqus 6.12., Analysis user's manual Volume II: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions, Simulia, 2012.

M.L. Sánchez, is PhD. in Engineering. Assistant professor at Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia.
ORCID: 0000-0002-4718-0569.

G. Capote, is PhD. in Physics. Associated professor at Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
ORCID: 0000-0001-9039-1110.

J. Carrillo, is PhD. in Structural Engineering. Associated professor at Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia.
ORCID:0000-0002-8274-54.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

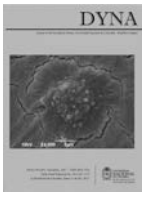
Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Sensitivity analysis of the scor metrics selected for the measurement of the management of a fruit-growing supply chain

Diego León Peña-Orozco & Leonardo Rivera

School of Engineering, Universidad del Valle, Cali, Colombia. diego.l.pena@correounivalle.edu.co, leonardo.rivera.c@correounivalle.edu.co

Received: December 07th, 2016. Received in revised form: September 07th, 2017. Accepted: October 25th, 2017.

Abstract
This paper presents the sensitivity analysis performed on metrics of the SCOR model in order to measure the management of a fruit-growing supply chain of small producers. The methodology is presented in a detailed manner for the selection of metrics by using a multi-criteria method such as the Analytic Hierarchy Process (AHP). The pertinence of the results is analyzed by taking into account three possible scenarios of assessment by the experts. The results of the sensitivity analysis show a certain degree of soundness in the solution given that the changes in the identified metrics within the three scenarios are minimal. Finally, a path for implementing of such metrics from the SCOR model is offered as a proposal to improve the administration and as a usage alternative of the SCOR model for these chains.

Keywords: Supply chain; scor; management; multi-criteria analysis; analytic hierarchy process.

Análisis de sensibilidad de métricas scor seleccionadas para medir la gestión de una cadena de abastecimiento frutícola

Resumen
En este artículo se muestra el análisis de sensibilidad sobre métricas seleccionadas del modelo SCOR, para la medición de la gestión en una cadena de abastecimiento frutícola de pequeños productores. Se presenta de manera detallada la metodología para la selección de las métricas con el uso de un método multi-crietrio como el Proceso analítico jerárquico (AHP). Se evalúa la pertinencia de los resultados, considerando tres escenarios posibles de valoración por parte de expertos. Los resultados del análisis de sensibilidad arrojan cierto grado de robustez en la solución, dado que los cambios en las métricas identificadas en los tres escenarios son mínimos. Finalmente se ofrece un derrotero para la implementación de las métricas del modelo SCOR, como una propuesta de mejoramiento de la gestión y una alternativa de uso del modelo SCOR en este tipo de cadenas.

Palabras clave: Cadena de abastecimiento; SCOR; Gestión; Análisis multi-criterio; Proceso analítico jerárquico.

1. Introduction

This work presents the sensitivity analysis performed on the metrics from the SCOR methodology selected for the measuring the management of a fruit-growing supply chain. SCOR is the most promising model for the measuring of strategic affairs, including the determination of opportunities that may improve the company's competitiveness [2]; in this case, a fruit-growing supply chain. Stewart [3] cited by [4] shows some advantages offered by the SCOR model, alluding that this model enables:

- A quick modeling and understanding of the supply chain.
- An easy configuration of the supply chain internal and external to the company, illustrating both the current configuration and the ideal situation.
- A better assessment and comparison, and better communication of business processes (through the outlining of business processes and the common language that shall be used to convey information) both in the internal and the external scope of the company.

On the other hand, in the SCOR model, very well explained by [5], it is not clear which are the metrics that influence supply chains the most; therefore, Van der Vorst, Christopher cited by [6] pose that the performance of a

How to cite: Peña-Orozco, D.L. and Rivera L., Sensitivity analysis of the scor metrics selected for the measurement of the management of a fruit-growing supply chain DYNA, 84(203), pp. 306-315, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

supply chain is linked to the satisfaction of the customer and the parties involved, and refers to the need of identifying and organizing the performance metrics to be used in the assessment process of the chain to be studied, considering the degree of complexity of the structure. Authors such as [6] and [7] attempt to consolidate, based on the literature's review, some metrics of the SCOR model. On the other hand [8] poses that there are no studies to be found on the ranking of the metrics that allow to measure the management of a chain in a better manner and much less in regard to fruit-growing chains.

According to [9], performance indicators enable to monitor the achieving of objectives within the supply chain. The SCOR model defines indicators called Key Performance Indicators (KPIs) to carry out the assessment of the chain.

Establishing the impact of an indicator on the measuring of a fruit-growing chain's management becomes important because the products are perishable. The SCOR model measures the management regarding delivery trustworthiness, responsiveness, flexibility, costs and efficiency in the administration of assets. In [10] it is posed, additionally, that the limited application of managerial criteria in the agricultural sector and its lack of connection with the value chain hinder its evolution and development.

In the context of the SCOR model, we performed a sensitivity analysis on the metrics, selected according to their importance, considering structural and information constraints that persist in the fruit-growing supply chains. We build three scenarios with the intent to discover how the selected metrics are affected by the usage of the Hierarchical Analytical process. The Multi-Criteria Decision Methods (MCMD) enable us to establish the metrics to be used in measuring of the management of a chain where information is scarce. Moreover, the sensitivity analysis makes it possible to identify how the selected metrics are affected if the assumptions of the analysis change. An adequate selection of the metrics with regard to the characteristics of the chain may support the intervention for improving its efficiency and effectiveness, and just as Vergara et al. (2002) propose (cited by [4]), organizational success may be achieved.

2. Problem statement

Authors such as Farhoodmans cited by [1], pose that managing the supply chain efficiently makes companies gain competitive advantages, given that in addition to planning and managing all the activities of acquiring and purchasing, transforming and distributing, it is also sought to manage the coordination and collaboration between channels such as suppliers, intermediaries, logistics providers and customers.

The rural sector in Colombia has little integration, aside from little technological infrastructure to support it which implies difficulties in its performance. The medium rural zone of the city Guadalajara de Buga where this work is carried out is no stranger to such situation according to the data reported by the Secretariat of Agriculture and by the characterization report of said system.

The fruit-growing chain of the medium rural zone of the city of Buga, which is our case study, is studied from the perspective of management using the metrics of the SCOR model, where the greatest difficulty lays in applying such great number of metrics to the fruit-growing chain given its informality, which raises the issue of identifying which are the most pertinent metrics in order to measure the administration of the chain and how this selection is altered when some conditions of the analysis vary.

The metrics presented by the SCOR model are a finite set of possible usable metrics, without proposing levels of importance, and some basic ones that may be used in an information-restricted scenario as a starting point in order to measure the management of a poorly integrated supply chain. From that approach, the following research question arises: If we want to use metrics selected from the SCOR model in a poorly integrated fruit-growing supply chain, how is this selection affected by changes in the AHP methodology?

3. Methodology

As a starting point, we present a description of the fruit growing supply chain and define the links to consider within the analysis. The metrics associated to the attributes of the SCOR model are put forth (Reliability, Responsiveness, Agility, Cost, Assets). A tree of indicators structured by categories and type of process is presented in order to proceed with the enforcement of a discrete multi-criteria decision method, and determining the metrics that bear the highest importance for each level and associated attribute. Finally, the sensitivity analysis is carried out in order to know the changes in the selection of the metrics.

3.1. Application of the multi-criteria decision method

The Multi-criteria method proposed by [10] applied, called "Analytic Hierarchy Process" (AHP), in order to choose the metrics preferred in each level of the SC. Using mathematical notation, it may be expressed as follows:

Being X_{ij} the metric of attribute i in level j, the set of metrics that measure performance will be given by:

$$\left[\mathbf{X_{1,1}}, \mathbf{X_{1,2}}, \mathbf{X_{13}}, \mathbf{X_{2,1}}, \ldots, \mathbf{X_{m,n}}\right]$$

Where m is the number of attributes and n the number of levels.

The multiple AHP is presented in Figure 1, which presents that for each attribute an AHP is carried out to select a level 1 metric; after the selected level 1 metric, another AHP is carried out in order to choose a level 2 metric, and finally one last AHP is performed on the level 2 metric to choose the level 3 metric for measuring the overall performance of the chain.

Each AHP performed must follow the sequence of steps established by Saaty just as mentioned in (12). The multi-criteria methodology adjusted to the case study is presented in a detailed manner next:

Step 1: We need to establish the objective of the problem that will be approached in each one of the AHPs in each level, and to identify the criteria that most influences the achievement of the indicated objective respectively, using the characterization of the supply chain.

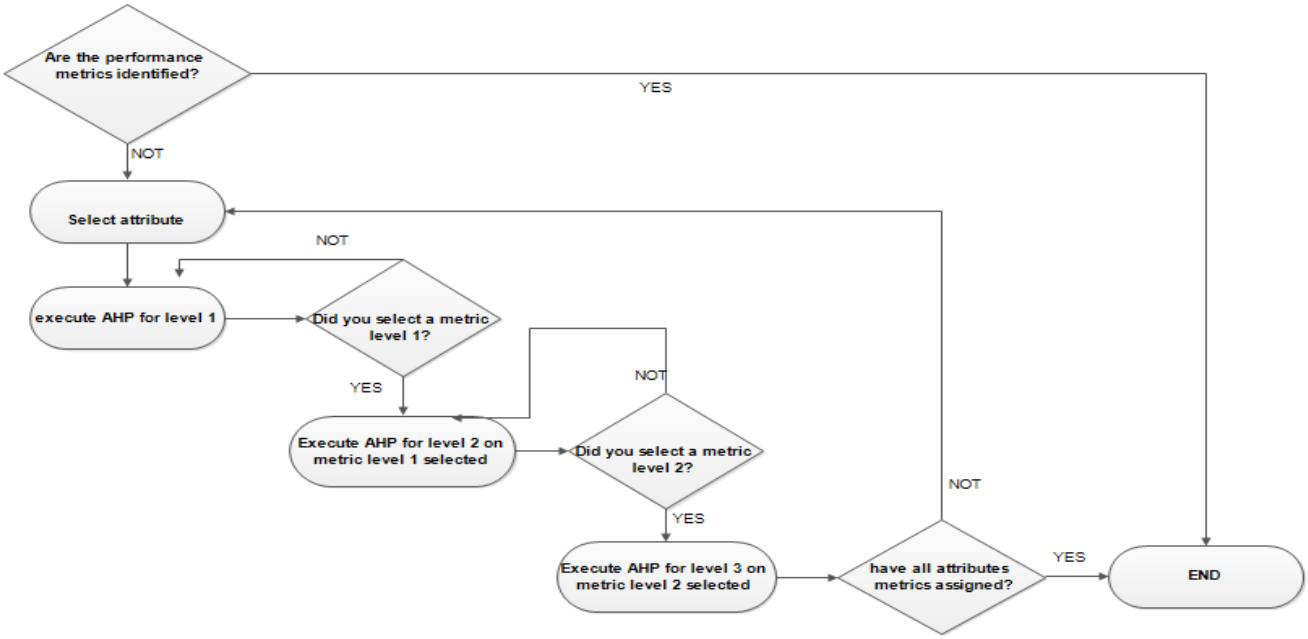


Figure 1. Application multiple AHP.
Source : Author's own elaboration

Step 2: We then proceed to graphically represent the magnitude of the decision tree for each level as the structure set forth is built. This means that the starting point is the level 1 tree after the respective AHP has been applied, then the level 2 tree is built and the decision tree for level 3 is constructed in the same manner.

Step 3: We assembled a group of experts, and inquire them about the pairwise comparison using the valuation scale previously shown. After obtaining the valuations, the priority vector of the matrices is calculated as well as the constancy coefficient. Should the matrix be inconsistent, the expert is inquired once again so as to correct such inconsistency.

Step 4: After obtaining the valuations and weights for each of the alternatives (metrics) the one with the highest score will be chosen as the metric to measure the performance of the chain for the respective level of the specified attribute.

It is important to clarify that in order to perform the procedure on the level 2 metrics, said procedure must have been performed on the level 1 metrics first; and on the same line of thought, in order to carry out the procedure on the level 3 metrics, it must have been finished on level 2 and at the same time, the level 2 AHP will be the input that marks the beginning of the level 3 AHP.

Step 5: Once the results have been obtained, it is necessary to define how to use such results to measure the supply chain's management with the SCOR model. It is attempted to set a plan in order to begin with the arrangement of the measures in the supply chain.

4. Application and results

In order to begin the application of the methodology, it is important to specify that the attributes of the SCOR will not be revised, and that this study will only focus on the metrics for each level. Given that the SCOR version 11 revises some metrics, it may be found that for some attributes where the SCOR model assesses the management of the supply chain, the metrics have been reduced to only one in the level I or strategic, which is why applying the tools for metrics selection is not necessary. Specifically, in order to measure the attributes of Reliability, Responsiveness and Cost they will not be subject to analysis in the first level of decision, leaving the metrics for the attributes of Agility and Asset Management Efficiency as the ones to be analyzed in the first level of the metrics structure. For the following levels 2 and 3 the metrics are multiple, therefore, the decision process on the metrics to be used will be completely pertinent.

Step 1: defining the problem's objective.

We seek to define the most pertinent metrics for each one of the attributes established by the SCOR model to measure the overall management of a supply chain. This analysis is done in a tiered manner, which is why the metrics to be used in the measuring of each attribute are analyzed as first level, the most pertinent metrics to measure the level I or strategic metric associated to the attribute.

Finally, once the level 2 metric has been chosen, the level 3 metric that best responds to the measurement of the level 2 metric associated to the level 1 metric and its respective attribute is applied. In order to attempt a generalization of this procedure, the objectives are defined with the following:

Given: A set of attributes i ={1, 2...,5}, where i= Reliability, Responsiveness, Agility, Cost y Asset management efficiency.

Also given: A set of j level I or strategic metrics for attribute 1 given by = {Perfect order fulfillment); k for attribute 2 given by = {order fulfillment cycle time}; l for attribute 3 given by = {upside flexibility, upside adaptability, downside adaptability, overall value-at-risk}; m for attribute

4 given by = {total cost to serve}; and n for attribute 5 given by = {cash to cash cycle time, return of fixed assets y return on working capital}.

The goal of the AHP methodology applied to the first level is to establish such an arrangement (i,r) that enables to measure the management of the supply chain of the jurisdiction of Monterrey, considering its constraints and characteristics. Where the r set is formed by the metrics = {j, k, l, m, n} and there can only be one metric of the j, k, l, m and n type to define a set of arrangements (i,r) that becomes the solution vector v = {(1,j) (2,k) (3,l) (4,m) and (5,n) }.

The goal of the second level will be constituted by a set equal to the previous one, where the set i will be formed by the level 1 metrics selected in the previous process, which must correspond to 5 metrics {1, 2, 3, 4, 5}, and the set of level 2 metrics will be established to conform the solution vector with the arrangements (i, r), where r is just a metric associated to the level 1 metric. The same procedure is applied to the level 3 metrics.

4.1. The fruit-growing supply chain of Monterrey

The description of the fruit-growing supply chain is based on the characterization performed by [13] on the supply chain of the jurisdiction of Monterrey. We present some relevant information about this supply chain in the following paragraphs.

The jurisdiction of Monterey is made up by 5 small towns: La Unión, Miraflores, Miravalle, Monterrey and San José. It is inhabited by 242 families of which 180 work in agricultural activities. Forty three banana crops are identified with a yearly yield of 522,320 kgs; 36 plantain crops with 310,980 kgd/year; 3 blackberry crops with a yearly yield of 9,290 kgs, 5 crops of other citrus fruits with a 5,470 kgs/year, 6 lulo crops for a yearly yield of 61,160 kgs, 4 coffee crops that yield 6,630 yearly kgs approximately, 1 pitahaya crop with a yearly yield of 6,000 kgs and lastly an avocado crop with a yearly yield of 600 kgs; beans, corn pumpkin and yucca crops are also taken into account. The average production cost of bananas is 167 pesos/kg, 223 pesos/kg for plantain, 1500 pesos/kg for lulo, 3625 pesos/kg for coffee, 200 pesos/kg for pitahaya and lastly, beans are yielded at a 400 pesos/kilo cost.

As for pricing, 80% of time the price is set by the buyer. The cost and expiration criteria present no influence in determining the sale price. The study identifies a difference between the producer's sale price to the intermediary that reaches up to 657% in the case of citrus, with regard to the final sales price to the final consumer. It is identified that the main difficulty in the process is transportation.

For trading, the study reports that in 62% percent of the cases the producers deliver their products at the door of the farm where the buyers pick them up; the other 38% takes charge of transportation themselves, and from that amount 24% uses a rented means of transportation or the "chiva" bus that goes around town; 14% have their own vehicle. The products are 43.41% marketed through intermediaries, 24.03% through associations, and 5.56% through points of sale, 2.12% through neighborhood stores and 24.89% through individuals.

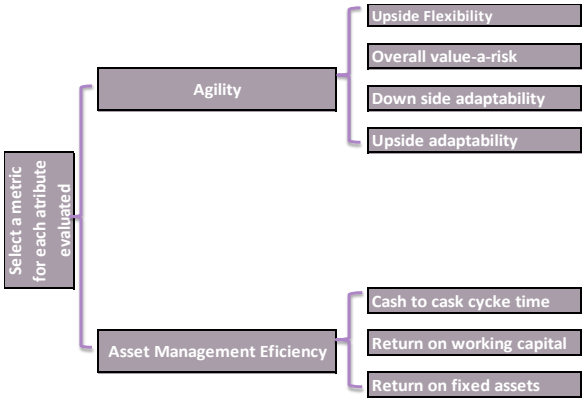


Figure 2. Level 1 graphical representation. Source: Authors' own elaboration.

The information regarding the supply chain's characteristics points to a general breakup of the chain, due the following aspects:

1. Monterrey's fruit-growing supply chain does not have a clearly defined distribution system, and does not show an integral strategic objective for its development.
2. Save for a group of banana producers, whom are associated, producers of other fruit types do not display interest towards integration with the purpose of improving performance and SC management.
3. The large difference in price between what the producer receives and what the final costumer pays is evident. This presents an opportunity to improve the livelihood of the producers, given that such price gap is not being distributed equitably among the links of the chain.
4. In general, in this supply chain producers grow the crops and sell them at their farm; intermediaries buy and carry to consumption centers, and retailers buy and sell at their retail center. This shows the supply chain is not articulated, which permits putting forth the hypothesis that income is not optimized.

Step 2: Graphical representation of the decision tree.

The tree structure for the hierarchical analysis begins with the level 1 of SCOR, keeping in mind that the attributes will not be subject to analysis but the metrics associated to each attribute will. As it was previously explained, the attributes of Reliability, Responsiveness and Cost are not within this level since a single level 1 metric corresponds to them.

According to the Agility criterion (see Figure 2) only one level 1 metric must be picked from the 4 alternatives available. Likewise, according to the Efficient Management of Assets criterion, a level 1 metric must be picked from the 3 alternatives available.

Once the level 1 metric has been selected, it is posed as a criterion, and the best fitting level 2 metric (alternative) is defined for that criterion. Lastly, we will select the level 3 metric (criterion) that responds to the level 2 metric (criterion).

After defining the metric that will measure reliability (See Figure 3) based on the perfect order fulfillment criterion, it becomes the objective; the criterion corresponds to the selected metric and the alternatives will be the level 3 associated indicators. As an example, if documentation accuracy is defined as the metric to consider, the decision tree will look as follows:

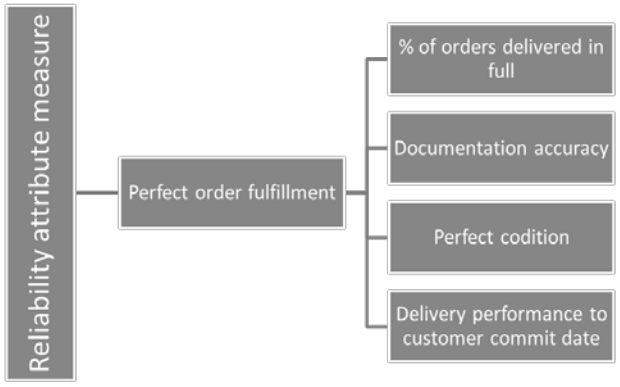


Figure 3. Level 2 graphical representation
Source: Authors' own elaboration.

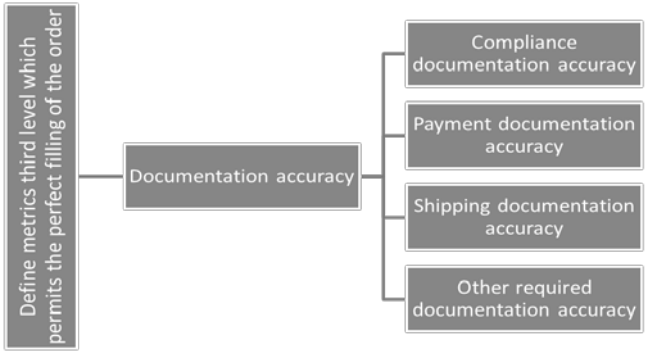


Figure 4. Level 3 graphical representation.
Source: Authors' own elaboration.

Step 3: Methodology for the selection of experts.

In the next step, the alternatives of metrics must be appraised in each one of the levels for each attribute. Such appraisal must be carried out according to the AHP methodology through a group of experts. Selecting the experts is a key stage which impacts on the results of the process since they are the people that will provide the appraisals.

For the selection of a group of case experts, Okoli and Pawlowski's 2004 model (cited by [14]) is taken into account, which consists of 5 fundamental steps:

1. Elaborating a nomination table for knowledge resources.
2. Assigning the names of specific experts to the categories identified in the previous step.
3. Identifying additional experts.
4. Ordering of experts according to their experience.
5. Formally inviting the experts.

Next, Table 1 presents the development of steps 1 and 2 respectively.

Step 4: Synthetizing local priorities over the hierarchy to obtain a global result for each alternative

After choosing the relevant experts for the appraisal, a survey for each one of them was formulated. In such survey, the metrics were compared by pairs for each one of the attributes in every corresponding level.

After applying the surveys on the four experts, a global AHP initial appraisal was obtained with the following results:

Table 1.
Definition of experts

Area of expertise	Nominee Name	Experience
Fruit producer and marketer	Expert 1	Pineapple farmer, processor and marketer
Monterrey fruit-growing chain analyst	Expert 2	Knowledgeable on the production area in Monterrey
Costs expert	Expert 3	Instructor in financial and costs areas
Expert on the Supply chain under study and SCOR knowledgeable	Expert 4	Instructor in logistics and SCOR model application researcher

Source: Authors' own elaboration.

Table 2.
Consistency Matrix.

		Atributes					
		Assets	Agility	Costs	Responsiveness	Reliability	Total
Matrix evaluated	Consistent	12	6	14	5	12	49
	Inconsistent	12	14	18	15	8	67
	Total	24	20	32	20	20	116

Source: Authors' own elaboration.

Table 3.
Percentage of consistencies and inconsistencies per attribute.

		Atributes				
		Assets	Agility	Costs	Responsiveness	Reliability
Matrix evaluated	Consistent	50%	30%	44%	25%	60%
	Inconsistent	50%	70%	56%	75%	40%

Source: Authors' own elaboration.

Table 4.
Total percentage of consistencies and inconsistencies.

Matrix evaluated	Consistent	42%
	Inconsistent	58%

Source: Authors' own elaboration.

Table 5.
Decision weights of each expert evaluator.

Expert		Weights
Expert 1	E1	5,00%
Expert 2	E2	20,00%
Expert 3	E3	50,00%
Expert 4	E4	25,00%

Source: Authors' own elaboration.

Table 2 shows the total matrices appraised for each attribute as well as the total matrices for the issue at hand. Likewise, we can observe the amount of inconsistent and consistent matrices respectively. From the above, we will generate the percentages of consistencies and inconsistencies per attribute and totals on Tables 3 and 4, from the information gathered from the experts.

After reviewing the previous results, in order to ensure the effectiveness of the method, we apply the methodology posed by [15] for the complete consistency of the matrices (method of the rectangles).

So, after having the matrices completely corrected and obtaining the weighings for each criterion (metrics and

Table 6.
Attributes rating.

Attribute	Total
Cost	0,303435527
Reliability	0,224766655
Resposnsivness	0,2072573
Agility	0,183893472
Assets	0,080647045

Source: Authors' own elaboration.

Table 7.
Level 2 comparison metric for the metric Total cost of supply (CO1.1) Level 1

Metric	Total
CO.2.1	0,034517875
CO.2.2	0,172898864
CO.2.3	0,189256044
CO.2.4	0,251458425
CO.2.5	0,038183337
CO.2.6	0,036109133
CO.2.7	0,052617861
CO.2.8	0,224958461

Source: Authors' own elaboration.

Table 8.
Level 3 comparison metric for metric Cost of Production (CO2.4) Level 2

Metric	Total
CO.3.14	0,604480341
CO.3.15	0,149238975
C0.3.16	0,121499105
CO.3.17	0,124781579

Source: Authors' own elaboration.

attributes), it was weighted with the criteria weights of each of the experts showed in Table 5 in order to finally reach the following results:

4.2. Importance weights of each attribute in the case study supply chain

It is clear from Table 6 that the most important attribute in this supply chain is Cost with a 30.3% of importance, followed by Reliability with a 22.4%. Moreover, it is clear that the least important attribute is Assets with a weight of 8%. Next, we will show the metrics selected in each level for every attribute, in order of importance.

Costs: the level 1 metric for this attribute is defined by default according to the SCOR model, and it is the total cost of supplying.

The level 2 metric selected for this attribute is CO.2.4 which corresponds to the cost of production, obtaining a 25% importance according to Table 7.

Finally, the level 3 metric for this attribute is CO.3.14 (direct labor cost of production) with a 60.4% weight of importance according to Table 8.

Reliability: The level 1 metric selected for this attribute comes defined by default, according to the SCOR model, and it is the perfect fulfillment of the order.

The level 2 metric selected for this attribute is RL.2.4 which corresponds to perfect conditions, obtaining a 61.3% weight of importance according to Table 9.

Finally, the level 3 metric for this attribute is RL.3.24 (% of damage-free orders received) with a 37.7% weight of importance according to Table 10.

Table 9.
Comparison metrics for measuring Level 2 Compliance with perfect order (RL1.1) Level 1

Metric	Total
RL.2.1	0,102605801
RL.2.2	0,155423065
RL.2.3	0,128727011
RL.2.4	0,613244123

Source: Authors' own elaboration.

Table **1**0.
Level 3 metric comparison for Perfect Conditions(EL.2.4) Level 2

Metric	Total
RL.3.12	0,185049928
RL.3.24	0,377915703
RL.3.41	0,045418457
RL.3.42	0,101071090
RL.3.55	0,290544822

Source: Authors' own elaboration.

Table **1**1.
Comparison metric level 2 for the metric Order Fulfillment Cycle Time (RS1.1) Level 1

Metric	Total
RS.2.1	0,054500228
RS.2.2	0,345666619
RS.2.3	0,365862008
RS.2.4	0,226318994

Source: Authors' own elaboration.

Table **1**2.
Comparison metric level 3 for the metric Deliver Cycle Time (RS.2.3) Level 2

Metric	Total	Metric	Total
RS.3.16	0,030572692	RS.3.110	0,128869508
RS.3.18	0,078429656	RS.3.111	0,053718678
RS.3.46	0,061574452	RS.3.116	0,042429504
RS.3.51	0,086000462	RS.3.117	0,060710212
RS.3.95	0,122560268	RS.3.120	0,040090554
RS.3.96	0,053929166	RS.3.124	0,033416346
RS.3.102	0,121190151	RS.3.126	0,086508352

Source: Authors' own elaboration.

Responsiveness: The level 1 metric for this attribute is already defined by default, according to the SCOR model, and it is the Order fulfillment cycle time.

The level 2 metric selected for this attribute is the RS.2.3 which corresponds to Delivery cycle time, obtaining a 36.5% of importance according to Table 11.

Finally, the level 3 metric for this attribute is RS.3.110 (Delivery cycle time) with a 12.99% weight according to Table 12.

Agility: the level 1 metric selected for this attribute is AG.1.13 which corresponds to Forward Adaptability, obtaining a 49.9% weight of importance according to Table 13.

Tabla 13.
Metric comparison Level 1

Metric	Total
AG.1.1	0,082389901
AG.1.2	0,091863974
AG.1.3	0,499912988
AG.1.4	0,325833138

Source: Authors' own elaboration.

Table 14.
Comparison metric level 2 for the metric Downside Supply Chain Adaptability (AG1.3) Level 1

Metric	Total
AG.2.11	0,186429191
AG.2.12	0,402926864
AG.2.13	0,410643945

Source: Authors' own elaboration.

Table 15.
Level 1 metric comparison

Metric	Total
AM.1.1	0,497616239
AM.1.2	0,209383118
AM.1.3	0,293000643

Source: Authors' own elaboration.

Table16.
Comparison metrics level 2 for Cash-To-Cash Cycle Time (AM1.1) from Level 1

Metric	Total
AM.2.1	0,250705228
AM.2.2	0,658248951
AM.2.3	0,091045821

Source: Authors' own elaboration.

Table 17.
Level 3 comparison metric for the metric Inventory Days of Supply (AM2.2) Level 2

Metric	Total
AM.3.16	0,114948811
AM.3.17	0,177667736
AM.3.23	0,178413779
AM.3.28	0,066609956
AM.3.37	0,143181465
AM.3.44	0,088425178
AM.3.45	0,230753074

Source: Authors' own elaboration.

The level 2 metric selected for this attribute is AG.2.13 which corresponds to forward Adaptability, obtaining a 41% weight of importance according to Table 14.

Step 5: Defining a path for the usage of the results obtained within the measurement of supply chain management with the SCOR model.

The multi-criteria analysis developed in this document is oriented towards determining the most important metrics for the set of the five attributes defined by the SCOR model as key in measuring the management of a supply chain. The results obtained enable us to establish at least one metric per attribute and level of analysis. However, the results also offers a prioritization that might be used as a critical route to apply additional metrics once the steps to implement the precedent metrics have been completed. This means that the defined metrics are shared with the actors in the SC, the required practices to obtain information are implemented, the metric is applied and initial information on the state of the SC management is obtained. By having these metrics implemented, it is possible to go back to the results and from there to continue to the next prioritized metric and perform the same process. All of this under the understanding that at present, the management of a supply chain bearing characteristics such as the one under study cannot be measured by implementing the SCOR model in full due to the fractured nature of the SC, which is why these metrics initially prioritized turn into a baseline to begin with the measuring process and implementing improvements.

This work plan (see Table 18) must systematize the application of the metrics in such a way that the priorities in the AHP are gradually covered and therefore improve the management of the chain over time. This suggests that small producers and other actors of the chain must participate decisively, most likely through several years, as required by the process of intervention.

For this attribute, the SCOR model does not present level 3 metrics.

Assets: The level 1 metric selected for this attribute is AM.1.1 which corresponds to cash-to-cash cycle time, obtaining a 49.76% weight of importance according to Table 15.

The level 2 metric selected for this attribute is AM.2.2 which corresponds to Days of Supply Inventory, obtaining a 65.8% weight of importance according to Table 16.

The level 3 metric for this attribute is AM.3.45 (Days of Inventory for finished goods) with a 23% weight of importance, according to Table 17.

Table 18.
Working Plan

Activity	Addressed to	Manager
SCOR model Socialization	Small Farmers	Researcher
Metric selection method and results Socialization	Small Farmers	Researcher
Defining metrics implementation team	Small Farmers	Small Farmers and Researcher
Information requirement to apply metrics obtained	Small Farmers	Small Farmers and Researcher
Getting information and metrics application.	Small Farmers	Researcher
Results and analysis	Small Farmers	Small Farmers and Researcher
Definition of activities to improve processes and practices	Small Farmers and Researcher	Small Farmers and Researcher
Implementation of improvement processes	Small Farmers	Small Farmers
New application management metrics measurement	Small Farmers	Researcher
Analysis of results	Small Farmers and Researcher	Researcher
Defining the application of the following metrics prioritized	Small Farmers and Researcher	Small Farmers and Researcher
Definition of activities for improving processes and activities	Small Farmers and Researcher	Small Farmers
Implementation of improvement processes	Small Farmers	Small Farmers
New application of measurement metrics management	Small Farmers	Small Farmers and Researcher

Source: Authors' own elaboration.

5. Sensitivity Analysis

After selecting the metrics for each level of every attribute, the sensitivity analysis of the system is carried out taking into account three new scenarios, and taking the initial system as the baseline (see Table 19).

The first scenario assigns a weight equal to 25% for each of the expert opinions, which modifies the initial situation that assumes a differential weight for every one of them.

The second scenario considers the limitations for gathering information related to the metrics obtained from the initial system. In such sense, simulations are carried out removing the metrics obtained initially for the whole system, and leaving only the weightings for the expert judgement according to what was established in the initial system.

The third scenario combines the previous ones, meaning that the system is evaluated by eliminating the metrics obtained from the initial system and then pondering with weights equal to 25% for the expert judgement.

In the simulation of scenario 1 (Table 20), a change is produced in the level 2 metric of the costs attribute, moving from CO.2.4 (Production cost) to CO.2.8 (cost of sold goods). The level 3 metric CO.3.14 (Cost of direct production labor) is removed. Additionally, there is a change in the level 3 metric associated to the assets attribute which moves from AM.3.45 (Days of finished goods inventory) to AM.3.17 (Days of inventory - WIP).

Regarding the level 2 metrics, CO.2.4 and CO.2.8, the new metric obtained is convenient since it includes costs associated with production, giving a wider outlook on the element of cost. This metric could be more useful in the measurement of the management of a SC, despite not having an associated level 3 metric.

Regarding the level 3 metric associated to the assets attribute, which went from AM.3.45 (Days of Inventory of finished product) to AM.3.17 (Days of Inventory - WIP) it could be said that both metrics measured separately offer a partial outlook on the chain. However, if we consider the capacity or rate at which the money invested in the productive process is recovered, it could be more useful to work with the AM.3.45 metric.

In the simulation of scenario 2 (see Table 21), the results obtained enable the metrics that scored second in the pondering, a fact that might seem obvious, but it must be understood that this generates significant changes in the level 2 and 3 metrics. For instance, the costs attribute moves from

Table 19
Initial results of the system.

Attribute	Metric level 1	Score	Metric leve 2	Score	Metric level 3	Score
Cost	Defined	1	CO.2.4	0,25	CO.3.14	0,604
Reliability	Defined	1	RL.2.4	0,613	RL.3.24	0,377
Responsiveness	Defined	1	RS.2.3	0,365	RS.3.110	0,1299
Agility	AG.1.3	0,499	AG.2.13	0,41	No	0
Assets	AM.1.1	49,76	AM.2.2	0,658	AM.3.45	0,23

Source: Authors' own elaboration

Table 20.
Scenario 1 results.

Attribute	Metric level 1	Score	Metric leve 2	Score	Metric level 3	Score
Cost	Defined	1	CO.2.8	0,2433	No	0
Reliability	Defined	1	RL.2.4	0,6312	RL.3.24	0,3353
Responsiveness	Defined	1	RS.2.3	0,4359	RS.3.110	0,1339
Agility	AG.1.3	0,5135	AG.2.13	0,3723	No	0
Assets	AM.1.1	0,5144	AM.2.2	0,4625	AM.3.17	0,1856

Source: Authors' own elaboration

Table 21.
Scenario 2 results.

Attribute	Metric level 1	Score	Metric leve 2	Score	Metric level 3	Score
Cost	Defined	1	CO.2.8	0,3086	No	0
Reliability	Defined	1	RL.2.2	0,3583	RL.3.34	1
Responsiveness	Defined	1	RS.2.2	0,5188	RS.3.114	0,2093
Agility	AG.1.4	0,549	AG.2.18	0,4151	No	0
Assets	AM.1.3	0,6083	AM.2.7	0,6708	No	0

Source: Authors' own elaboration

Table 22.
Scenario 3 results.

Attribute	Metric level 1	Score	Metric leve 2	Score	Metric level 3	Score
Cost	Defined	1	CO.2.8	0,3268	No	0
Reliability	Defined	1	RL.2.2	0,3992	RL.3.34	1
Responsiveness	Defined	1	RS.2.2	0,4836	RS.3.114	0,2065
Agility	AG.1.4	0,4255	AG.2.18	0,4463	No	0
Assets	AM.1.3	0,5833	AM.2.7	0,6458	No	0

Source: Authors' own elaboration

CO.2.4 to CO.2.28, a metric that corresponded to the second place when pondering among level 2 metrics. The attribute of reliability moves from RL.2.4 (Perfect Conditions) to RL.2.2 (Delivery to clients on the agreed-upon date) in level 2. Finally, the same occurs to the attribute of responsiveness where it moves from RS.2.3 (Delivery cycle time) to RS.2.2 (Production cycle time) in level 2.

On the other hand, the level 1 metrics corresponding to the attributes of agility and assets move respectively from AG.1.3 (Forward adaptability) and AM1.1 (Cash flow cycle time) to AG.1.4 (Amount at full risk) and AM.1.3 (Return on work capital), which corresponded to the second pondering in the order of the level 1 metrics of the initial system.

Even though it's complicated to precise the convenience of the metrics for this particular case, it seems that metrics obtained provide a wider outlook on the management of the SC.

When simulating scenario 3 (See Table 22), we observe that the metrics obtained for the level 1 and 2 metrics are consistent with the results obtained in scenario 2. In the case of the level 3 metrics, it presents a variation regarding scenario 2 for the attribute of responsiveness, passing from RS.3.128 (Cycle time of the finished product stage) to RS.3.114 (cycle time for releasing the finished product).

In general, according to the result obtained from the simulations, it may be observed that the variation of the percentage weights in the expert judgement does not change the model significantly, since it only modifies the percentages of selection but the preference is still the same in most cases.

On the other hand, a radical intervention such as removing the highest scores attained in the initial system completely modifies the system and brings about a completely different metrics approach given the escalated and sequential dependency of the lowest level with the highest level of the system. All of the above suggests that for this model, where all the metrics are given and selecting the most adequate ones is attempted according to the judgement of some experts, the AHP in general performs a reading very close to the intention or preference of the experts, since the obtained metrics finally reflect what the experts as a set have determined as the most important ones.

6. Conclusions

1. An important challenge of fruit-growing supply chains is to measure their management. Even though this measurement could be approached from various perspectives, the SCOR model offers a wide and integral outlook in order to determine the chain's administration's rate. However, the model assumes an integrated chain, which is far from the reality of small producers in fruit-growing chains; but by using multi-criteria decisions models it is possible to define a starting point that promotes the measurement of integration and management, starting off from the basic metrics selected by experts that permit to move forward in continuously improving the chain in terms of administration.
2. The multi-criteria analysis methodology is suitable to approach a complex problem such as selecting the metrics from the SCOR model, since there is a wide range of metrics, to identify those that best fit measuring the equally complex management of a supply chain, given its poor integration characteristics. Above all, this tool offers an alternative to adapt and propose an improvement route for the administration of the chain by using a widely accepted model such as the SCOR as reference for measuring the management of supply chains.
3. The sensitivity analysis shows that there are no major changes in the selected metrics when changing the weights of the metrics of the process, which points to an adequate soundness of the selected metrics, and it enables us to trust the application of these indicators as a starting point for a process of management improvement.
4. Developing a work plan is vital as a starting point for management measuring, but also as a proposal of adjustment and adaptation of an alternative route to implement the SCOR model in a fruit-growing chain that, in this case study, becomes highly important given the potentially great contributions it could bring to the development of small fruit-growers.

Bibliography

[1] Palma-Mendoza, J., Neailey, K. and Roy, R., Business process re-design methodology to support supply chain integration, International Journal of Information Management, pp. 167-176, 2014.

[2] Huan, S., Sheoran, S. and Wang, G., A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model, Supply Chain Management: An International Journal, pp. 23-29, 2004.

[3] Stewart, M., Determinants of corporate borrowing, Financial Economics, pp. 147-175, 1977.

[4] Carretero, L. y Pires, S., Gestión de la cadena de suministros., Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2007.

[5] Patiño, A. and Alfaro, J.J., Análisis del modelo SCOR y su aplicación a una cadena de suministro del sector del automóvil., Tesis de grado, Universidad Politecnica, Valencia, 2008.

[6] Granillo-Macías, R. y Robles-Santana, F., Identificación de atributos para la medición del desempeño del sistema producto cebada en México, Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, pp. 132-154, 2012.

[7] Aramyan, L.H., Oude Lansink, A.G., Van der Vorst, J.G. and Van Kooten, O., Performance measurement in agri-food supply chains: A case study, Supply Chain Management: An International Journal, pp. 304-315, 2007.

[8] Vianchá-Sanchez, Z.H., Modelos y configuraciones de cadenas de suministro en productos perecederos, Ingenieria y Desarrollo, pp. 138-154, 2014.

[9] Arango-Serna, M.D., Adarme-Jaimes, W. y Zapata-Cortes, J.A, Gestión cadena de abastecimiento - logistica con indicadores bajo incertidumbre, caso aplicado sector panificador Palmira, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, pp. 97-115, 2010.

[10] Cámara de Comercio de Buga, Informe Agrop. Buga 2010 - 2013 y propuesta nodos, Guadalajara de Buga, 2013.

[11] Saaty, T., The analytic hierarchy process, New York.: McGraw-Hill, 1980.

[12] García-Cascales, M.S. and Lamata, M., Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process, Computers & Industrial Engineering, pp. 1442-1451, 2009.

[13] Peña, D.L., Ramírez, G., Posada, D., García, K. y Salazar, A., Integración logística comercial para el sector productivo de la zona media rural de la ciudad de Buga en el centro del Valle del Cauca: caso de estudio corregimiento de Monterrey, Universidad del Valle, Guadalajara de Buga, 2015.

[14] Vidal, C.J. y Bravo, J.J., Guía metodológica para la priorización de proyectos: Un enfoque aplicado a la infraestructura, la logística y la conectividad, Cali: Sello Editorial Javeriano, 2012.
[15] Yu, O., in Technology portfolio planning and management, Springer, 2006.

D.L. Peña-Orozco, received the BSc. Eng in Industrial Engineering in 1992, Sp. degree in total quality and productivity in 1995 and MSc. degree in Industrial Engineering with emphasis in logistics in 2013, all of them from the Universidad del Valle. MSc. dregree in Business Administration from Universidad ICESI in Cali, Colombia and Tulane University in New Orleans, USA, in 2014. He is currently a doctoral student in engineering at the Universidad del Valle. He worked as a teacher and coordinator of the Industrial Engineering program at the University of Valle - Buga, for 23 years (1992-2016).
ORCID: 0000-0002-4301-0271

L. Rivera, PhD. in Industrial & Systems Engineering, Virginia Tech. Blacksburg, Virginia. M.S.I.E., Georgia Tech. Atlanta. Is BSc. in Industrial Eng., Universidad del Valle, Colombia. Between 1997 and 2014 he was a full-time professor at ICESI University. He held the positions of director of the Industrial Engineering Program (1998-2003 and 2007-2009), director of the Master's degree in Industrial Engineering (2010-2012) and director of the Industrial Engineering Department (2009-2013). Between 1997 and 1998 he was director of Technological Development at the Pacific Productivity Center. Since the second semester of 2017 he has been the postgraduate coordinator of the Industrial Engineering School in the Universidad del Valle.
ORCID: 0000-0001-9942-5188

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Administrativa e Ingeniería Industrial

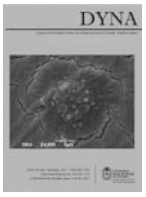
Oferta de Posgrados

Especialización en Gestión Empresarial
Especialización en Ingeniería Financiera
Maestría en Ingeniería Administrativa
Maestría en Ingeniería Industrial
Doctorado en Ingeniería - Industria y Organizaciones

Mayor información:

E-mail: acia_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 02

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Statistical techniques in an alternative to support decision making with small samples: A contribution based on Bootstrap

Bárbara Mariela López-Aguilar [a], José Alberto Vilalta-Alonso [a], Carlos Vaquero-Puerta [b] & Guillermo Vilalta-Alonso [c]

[a] *Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.marilopez@ind.cujae.edu.cu, jvilalta@ind.cujae.edu.cu*
[b] *Servicio de Angiología y Cirugía Vascular, Hospital Clínico Universitario, Valladolid, España, cvaquero@med.uva.es*
[c] *Universidad Federal de Sao Joao del Rei (UFSJ), Sao Joao del Rei, Minas Gerais, Brasil. gvilalta@ufsj.edu.br*

Received: November 07th, 2016. Received in revised form: September 07th, 2017. Accepted: October 25th, 2017.

Abstract
Making decisions is an important part of the work of any professional depending largely on the quality of the data and techniques used, which have limitations when the sample size is small and there is much variability in the observations. A methodology based on Bootstrap is used in the analysis of correlation between hemodynamic parameters within the aneurysmal sac and geometric indices characterizing Aneurysms of the Abdominal Aorta (AAA) by studying a sample of 13-aneurysm patients of the University hospital of Valladolid. The indices that best correlate with hemodynamics parameters are length, the eccentricity and the diameter of the iliac right. The results are very similar to those obtained by conventional methods; provide a reliable alternative to support decision-making

Keywords: Aneurysms of the abdominal aorta; statistical techniques; bootstrap; small samples.

Técnicas estadísticas en una alternativa de apoyo a la toma de decisiones con muestras pequeñas: Una contribución basada en Bootstrap

Resumen
Tomar decisiones es parte importante del trabajo de cualquier profesional dependiendo en buena medida de la calidad de los datos y de las técnicas utilizadas, las que presentan limitaciones cuando el tamaño de muestra es pequeño y hay mucha variabilidad en las observaciones. Una metodología basada en Bootstrap es empleada en la realización de análisis de correlación entre los parámetros hemodinámicos en el interior del saco aneurismático y los índices geométricos que caracterizan los Aneurismas de la Aorta Abdominal (AAA) mediante el estudio de una muestra de 13 pacientes aneurismáticos del Hospital Clínico Universitario de Valladolid. Los índices que mejor correlacionan con los parámetros hemodinámicos son longitud, la excentricidad y el diámetro de la ilíaca derecha. Los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos por los métodos clásicos, constituyendo una alternativa confiable en apoyo a la toma de decisiones.

Palabras clave: Aneurismas de la aorta abdominal; estadística; remuestreo; muestras pequeñas.

1. Introducción

Gran parte del trabajo de un profesional está relacionado con el proceso de toma de decisiones, bajo condiciones de incertidumbres y/o ignorancia parcial, que necesariamente existen en muchas de sus actividades. La toma de decisiones es definida por Koontz y Weihrich como la selección de un curso de acción entre distintas alternativas. La efectividad de las decisiones a tomar dependerá en gran medida de la calidad de los datos extraídos de cada proceso y del procesamiento de los mismos para convertirlos en información, de aquí que la abundancia de datos no necesariamente significa abundancia de información.

Usualmente, las decisiones que los profesionales

How to cite: López-Aguilar, B.M., Vilalta-Alonso, J.A., Vaquero-Puerta, C. and Vilalta-Alonso G., Técnicas estadísticas en una alternativa de apoyo a la toma de decisiones con muestras pequeñas: una contribución basada en bootstrap DYNA, 84(203), pp. 316-321, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

necesitan tomar ante cada situación, están a merced de qué tan grande sea la brecha entre el estado real y el deseado, de los recursos que se dispongan para implementar soluciones, y del impacto que provoquen, todo ello en el menor tiempo posible, ya que este último recurso es el único que no para de consumirse y muchas veces el éxito de las decisiones depende de qué tan bien se optimice el mismo [1].

Millones de personas depositan a diario sus esperanzas de vivir en las decisiones de los facultativos clínicos, de aquí que el proceso de toma de decisiones en el que estos se ven inmersos presenta la característica de que debe ser rápido, efectivo y con mínima posibilidad de error, pues de ello va a depender la vida de esas personas.

En el ámbito clínico, el aneurisma de aorta abdominal (AAA) es considerado a día de hoy como uno de los principales problemas de salud debido al incremento de su incidencia y a las estadísticas adversas cuando ocurre la ruptura de un aneurisma. De aquí que uno de los grandes retos al que se enfrentan los cirujanos vasculares lo constituye la predicción de la ruptura de AAA, ya que esta patología se ha convertido en una de las principales causas de muerte en el mundo [2]. Un aneurisma surge cuando una sección debilitada de una arteria no puede resistir la presión del flujo sanguíneo y se deforma. Si bien el aneurisma puede formarse en cualquier arteria del cuerpo, es más común en la aorta[1] abdominal, los denominados aneurismas de aorta abdominal, y en las arterias ilíacas[2] [3].

Sin embargo, el proceso de toma de decisiones sobre el tratamiento adecuado para pacientes aneurismáticos resulta complejo debido a las características de esta patología en la que influyen factores biológicos y morfométricos. En la gran mayoría de los casos la aparición y desarrollo del AAA es asintomático por lo que se diagnostican de manera incidental, frecuentemente en estado avanzado de desarrollo, o sea, cuando el diámetro máximo es mayor que 45-50 mm. Según plantean estudios realizados, aproximadamente el 90% de los pacientes que sufren ruptura mueren antes de llegar al hospital y del 10% que lo consigue solo sobrevive del 35% al 70%. Por otra parte, los procesos quirúrgicos asociados a la reparación de los AAA, tienen un costo muy elevado y en ocasiones, debido a un mal criterio en la predicción del nivel de riesgo de ruptura, estas pueden ser innecesarias o, incluso, peligrosas por el elevado riesgo que los procesos quirúrgicos traen consigo. En algunos casos, los riesgos asociados a la cirugía son mayores que los riesgos asociados a las posibilidades de ruptura del aneurisma.

Recientemente, y con el objetivo de mejorar la predicción del riesgo de ruptura, han sido propuestos diferentes criterios para evaluar las posibilidades de ruptura de un aneurisma específico. Algunos de estos índices están basados en parámetros puramente geométricos, otros se basan en los procesos biológicos de degeneración de la pared aortica y otros comienzan a abordar este complejo fenómeno de una forma más global, considerando la necesaria interacción entre todos los factores asociados al aneurisma. Estos últimos son conocidos como factores biomecánicos [4-6]. Debido a esto, hoy existe una mayor comprensión del fenómeno asociado al surgimiento, desarrollo y ruptura, pero aún no existe un claro consenso sobre la efectividad de estos índices en la predicción precisa del riesgo de ruptura.

Actualmente, existe consenso que la morfometría de un aneurisma puede condicionar su ruptura. La variación temporal en la forma y tamaño del aneurisma determina alteraciones en las tensiones hemodinámicas sobre la pared arterial estableciéndose de esa forma un acoplamiento bidireccional, fluido-pared-fluido, que puede acelerar el crecimiento y, consecuentemente, aumentar el riesgo de ruptura.

De aquí, se hace evidente la necesidad cuantificar la morfometría, sobre bases personalizadas, en cada paciente en tratamiento de seguimiento, lo que puede representar un método válido para estimar el riesgo de ruptura.

La necesidad de analizar datos, marcados por la complejidad aportada por las características biológicas y personalizadas de cada paciente, otorga un papel importante a las técnicas estadísticas, las que permiten recolectar, presentar, analizar e interpretar datos para convertirlos en información y así ayudar a una toma de decisiones más objetivas. Pero la mayoría de ellas son restrictivas en cuanto al cumplimiento de determinados supuestos teóricos y presentan limitaciones cuando se abordan problemas complejos, con distribuciones desconocidas o cuando el tamaño de muestra es muy pequeño y hay mucha variabilidad en las observaciones, como es el caso que se presenta en esta investigación. Para tratar esta problemática sobre la predicción del riesgo de ruptura de los AAA, se propone una metodología basada en uno de los métodos de remuestreo, denominado Bootstrap, empleada fundamentalmente en la realización de análisis de correlación, en este caso, entre los índices que caracterizan la morfometría del aneurisma y las tensiones hemodinámicas que actúan sobre la pared aneurismática.

2. Materiales y métodos

2.1. Aneurismas de la aorta abdominal

La muestra de aneurismas seleccionados para la realización del presente trabajo, se corresponden a 13 pacientes que se encuentran en tratamiento de seguimiento en el Hospital Clínico Universitario de Valladolid, España.

Los pacientes incluidos en el estudio fueron seleccionados aleatoriamente, destacándose la existencia de AAA en diferentes etapas de desarrollo de la patología, aunque estratégicamente, en esta etapa de la investigación, fueron seleccionados aneurismas en la primera fase de desarrollo, o sea, aneurismas que pueden ser considerados como pequeños.

Las tomografías axial computadorizada (TAC), que son realizadas periódicamente a los pacientes en tratamiento de seguimiento, de los pacientes que participan del estudio, fueron segmentadas y los modelos geométricos 3D que representan

[1]La aorta es la principal arteria que transporta sangre cargada de oxígeno desde el corazón a todas las demás partes del cuerpo.
Se trata de la arteria más grande del cuerpo: se extiende desde el tórax hasta el abdomen, donde se ramifica (bifurca) en las arterias ilíacas.

[2]Dos arterias que abastecen de sangre a las piernas y conectan la aorta con las arterias femorales de cada pierna.

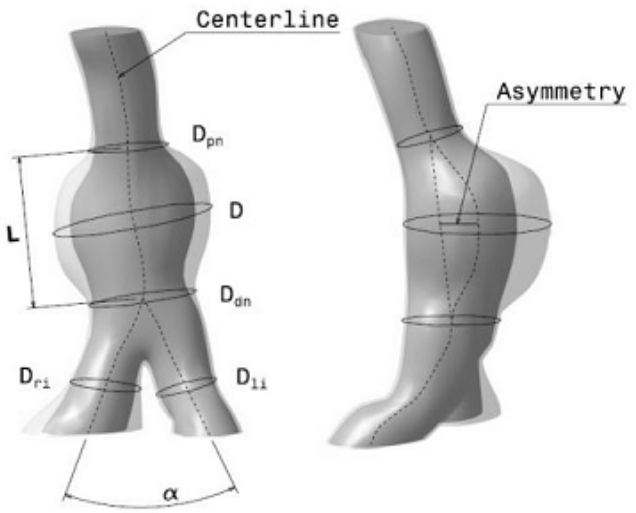


Figura 1. Representación esquemática de los principales parámetros geométricos de los AAA basados en la línea central del lumen.
Source: [17]

el AAA real fueron reconstruidos. La segmentación del lumen del AAA ha sido realizada por medio de software de procesamiento de imágenes como MevisLab y Vmtk. La premisa básica utilizada en el trabajo es que los índices geométricos puedan ser definidos a partir de parámetros geométricos de fácil determinación en los TAC. En la Fig. 1, que muestra uno de los aneurismas segmentados en el presente estudio, se presentan algunos de los parámetros geométricos.

Fueron definidos 12 índices geométricos para cada uno de los 13 modelos utilizados en el trabajo.

Índices 1D: Diámetro máximo transversal (D), Diámetro del cuello proximal (Dcp), Diámetro del cuello distal (Dcd), Longitud del saco aneurismático (L), Diámetro de la ilíaca izquierda (Dii), Diámetro de la ilíaca derecha (Did), Ángulo de bifurcación las arterias iliacas (α) y Excentricidad (e).

Índices 3D: Tortuosidad (T), Curvatura (C), Volumen de saco aneurismático (VAAA).

Índices 0D: Tasa de deformación (χ) e Índice de dilatación (γ).

2.2. Metodología Bootstrap

La idea de fondo planteada por [7] es construir un modelo de probabilidad para determinados estadísticos a partir de la información proporcionada por la muestra, obviando los supuestos sobre la distribución teórica que son la base para hacer inferencias sobre la población. En este sentido, se supone que Xes una variable aleatoria (v.a.) y se tiene una muestra aleatoria de tamaño $n(x_1, x_2,\ldots, x_n)$, con función de distribución de probabilidades dada por $F_{(x)}= P(X_i \leq x)$. Lo cual se escribe $(x_1, x_2,\ldots, x_n) \sim F_{(x)}$ o simplemente $x \sim F_{(x)}$.

Cuando el valor del parámetro θ de una población es desconocido, y en consecuencia se desea utilizar el estimador $\hat{\theta}= f(x_1, x_2,\ldots, x_n,\theta)$, la distribución de $\hat{\theta}$es aproximada generando un conjunto de resultados independientes $\hat{\theta}^*_b$ para $b = 1, 2, \ldots, B$ (donde B constituye el número de remuestras realizadas) y construyendo la función de distribución empírica $\hat{F}_{(x)} = F_{n(x)} = \frac{1}{B}\sum_{i=1}^{B} P(X_i \leq x)$, donde $P(X_i \leq x) = 1$ si $X_i \leq x$ y 0 en otro caso.

Como resultado de la aplicación del método Bootstrap, cada remuestra, será muy probablemente, algo diferente de la muestra original; con lo cual, un estadístico $\hat{\theta}^*$, calculado a partir de una de esas remuestras tomará un valor diferente del que produce otra remuestra y del $\hat{\theta}$ observado, y por tanto, según lo planteado [8], la distribución de frecuencias de esos $\hat{\theta}^*$, calculadas a partir de las remuestras, es una estimación de la distribución muestral de $\hat{\theta}$.

La afirmación anterior, que se podría considerar como la idea fundamental del Bootstrap, supone utilizar la muestra considerando que en sí misma contiene la información básica sobre la población, por tanto, la adecuación de este método será tanto mayor cuanta más información aporte la muestra sobre la población. Una consecuencia directa es que a medida que aumenta el tamaño de la muestra mejor será la estimación que se puede hacer sobre la distribución muestral de un estadístico. No obstante, incluso con muestras pequeñas, entre 10 y 20 casos, el método Bootstrap puede ofrecer resultados correctos [9], juzgándose inadecuados para muestras de tamaño inferior a 5[10].

2.2.1. Análisis de correlación con Boostrap

A continuación se presenta el análisis de correlación realizado empleando este método. Por el papel que juegan en este análisis, previamente se presentan algunas ideas relacionadas con la obtención de intervalos de confianza.

Según lo planteado por [11, 12] existen tres métodos a través de los cuales se pueden construir intervalos de confianza Bootstrap.

El primero de ellos, método de aproximación normal, utiliza la misma estructura de los procedimientos paramétricos en la construcción de intervalos de confianza; si el estadístico se distribuye según la curva normal pero el cálculo del error típico resulta analíticamente difícil o no existe fórmula para su cálculo, entonces se puede emplear la distribución muestral bootstrap para estimar el error estándar e insertarlo en la correspondiente expresión del intervalo de confianza paramétrico, resultando de la siguiente forma:

$$\hat{\theta} \pm Z_{\alpha/2} ES(\hat{\theta}^*) \quad (1)$$

Donde: Z = Valor de la variable normal estándar para el nivel de confianza determinado

$ES(\hat{\theta}^*)$ = estimación Bootstrap del error estándar.

Por otra parte, el método del percentil, hace uso literal de la idea del bootstrap para formar intervalos de confianza no paramétricos. Si, como ya se definió anteriormente, θ ˆ*b representa el orden de las estimaciones bootstrap realizadas del parámetro de interés y se supone además que se desea construir un (100 - α)% intervalo de confianza, entonces, si el número de replicaciones bootstrap (B) es grande, se pueden construir intervalos basados en los percentiles, donde los cuantiles α/2 y 1 - α/2 de $\hat{\theta}^*_b$, multiplicados por el número de replicaciones (B), son aproximadamente $\hat{\theta}^*$(inferior) y $\hat{\theta}^*$(superior) respectivamente; quedando de la siguiente manera:

$$\hat{\theta}^*_{(\text{inferior})} < \theta < \hat{\theta}^*_{(\text{superior})} \quad (2)$$

$$\hat{\theta}^*_{(B(\alpha/2))} < \theta < \hat{\theta}^*_{(B(1-\alpha/2))} \quad (3)$$

Es importante destacar que si los limites inferior y superior no son números enteros, entonces se puede interpolar con los números adyacentes a este o redondeándolo al entero más cercano.

En [11], los autores plantean que el tercer método, el de los percentiles corregidos, es similar al procedimiento anterior; lo único que cambia es el modo de calcular los percentiles para obtener el intervalo; se requiere de $Z\alpha_{/2}$(valor unitario normal con probabilidad $\alpha_{/2}$ de ser cierta) y dos factores de corrección, Z y A, que se definen de la siguiente manera:

$$Z \equiv \Phi^{-1}\left(\sum_{b=1}^{B} \#(\hat{\theta}^* b < \hat{\theta})/B\right) \quad (4)$$

Donde: Φ^{-1}: Inversa de la función de distribución normal estándar.

$\#(\hat{\theta}^* b < \hat{\theta})/B$: Proporción de remuestras bootstrap cuyo valor se encuentra por debajo del valor estimado del estadístico de interés en la muestra original.

Si la función de distribución de las muestras bootstrap es simétrica o el estimador $\hat{\theta}$ es insesgado, entonces dicha proporción será cercana a 0.5 y el factor de corrección Z estará cercano a cero.

$$A \equiv \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{\theta}_{(-i)} - \overline{\theta})^3}{6\left[\sum_{i=1}^{n}(\hat{\theta}_{(-i)} - \overline{\theta})^2\right]^{3/2}} \quad (5)$$

Donde: $\hat{\theta}_{(-i)}$ = Valor de $\hat{\theta}$ producido cuando la $i-$ésima observación es eliminada de la muestra.[3]

Posteriormente, con los factores de corrección Z y A, se computan:

$$A_1 \equiv \Phi\left[Z + \frac{Z - z_{\alpha/2}}{1 - A(Z + z_{\alpha/2})}\right] \quad (6)$$

Destacar que cuando los factores de corrección Z y A son cero, $A_1 = \Phi(-z_{\alpha/2}) = \alpha/2$ y $A2 = \Phi(z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha/2$. Los valores $A1$ y $A2$ son usados, multiplicados por el número de réplicas bootstrap realizadas, para construir los límites inferior y superior del intervalo de confianza, quedando de la siguiente manera:

Este método, según plantea [11], es el más adecuado, ya que corrige la asimetría que pudiera presentar la distribución muestral del estadístico.

$$A_2 \equiv \Phi\left[Z + \frac{Z + z_{\alpha/2}}{1 - A(Z + z_{\alpha/2})}\right] \quad (7)$$

$$\hat{\theta}^*_{(\text{inferior})} < \theta < \hat{\theta}^*_{(\text{superior})} \quad (8)$$

$$\hat{\theta}^*_{(BA_1)} < \theta < \hat{\theta}^*_{(BA_2)} \quad (9)$$

Más que una utilización de manera aislada, este método se presta a la combinación con otras técnicas estadísticas para complementar otras aplicaciones dentro de las que se encuentran: problemas de estimación, ajuste de modelos de regresión, contraste de hipótesis, análisis de componentes principales, entre otras, presentadas en [11] y, por citar otros ejemplos, se han tratado aplicaciones a los coeficientes de correlación [12,13], al análisis factorial [14] o a los modelos de ecuaciones estructurales [15,16].

En este estudio se presenta la metodología Bootstrap aplicada en análisis de correlación, el cual se realizó para cada uno de los parámetros hemodinámicos y los índices geométricos definidos. Debido al elevado número de pares de variables a estudiar, y a que la metodología Bootstrap es análoga para todos los análisis, se decidió explicar el procedimiento y ejemplificarlo para el par de variables PWSS y D. Posteriormente se resumen los restantes resultados con la interpretación de los mismos.

1. A partir de la muestra original se extrae una nueva muestra de igual tamaño que la misma, por medio de muestreo aleatorio con reposición. De este modo, cada observación individual tiene una probabilidad 1/n de ser elegida cada vez, como si el muestreo se realizara sin reposición en un universo infinitamente grande construido a partir de la información que provee la muestra.

Es importante tener en cuenta que el remuestreo,al realizarse con reemplazamiento, implica que un mismo valor puede aparecer repetido más de una vez e incluso no aparecer en alguna de las submuestras, además se debe tratar cada observación como una unidad, o sea, cuando se remuestree no se pueden tratar las variables de forma independiente.

En la Tabla 1 se muestra la primera submuestra obtenida y se observa cómo se repiten valores de diámetro en la misma, y para cada valor de PWSS remuestreado se le hizo corresponder su original valor de D, manteniendo la integridad de cada observación.

2. Para la muestra obtenida se calcula el valor de un determinado estadístico que se utiliza como estimador del parámetro poblacional, en cuyo estudio se esté interesado.

En este caso se está interesado en estudiar el grado de relación lineal que existe entre estas variables, por lo que el parámetro objeto de estudio es el coeficiente de correlación poblacional (ρ) y el estadístico que se empleará para estimar el mismo es el coeficiente de correlación de Pearson (r). El mismo para la muestra original es de -0,17 y el de la primera submuestra es de -0,36.

3. Se repiten los dos pasos anteriores, hasta obtener un elevado número de estimaciones. En este punto, el empleo de herramientas informáticas que desarrollen las tareas de selección de muestras y determinación de las estimaciones resultará ineludible.

Teóricamente la magnitud de B en la práctica depende de las pruebas que se van a aplicar a los datos. En [8] los autores afirman que, B debería ser de entre 50 a 200 para estimar el error típico de $\hat{\theta}$, y de al menos 1000 para estimar intervalos de confianza alrededor de θˆpor el método del percentil. Sin

[3]El $\hat{\theta}_{(-i)}$ es llamado valor jackknife del estadístico $\hat{\theta}$; y puede ser usado como una alternativa del bootstrap para formar intervalos de confianza no paramétricos para θ.

Tabla 1.
Valores de la muestra original y de la primera muestra bootstrap.

Modelos	Muestra original		Primera remuestra	
	PWSS (Pa)	D (mm)	PWSS (Pa)	D (mm)
A	3.19	30.34	6.4707	37.28
B	0.414	33.07	4.42	42.96
C	4.42	42.96	11.02	40.05
D	6.1	41.39	6.29	40.88
E	13.2	34.8	0.414	33.07
F	17.6	33.51	4.5065	37.52
G	11.02	40.05	3.38	50.99
H	3.38	50.99	4.2153	29.81
I	6.4707	37.28	3.38	50.99
J	6.29	40.88	13.2	34.8
K	2.1686	42.23	17.6	33.51
L	4.2153	29.81	3.38	50.99
M	4.5065	37.52	2.1686	42.23

Fuente: Elaboración propia.

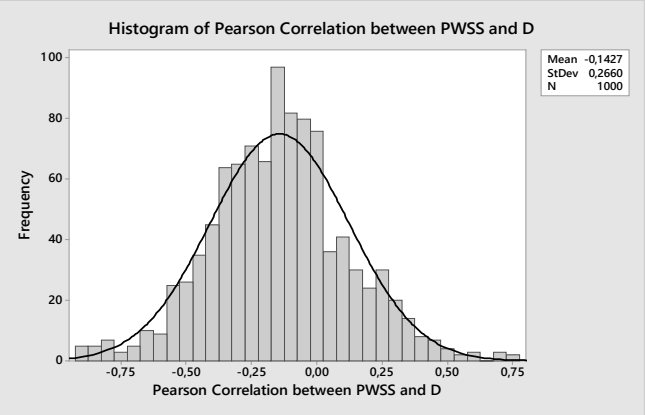


Figura 2. Histograma de las correlaciones entre PWSS y D.
Fuente: Software Minitab,versión 17.

embargo, esto tiene reducida importancia en la actualidad, pues las computadoras son tan rápidas que no tiene sentido tener un afán especial en trabajar con valores bajos de B y, por otra parte, nunca es pernicioso que B sea demasiado grande. Por lo general, con B=1000 se suelen conseguir buenos resultados y valores de B superiores a 5000 ya no agregan ninguna ventaja.

4. Se construye la función de distribución empírica del estadístico, asignando una probabilidad de 1/B a cada punto, que representa una buena aproximación a la verdadera distribución de probabilidad para ese estadístico.

Luego de obtener los 1000 valores del estimador se ordenan de forma ascendente para construir la tabla de frecuencias y el histograma correspondiente. Posteriormente se busca la media del estimador de interés y el intervalo de confianza para la misma.

La media de todos los valores de r se calculó como:

$$\bar{r}* = \frac{1}{1000}\sum_{b=1}^{1000}\hat{r}_b^* = -0.1427 \quad (10)$$

Para conformar el intervalo de confianza se empleó el método de los percentiles, pues el mismo se emplea como una variante no paramétrica cuando se desconocen los parámetros de la variable a nivel poblacional, como es el caso. Los límites del intervalo se calcularon de la siguiente manera, empleándose un nivel de confianza del 95%:

$$\hat{r}^*_{(\text{inferior})} < r < \hat{r}^*_{(\text{superior})} \quad (11)$$

$$\hat{r}^*_{(B(\alpha/2))} < r < \hat{r}^*_{(B(1-\alpha/2))} \quad (12)$$

$$\hat{r}^*_{(1000(0{,}05/2))} < r < \hat{r}^*_{(1000(1-0{,}05/2))} \quad (13)$$

$$\hat{r}^*_{(25)} < r < \hat{r}^*_{(975)} \quad (14)$$

Estos valores correspondientes a los límites inferior y superior del intervalo se buscan en la tabla donde se encuentran los 1000 valores ordenados de r, y se toman los pertenecientes a las observaciones 25 y 975, quedando de la siguiente manera:

Tabla 2.
Correlaciones de PWSS vs. Índices 1D, 3D y 0D.

		PWSS		
		Valor medio de r de las muestras Bootstrap	Límite inferior	Límite superior
Índices 1D	D	-0,142	-0,671	0,404
	Dcp	-0,076	-0,566	0,645
	Dcd	0,059	-0,374	0,545
	L	0,686	0,211	0,923
	Dii	0,248	-0,469	0,719
	Did	-0,266	-0,639	0,266
	α	0,369	-0,329	0,763
	e	-0,617	-0,885	-0,146
Índices 3D	C	-0,094	-0,508	0,663
	T	0,032	-0,607	0,734
	V	-0,359	-0,758	0,125
Índices 0D	D/d	-0,058	-0,555	0,448
	D/L	-0,539	-0,870	0,083

Fuente: Elaboración propia.

$$-0.6718 < r < 0.4042 \quad (15)$$

El intervalo de confianza formado también se puede verificar en la Fig. 2 donde se muestra el histograma correspondiente a este ejemplo.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de correlación de la Tensión de cizallamiento máxima de pared (PWSS) vs. Índices 1D, 3D y 0D empleando el método Bootstrap

Los valores medios de r de las remuestras Bootstrap se presentan en la Tabla 2 para cada uno de los índices 1D, 3D y 0D. Pude observarse que los índices que mejor correlacionan con la PWSS son la longitud, la excentricidad y el índice de dilatación. A pesar de que existen algunos resultados por debajo de los de la muestra original, se encuentran bastantes cercanos a la misma, validando los resultados obtenidos en el análisis de correlación realizados en [17].

Tabla 3.
Correlaciones de PIP vs. Índices 1D, 3D y 0D.

		PIP		
		Valor medio de r de las muestras Bootstrap	**Límite inferior**	**Límite superior**
Índices 1D	D	-0,073	-0,511	0,460
	Dcp	0,138	-0,544	0,648
	Dcd	-0,244	-0,646	0,222
	L	0,526	-0,021	0,857
	Dii	-0,161	-0,858	0,489
	Did	-0,488	-0,852	0,152
	α	0,019	-0,521	0,523
	e	-0,407	-0,808	0,270
Índices 3D	C	-0,222	-0,673	0,182
	T	-0,032	-0,618	0,628
	V	-0,234	-0,669	0,232
Índices 0D	D/d	-0,178	-0,687	0,430
	D/L	-0,405	-0,788	0,145

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Análisis de correlación de la Presión intraluminal máxima (PIP) vs. Índices 1D, 3D y 0D empleando el método Bootstrap

En la Tabla 3 se presentan los valores medios de r de las remuestras Bootstrap para cada uno de los índices geométricos. Puede verse que los índices que mejor correlacionan con la PIP son longitud, la excentricidad y el diámetro de la ilíaca derecha. A pesar de que existen algunos resultados por debajo de los de la muestra original, se encuentran bastantes cercanos a la misma, validando los resultados obtenidos en [17].

4. Conclusiones

En este trabajo se demuestra la conveniencia del uso de una metodología basada en Boostrap para mejorar la calidad de las decisiones que se toman en situaciones donde el tamaño de muestra es pequeño, existe mucha variabilidad y se desconoce la distribución teórica de la población, aportando una nueva alternativa en estas situaciones. Al aplicar esta metodología se obtuvieron resultados similares a los obtenidos por los métodos tradicionales, pero con mayor confiabilidad, aportada por el uso de esta metodología.

Bibliografía

[1] Hampton, D.R., Administración, São Paulo, Atlas, 1976.

[2] Vilalta, G., Nieto, F., Vilalta, J.A., Vaquero, C., Rueda, M.A. and Lipsa, L.M., Patient-specific clinical assessment of abdominal aortic aneurysm rupture risk based on its geometric parameters, Proceedings of the IASTED International Conference, Biomedical Engineering (Biomed), 2011 pp. 459-466. DOI: 10.2316/P.2011.723-051.

[3] Vilalta, G., Nieto, F., Rodríguez, M., Laurentiu L., O´Connor J., and Dounié, O., Influence of abdominal aortic aneurysms geometry in the blood flow dynamics and in its rupture risk. Ingeniería Mecánica [Online] 12(2), 2006, Available at: http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/64

[4] Fillinger, M.F., Marra, S.P., Raghavan, M.L. and Kennedy, F.E., Prediction of rupture risk in abdominal aortic aneurysm during observation: Wall stress versus diameter, Journal of Vascular Surgery, 37(4), pp. 724-732, 2003. DOI: 10.1067/mva.2003.213

[5] Georgakarakos, E., Ioannou, C.V., Kamarianakis, Y., Papaharilaou, Y., Kostas, T., Manousaki, E. and Katsamouris, A.N., The role of geometric parameters in the prediction of abdominal aortic aneurysm wall stress, European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 39(1), pp. 42-48, 2010. DOI: 10.1016/j.ejvs.2009.09.026

[6] Vilalta, G., Nieto, F., Vilalta, J.A., Vaquero, C., Rueda, M.A. y Lipsa, L.M., Predicción del riesgo de ruptura de aneurismas de aorta abdominal. Método basado en los biodeterminantes geométricos, Dyna Ingeniería e Industria, 87(1), pp. 66-73, 2012. DOI: 10.6036/4145

[7] Efron, B., Bootstrap methods: Another look at the jackknife, The Annals of Statistics 7, pp. 1-26, 1979.

[8] Efron, B. and Tibshirani, R.J., Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy, Statistical Science, 1(1), pp. 54-75, 1986.

[9] Bickel, P.J. and Krieger, A.M., Confidence bands for a distribution function using bootstrap, Journal of the American Statistical Association, 84(405), pp. 95-100, 1989.

[10] Chernick, M.R., Bootstrap methods: A guide for practitioners and researchers, Nueva York, Wiley, John &Sons Incorporated, 1999.

[11] Efron, B. and Tibshirani, R.J., An introduction to the Bootstrap, London, Chapman and Hall, 1993.

[12] Moles, A.M., El método de remuestreo y su aplicación a la investigación biomédica. Tesis de Especialidad en Bioestadística, Escuela Nacional de Salud Pública Carlos J. Finlay, La Habana, Cuba, 2003.

[13] Harris, D.J. and Kolen, M.J., Bootstrap and traditional standard errors of the point biserial, Educational and Psychological Measurement, 48(1), pp. 43-51, 1988. DOI: 10.1177/001316448804800106

[14] Ichikawa, M. and Konishi, S., Application of the bootstrap methods in factor analysis. Psychometrika, 60(1), pp. 77-93, 1995.

[15] Nevitt, J., and Hancock, G.R., Performance of bootstrapping approaches to model test statistics and parameter standard error estimation in structural equation modeling, Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal, 8(3), pp. 353-377, 2001.

[16] Hancock, G.R. and Nevitt, J., Bootstrapping and the identification of exogenous latent variables with in structural equation models, Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal, 6(4), pp. 394-399, 1999. DOI: 10.1080/10705519909540142

[17] Vilalta, G., Vilalta, J.A., Soudah, E., Nieto, F., Lipsa, L.M., Pérez, M.Á., López, B.M. and Vaquero, C., Statistical analysis for rupture risk prediction of abdominal aortic aneurysm (AAA) based on its morphology, Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 17(3), 2017. DOI: 10.1142/S0219519417500658

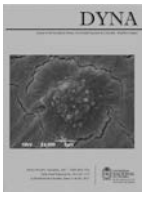
B.M. López-Aguilar, es Ing. Industrial de la Universidad Tecnológica de La Habana/CUJAE, Cuba. Actualmente profesora instructor del Departamento de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería Industrial de la CUJAE.
ORCID: 0000-0002- 5823-8041

J.A. Vilalta-Alonso, es Ing. Industrial, Dr. en Ciencias Técnicas por la Universidad Tecnológica de La Habana/CUJAE, Cuba, en 2008. Profesor titular del Departamento de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería Industrial de la CUJAE. Es presidente de la Comisión Nacional de Carrera de Ingeniería Industrial de la República de Cuba.
ORCID: 0000-0001-7505-8918

C. Vaquero-Puerta, es Dr. en Medicina y profesor titular de la Facultad de Medicina de la Universidad de Valladolid/España. Director del Servicio de Angiología y Cirugía Vascular del Hospital Universitario de Valladolid/España. Es vicepresidente del capítulo de Cirugía Endovascular de la Sociedad Española de Angiología y Cirugía Endovascular. Director y Editor jefe de la Revista Española de Investigaciones Quirúrgicas.
ORCID: 0000-0002-2195-1679

G. Vilalta-Alonso, es Dr. en Ing. Mecánica, desde 2000, por la Universidad de São Paulo/Brasil. Actualmente profesor adjunto del Departamento de Ciencias Térmicas y los Fluidos de la Universidad Federal de São João del-Rei/Brasil.
ORCID: 0000-0002-9587-8697

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Using the MACBETH Method to improve the scenario analysis tool PESTEL in large civil construction projects

José Geraldo Lamas Leite [a], Luiz Carlos Brasil de Brito Mello [a], João Carlos Correia Baptista Soares de Mello [a], Eduardo Picanço Cruz [b] & Carlos Navarro Fontanillas [b]

[a] *Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil. josegeraldouff@yahoo.com.br, luiz.brasil@gmail.com, joaocsmello@gmail.com*
[b] *Faculdade de Administração, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil. epicanco@id.uff.br, navarro.ufrj@gmail.com*

Received: May 5th, de 2017. Received in revised form: October 27th, 2017. Accepted: November 1rd, 2017

Abstract
The paper presents a methodological study performing a prioritization of the PESTEL analysis factors on the pre-construction and assembly environments of large civil engineering projects. The objective is to test if it is possible to use the decision making support methodology MACBETH to generate a hierarchy scale among criteria that might behave as a Pareto distribution. According to an expert choice, four of the ten alternatives represent 72.16% of the preference of the consulted expert. The answer does not represent a Pareto distribution, but does not invalidate the hypothesis. It is possible that the judgment of some specialist comes closer to such a phenomenon.

Keywords: Decision-making; multicriteria; civil engineering projects.

Usando el Método MACBETH para mejorar la herramienta de análisis de escenarios PESTEL en grandes proyectos de construcción civil

Resumen
El artículo presenta un estudio metodológico que realiza una priorización de los factores de análisis PESTEL en los entornos de pre-construcción y montaje de grandes proyectos de ingeniería civil. El objetivo es comprobar si es posible utilizar la metodología de apoyo a la toma de decisiones MACBETH para generar una escala de jerarquía entre los criterios que podrían comportarse como una distribución de Pareto. Según una elección de un experto, cuatro de las diez alternativas representan 72,16% de la preferencia del experto consultado. La respuesta no representa una distribución de Pareto, pero no invalida la hipótesis. Es posible que el juicio de algún especialista se acerque a tal fenómeno.

Palabras clave: Toma de decisiones; multicriterios; proyectos de ingeniería civil.

1. Introduction

The present paper has as its main feature being a methodological study aiming at, from the Macbeth method of decision making developed by [1], performing a prioritization of the PESTEL analysis factors on the pre-construction and assembly environments of large civil engineering projects. In this sense, the main hypothesis is that the Macbeth method must be able to generate a Pareto distribution [2] where there are "few, but of great importance" and "many, but of little importance" factors.

The instability revealed in a crisis situation in institutions always allows a reflection on the impacts of any actions on the most varied fronts. In the case of large civil engineering projects, this reflection must be elaborated collectively and with the greatest methodological severity, because of the volume required for their application, as well as their impacts.

How to cite: Leite, J.G.L., Mello, L.C.B.B., de Mello, J.C.C.B.S., Cruz, E.P. and Fontanillase, C.N., Using the MACBETH method to improve the scenario analysis tool PESTEL in large civil construction projects DYNA, 84(203), pp. 322-327, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

Concerning such civil engineering projects, a literature review allows identifying that this area, throughout the years, has absorbed management concepts in order to improve the quality and rationalize the execution on the construction sites. However, depending on the magnitude of certain projects, more management elements may be required, mainly concerning planning and decision-making.

Projects which demand a long-term execution and which are indivisible such as the construction of refineries, hydropower and nuclear plants are normally finalized with external scenarios significantly different from those at the beginning. These infrastructure constructions are part of the agenda mainly on the BRICS countries, due to the necessity of growth and the opportunity emerged with the creation of the BRICS bank, which in its first resources release, in 2016, issued a total amount of US$ 811 million, for renewable energy projects in four of its member countries [3].

A research done by consultant Grant Thornton International revealed that the lack of investments in infrastructure in emerging countries such as the BRICS or in Latin American countries is the greatest challenge faced by entrepreneurs. According to the study, 45% of the companies in these countries mention the transport infrastructure as the greatest impairment to growth [4]. For instance, the construction of the Petrochemical Complex of Rio de Janeiro (Complexo Petroquímico do Estado do Rio de Janeiro – COMPERJ) is highlighted. The aforementioned construction started in March 2008 to be concluded in September 2012. After several schedule revisions, caused by externalities unpredicted in the initial project, it is estimated that the conclusion will occur in 2023 [5] – that is, if the current crisis in Brazil doesn't postpone this deadline once again.

Despite that, the high complexity of the construction works which involve the mentioned infrastructure projects demands a corresponding effort concerning the planning and the decision making - that is, a wide data survey and information processing. [6], on a seminal text on the multi-criteria methodologies for supporting decision making enumerate three axioms about the creation of criteria for the decision making: (i) exhaustibility (ii) cohesion; (iii) non-redundancy. It is expected that the decision makers, as they try to achieve exhaustibility when searching a set of criteria, find out that several of those are redundant. Thus, there must be a balance effect when one observes the axioms (i) and (iii). On the other hand, it is precisely the characteristic of projects that the present paper proposes to discuss which worries the authors: in studies of such a magnitude (complex, expensive and with high risks) the commitment to perform a exhaustive planning may be translated into a significant amount of judgment criteria, ignoring the third axiom.

The objective of the present paper is to test if it is possible to use the decision making support methodology MACBETH [1] to generate a hierarchy scale among criteria that might behave as a Pareto distribution. To this end, we have chosen to perform this study only with the economic dimension of the PESTEL tool (described in the next section). The choice, even though arbitrary, may be justified due to the fact that the economic studies have been under academic and empirical debate since 1776, following the publication of the book "The Wealth of Nations" by Adam Smith. Besides, the literature concerning investments assessment - commonly used for studies of feasibility of such projects - is prominently economic, based on traditional tools such as: Internal Rate of Return, Net Present Value and Payback Period.

2. PESTEL analysis

Being careful with the corporate strategy and the efficacy of project planning has been the main idea for value generation in the economic activities. However, the precision to build efficient management mechanisms while capable of boosting the strategies in the long term must be highlighted. In face of such an obstacle, the need to ponder the environments where the companies are found inserted is revealed, as well as establishing strategies compatible to the prospection of scenarios for the activity. It is also vital to survey the environmental aspects based on performance indicators, highlighting that they must be in line with the proposed methodology in order to make the decision making effective.

Surveys on this topic point towards supporting the decision making related to the strategic planning through two fundamental tools: SWOT and PESTEL analyses. [7] assembles a panel where the models PESTEL and SWOT indicate the panorama for the company and the strategic positioning likely to be taken. This environment has the possibility of finding elements that allow the assessment of which actions should be taken and positioning the company for the decision making, aiming at inferring which strategies may be used in their planning.

According to [8] the PESTEL analysis arose from the necessity of seeing the external environment of the organizations, in order to exhibit the threats and opportunities surrounding them, involved in several perspectives. The analysis serves to demonstrate several macro environmental factors in order to make it possible to understand the company's market position and orientate it for future organizational strategies. [7] concluded that the companies in general are affected by six macro environmental forces related to exogenous factors; being them: (P)political, (E)economic, (S)social, (T)technological, (E)environmental and (L)legal. The fundamental feature of these forces is that they are not under control of the organizations. Aiming at performing a macro environmental and sectoral diagnosis for the prospection of engineering scenarios, a qualitative approach of exploratory and descriptive natures was used. The management tools used for such a prospection were: PESTEL analysis and the decision making aid method Macbeth.

Thus, it is inherently necessary to create conditions for the organization to become effective in its decision process in face of the opportunities and threats related to the organizational environment. This paper enhances the economic factor in the scenario of civil construction projects. But, we may also include and prioritize several sub-criteria, as demonstrated in Fig. 1. In this manner, the methodology becomes an ideal tool in project management and monitoring processes, which may be used together with Delphi methods that use the consensus of opinions of a set of specialists about future occurrences.

However, despite offering the basic elements for a strategic analysis of scenarios, the texts that deal with the PESTEL tool do not offer a consensus about the subdivisions of each one of the six macro environmental forces. In this case, it is up to the executor of the planning project to define which elements shall be included in each one of them.

3. PESTEL analysis

A great number of current decisions involve economic-financial matters, having as fundamental base strictly quantitative aspects, translated into monetary values, distributed in periodic cash flows properly discounted by arbitrary fees. However, the decision theory expects such choices to be based on other qualitative aspects, not less important than the previous ones and which translate the nebulous environment that, as a general rule, is not internalized in the analysis. Such a circumstance may come to constitute a determinant source of failure or of inconsistency of a project yet to be chosen based on strictly quantitative criteria, for instance, in the case of a hydropower plant which would demand the flooding of an indigenous land to be built; how to price the environmental losses caused?

It is necessary to develop methodologies that may comprise quantitative and qualitative criteria at the same time, that is, where the decision maker may insert aspects connected to the business environment and political and behavioral scenarios.

The sophistication of decision models occurred when operational research emerged. The so-called Multi-Criteria Decisions - MCDA originated from this science, and form a set of techniques which aim at investigating a number of alternatives, considering multiple conflicting criteria and objectives [9]. Authors [10] highlight also that they allow a more efficient and realistic solution for complex problems which comprise several scenarios, players and criteria (tangible and intangible).

In the early 1970's, a conference was held in the University of South Carolina (USA) about the topic which, according to [11], began to take shape and organize itself in a "scientific community, formerly disperse, interested on mastering multi-criteria". The meeting Euro Working Group on multi-criteria Aid for Decisions was organized in 1975 in Brussels alongside with a conference which later formed the “International Society on Multiple Criteria Decision Making”. These two meetings are the origin of the two schools: the perspective decision making of the American school of multi-attribute utility and the current "aide à la décision" of the French school. Authors [12] state that the "French school is based in prevalence relationships" where the ELECTRE and PROMETHEE family methods are enhanced and the American school "reduces the several criteria to a summary criterion through a weighted sum in most of the cases. They also highlight the following methods: MAH, TODIM, MACBETH and UTA for the American school.

The MACBETH method aims at finding the cardinal and ordinal relationships amongst the criteria which determine the target. Similar to the economic analysis, it is expected that the obtained results have a logical consistency, that is, keep rationality. The software used for treatment of the model (M-MACBETH) verifies automatically the consistency, suggesting adjustments when inconsistencies are identified. This verification grants the rationality of the model, therefore, when the method is validated, the scientific criterion is ensured [13].

The cardinal scales generated translate the interviewees’ opinions into distributions which may be transformed into percentages which indicate the order of preference among the alternatives, as well as the degree of such a preference, as highlights [14].

The next section intends to describe the methodological proposal as well as the Macbeth tool. Thus, it will be possible to demonstrate the cardinal scale generated through the submission of the responses of an energy specialist to the method.

4. Equations

The research was structured as follows:

a. Bibliographic review: The content base Web of Science was used for the bibliographic review stage. For such, reference terms about the PESTEL analysis and multi-criteria methodologies of decision making were searched aiming at finding, according to quotation indexes, seminal articles and/ or articles related to the theme to which the research was applied. Some of the selected references were used to write the literature revision.
b. As a second reference source, a survey was conducted in the Thesis and Dissertation Bank from COPPE - Alberto Luiz Coimbra Institute for Graduate Studies and Research in Engineering of the Federal University of Rio de Janeiro. Besides searching for recent academic studies on the theme, this second research aimed at identifying experts in the oil business to respond to inquiries from the present study, since the aforementioned institution congregates courses related to Oil Engineering, the Laboratory for the Analysis of Bio fuels and Oil Compounds from the Oil Chemical Program (Institute of Chemistry), besides the PETROBRAS Research Center.
c. Model and hypothesis design: after making an effort towards surveying alternative methodologies of decision making, the Macbeth method was established as the most suitable for the present methodological study.
d. Empirical study locus definition: among the several thesis and articles researched, the work by [8] was selected since it is a work that focuses the petrochemical industry, which needs infrastructure works with a complexity compatible to the present methodological proposal.
e. Identification of an expert and submission of his convictions to the method, as it will be shown next.
f. Returning to the objective of the present article, it comprises the generation of a new objective function from MACBETH whose results of the judged prioritizations shall be a cardinal scale of the sub-factors (subdivisions) of the PESTEL tool that works as an efficient Pareto distribution [2], or a similar curve. In this sense, the planning force would be concentrated only on the elements which represent the greatest degree of importance for each of the ten factors.

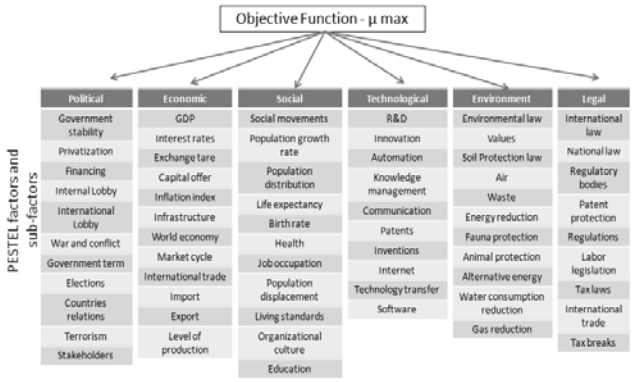


Figure 1. Objective function
Source: Adapted from [8].

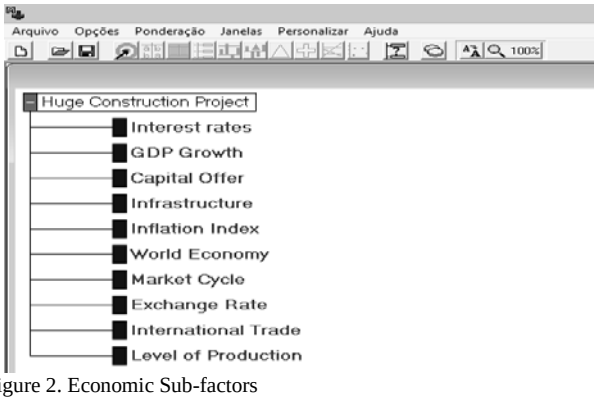


Figure 2. Economic Sub-factors
Source: The authors, using MACBETH.

As demonstrated in item 2, the PESTEL tool does not offer predetermined subdivisions. In this case, in order to validate the method, we found support on the Doctoral Thesis by [8] which, validating criteria inherent to the oil industry supply chain, used the following sub-factors (subdivisions) PESTEL, Fig. 1.

It is important to point out that the effort in the thesis by [8] in expanding the most the PESTEL factors may generate redundancies among the items to be assessed. Another crucial problem concerns the concept of limited rationality described by [15]. In this case, the marginal gain obtained by the increase of an item of analysis may not justify the increase on the cost of judgment.

Thus, following the accessibility criteria, a structured interview was conducted with an oil expert from the Federal University of Rio de Janeiro to obtain criteria to order the actions, following the MACBETH method. The interviewee has over 15 years of experience in fundraising, management and follow-up of basic and executive engineering projects. The experience is necessary to ensure that the professional knows how to value the multidisciplinary approach, considering the entire chain of the business and the different demands from stakeholders, with an ability to minimize risks and continuously improve productivity.

To validate the methodological proposal, only the process of prioritization of the economic sub-factors used by [8] will be detailed. For that matter, the authors are able to detail more thoroughly the methodological proposal.

It has been suggested that the collaborator should generate an ordinal prioritization of every PESTEL sub-criteria as a way of generating a result to be used as a control for the result of the prioritization generated by Macbeth.

After being submitted to such a process, the collaborator ended up with the following framework (Fig. 2):

The ordinal scale offers a sight of the importance of the sub-factors, but it does not present solutions of mathematical treatments that may be used as a Pareto distribution [2].

MACBETH is based on the establishment of matched-pair comparisons among criteria/attributes considering the objective and subjective features, according to an absolute scale of values. In order to compare the alternatives, the decision maker must judge, in the light of each specific criterion, which is the best alternative and how much better it is according to the following options: indifferent alternatives, very weak difference, weak, moderate, strong, very strong or extreme.

In practical terms, in order to make it possible to ordinarily measure the attractiveness of options x of a finite set X, it is necessary to associate to each x a real number v(x) which satisfies the conditions: of strict preference (eq. 1) and of indifference (eq. 2).

$$\forall x, y \in X: x \, P \, y \Leftrightarrow v(x) > v(y) \quad (1)$$

$$\forall x, y \in X: x \, I \, y \Leftrightarrow v(x) = v(y) \quad (2)$$

In order to avoid possible inconsistencies, typical of aggregation of ordinations done separately of each criterion (Arrow's Theorem [16]), it is possible to obtain cardinal information from the decision maker, in such a way that it also meets the additional condition (eq. 3).

$$\forall w, x, y, z \in X \quad (3)$$

with x more attractive than y and w more attractive than z: so the ratio $(v(x)-v(y))/(v(w)-v(z))$ measures the difference in attractiveness between x and y when the difference in attractiveness between w and z is the measurement unit.

Taking into consideration such conditions, a numerical scale of intervals is established ($v: X \rightarrow R: x \rightarrow v(x)$). In MACBETH, the transition from ordinal information to cardinal information is done comparing the options to the pairs in a qualitative way [17].

On the software which implements the model (M-MACBETH), as the assessments are inserted in the judgment matrix, the consistency is automatically verified, and when there is some inconsistency, possible solutions are indicated.

From the judgment matrix, MACBETH proposes a score for each option which composes the numerical scale of the method. Be the difference the categories which differ the attractiveness (Ck) with k =0, ..., 6, which corresponds to "null" (Co), "very weak" (C1), "weak" (C2), "moderate" (C3), "strong" (C4), "very strong" (C5) and "extreme" (C6). Furthermore, Andrade, Andrade and Mello [18] highlight that, if v(a+) and v(a-) are, respectively, the greater and lesser scores among the options, the base MACBETH scale may be found resolving the following linear programming problem:

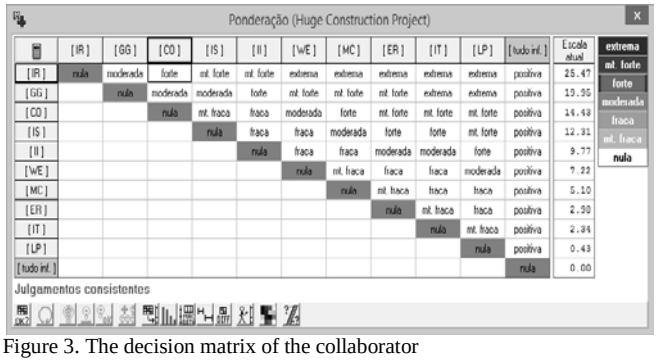


Figure 3. The decision matrix of the collaborator
Source: The authors, using MACBETH.

LP MACBETH:
Min [v(a+), v(a-)]
Subject to:
v(a-) = 0 (arbitrary score)
∀(a, b) ϵ Co: v(a) – v(b) = 0.
∀ (a, b) ϵ Ci: U … U Cs with i, s ϵ {1, 2, 3, 4, 5, 6} and i ≤ s:v(a) – v(b) ≥ i
∀ (a, b) ϵ Ci: U … U Cs and ∀ (c, d) ϵ Ci: U … U Cs with i, s, i', s' ϵ {1, 2, 3, 4, 5, 6}, i ≤ s, i' ≤ s', and i> s': [v(a) – v(b)] – [v(c) – v(d)] ≥ i – s'.

The chart presents an "alternative" represented in light blue entitled "tudo inf." – "everything inferior". In some judgments, MACBETH also generates other alternative called "tudo sup." – "everything superior" (Fig. 3). It is worth pointing out that such maneuvers are, actually, representative alternatives (the reason for the quotation marks) and must not suffer direct comparisons with the criteria or alternatives considered. In this case, it has been chosen not to do any judgments, only indicating that the alternatives of the present study were all superior to this representative alternative (as observed in the mentioned column).

5. Final considerations

Considering the objective of the present study, that is, to perform from Macbeth model a prioritization of the factors in the PESTEL analysis of the pre-construction and assembly environments of large civil engineering projects, we may consider that it has been achieved in section 4 of the present paper.

According to the results, it is also possible to verify the main hypothesis that the Macbeth model should be able to generate a Pareto distribution (Rule 80/20), in which there are "few, but of great importance" and "many, but of little importance" factors. The application of the methodology demonstrated that four of the ten alternatives represent 72.16% of the preference of the consulted expert. The answer does not represent a Pareto distribution, but does not invalidate the hypothesis. It is possible that the judgment of some specialist comes closer to such a phenomenon.

Concerning the present paper, the distribution obtained behaves as a descending branch of a parable. This demonstrates the superiority of the first four alternatives in relation to the others.

It can be thus verified that, in face of the researches performed, the use of Macbeth may be an admirable instrument to aid the decision making in the process of complex scenarios assessment, where the manager tends to search the mitigation of the risk on the development of a comprising model, thus creating as many alternatives or criteria as possible. This matter finds a wide debate on the discussions of the multi-criteria models of decision making, as clarified in Roy's axioms of exhaustibility, cohesion and non-redundancy [19].

The purpose of the present study was to demonstrate that the complex scenario of civil engineering constructions, mainly those connected to great projects such as those employed in the oil industry, requires from the manager a more demanding level of analysis, which can nonetheless be simplified. This is derived from the incorporation of management concepts, particularly related to decision making that the civil engineering field has experienced over the last years.

Thus, countries which still lack this kind of projects, such as BRICS, may benefit greatly from tools which collaborate to maximize the efforts with no compromise of the risks.

As a way of fomenting new studies, it is proposed the generation of final matrices from a group of specialists involved in large construction projects and use the results as a panel in a wide debate aiming at creating some kind of "key factors" or "crucial weighting" for this type of project. In this case, of course, it will be necessary to develop sample selection methods thorough enough, as well as relativize the results obtained for the site where the study shall take place, as well as for a specific time period.

Finally, it is convenient to highlight that a reassessment of methodologies and criteria/alternatives must be done along time, for the relative importance of the factors may be altered. For example, the drop on the real interest rate of 6% per year to 2% per year as claimed by the current Brazilian government may turn it into something a lot less important than it is today.

References

[1] Bana e Costa, C.A. e Vansnick, J.C., Uma nova abordagem ao problema de construção de uma função de valor cardinal: MACBETH. Investigação operacional, 15, pp. 15-35, 1995.
[2] Houthakker, H.S., The Pareto distribution and the Cobb-Douglas production function in activity analysis. The Review of Economic Studies, 23(1), pp. 27-31, 1955. DOI: 10.2307/2296148
[3] Ians. India to get $250 million for renewables from BRICS New Development Bank. The New Indian Press, Business. April 15th 2016.
[4] Campos, A. e Rodrigues, M., Infraestrutura é maior desafio no Bric, mostra pesquisa. Estado de São Paulo, Caderno de Economia e Negócios. April 26th 2013.
[5] Natario, G., Grupo reivindica retomada imediata das obras no COMPERJ. ALERJ – Assembléia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, [online]. Noticias. June 07th 2016. Available at: http://www.alerj.rj.gov.br/Visualizar/Noticia/38550?AspxAutoDetectCookieSupport=1
[6] Roy, B. and Boyssou, D., Mèthodologie Multicritèred' Aide à la Dècision. Economica, Paris, 1985.
[7] Porter, M.E., Competitive strategy, Free Press, New York, 1980.
[8] Fontanillas, C.N., Uma análise da cadeia produtiva do petróleo a partir da aplicação do método AHP/FUZZY ao modelo PESTAL sob a ótica dos experts do petróleo, PhD. Thesis, Department of Production Engineering (COPPE-UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

[9] Gomes, E.G., Integração entre sistemas de informação geográfica e métodos multicritério no apoio à decisões parciais, M.S. Dissertation, Department of Production Engineering (COPPE-UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil, 1999.
[10] Cruz, E.P., Barreto, C.R. e Fontanillas, C.N., O processo decisório nas organizações, Intersaberes, Curitiba, Brasil, 2014.
[11] Bana e Costa, C.A., Três convicções fundamentais na prática do apoio à decisão, Revista Pesquisa Operacional, 13(1), pp. 9-20, 1993.
[12] Gomes, E.G., Lins, M.P.E. e Mello, J.C.C.B.S., de. Seleção do melhor município: Integração SIG-Multicritério, Revista Investigação Operacional, 22(1), pp. 59-85, 2002.
[13] Cova, C.J.G., Execução orçamentária pública: Uma proposta de metodologia de tomada de decisão e avaliação de resultados, PhD. Thesis, Department of Production Engineering (COPPE-UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil, 2000.
[14] Cruz, E.P., Modelo multicritério e multidecisor para priorização de ações em Ciência, Tecnologia e Inovação: Um estudo no Fórum de Competitividade da Cadeia Produtiva da Indústria Farmacêutica, PhD. Thesis, Department of Chemical Engineering (UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil, 2007.
[15] Simon, H.A., Administrative behavior, New York: Free Press, 1965.
[16] Arrow, K.J., Social Choice and individual values, New York, Wiley, 1951.
[17] Bana e Costa, C.A., Angulo-Meza, L. e Oliveira, M.D., O método Macbeth e aplicação no Brasil, Engevista, 15(1), pp. 3-27, 2013.
[18] Andrade, G.N. et al., Evaluation of power plants technologies using multi-criteria methodology Macbeth, IEEE Latin America Transactions, 14(1), pp. 188-198, 2016. DOI: 10.1109/TLA.2016.7430079
[19] Roy, B., The outranking approach and the foundations of Electre methods, Theory and decision, 31(1), pp. 49-73, 1991. DOI: 10.1007/BF00134132

J.G.L. Leite, received the BSc. Mechanical Eng. and Economics at the Universidade Federal Fluminense (both in 1983), the MSc. in Production Eng. at Fluminense Federal University in 1992. Currently, he is a doctoral student in Civil Eng. at Federal Fluminense University. He is professor at the production engineering Department at Universidade Federal Fluminense since 1986, teaching ethics, economics and finance to undergraduate courses.
ORCID: 0000-0001-9059-9077

L.C.B. de B. Mello, received his BSc. in Mechanical Eng. in 1972 from CEFET-UFRJ, the MSc. degree in 2002 and the Dr. in Civil Eng. in 2007. The MSc. and Dr. are from Universidade Federal Fluminense. He has also an Advanced Management Program degree in Business Administration from COPPEAD-UFRJ and another one on Supply Chain Management from Michigan State University. He worked as an executive in multinational companies in Brazil and USA up to 2005. He is also a Six Sigma Black Belt. He is an associate professor at Universidade Federal Fluminense and his research interests are: Logistics, supply chain management, building information modelling, complex projects in civil construction, rework in civil construction and lean construction.
ORCID: 0000-0002- 0367-4057

J.C.C.B.S. de Mello, received the BSc. Mechanical Eng. in 1981 and the MSc. degree in Mathematics in 1987, all of them from the Federal Fluminense University. Received the PhD degree in Production Eng. in 2002 at Federal University of Rio de Janeiro. He completed PhD. studies at the Faculty of Economics of the University of Coimbra in 2006 and a Senior internship at Instituto Superior Técnico of the Technical University of Lisbon in 2012. He is currently an associate professor at the Fluminense Federal University, research productivity at CNPq and an editor at Engevista until 2015. He is currently the head of the Production Engineering Department and member of the Board of Trustees. He has experience in the area of Production Engineering, with emphasis on Data Envelopment Analysis, working mainly on the following topics: data envelope analysis (dea), multicriteria, educational evaluation, air transport and sports evaluation.
ORCID: 0000-0002-6507-2721

E.P. Cruz, received the BSc. Administration at Fluminense Federal University (1998), MSc. degree in Production Engineering at Universidade Federal Fluminense (2002) and PhD in Chemical Engineering at the Federal University of Rio de Janeiro (2007). He is currently associate professor I of the Department of Entrepreneurship and Management - STE at the Federal Fluminense University, teaching Financial Mathematics, Investment Analysis and Business Internationalization. He coordinates the Immigrant Entrepreneurship research project as well as the Executive MBA Program in Entrepreneurial Management. His main research interests are immigrant entrepreneurship, decision theory, marketing, strategic planning and finance.
ORCID: 0000-0003-4484-3256

C.N. Fontanillas, He is currently a Post-PhD fellow in COPPE/UFRJ Production Engineering program. He has a PhD in Production Engineering at COPPE/UFRJ (2015), with a MSc. in Production Engineering from COPPE/UFRJ (2008). Graduated the BSc. in Business Administration, he is a professor at the Fluminense Federal University (UFF) and a professor of the Business Marketing MBA; MBA in Business Logistics and Supply Chain Management; MBA in Corporate Finance and Capital Markets of UFF. He has experience on Production Management, Decisional Process and Logistics.
ORCID: 0000-0002-5242-509X

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
de Sistemas e Informática

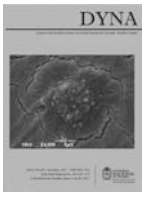
Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas
Especialización en Mercados de Energía
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas
Doctorado en Ingeniería- Sistemas e Informática

Mayor información:

E-mail: acsei_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5365

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Analysis of constructive damage on single-family homes produced by vibrations induced by soil impacts in their surroundings

Luis Manuel Villa-García

Department of Construction and Manufacturing Engineering, School of Engineering of Gijón, Gijón, Asturias, Spain. villa@uniovi.es

Received: September 02nd, 2016. Received in revised form: September 07th, 2017. Accepted: October 25th, 2017.

Abstract
Currently there is no specific legislation that addresses the issue of induced impacts on the ground vibrations due to industrial work, nor a general consensus regarding the permissible levels of vibration standards that address problems (pile driving, step trains, etc.). Therefore, and taking into account the impulsive nature of the excitation source (ie impacts of high-level, short-term), employment is justified as an indicator of vibration measurements, the peak value of the signal in the time domain acceleration or speed, and the dominant frequency, since the danger with respect to a structure as well as the inconvenience to the occupants, both factors influence. In this paper the dynamic, constructive or structural damage caused on a house by industrial work of a steel company housing are analyzed.

Keywords: Forensic engineering; impact; vibration.

Análisis de los daños constructivos sobre una vivienda unifamiliar producidos por vibraciones inducidas por impactos contra el suelo en sus proximidades

Resumen
Actualmente no existe una normativa específica que trate la problemática de las vibraciones inducidas por impactos contra el suelo debido a labores industriales, ni un consenso general en lo relativo a los niveles admisibles de vibración en normas que tratan problemas relacionados (hinca de pilotes, paso de trenes, etc.). Por ello y teniendo en cuenta la naturaleza impulsiva de la fuente de excitación (es decir, impactos de alto nivel, de corta duración), se justifica el empleo como indicador de las vibraciones medidas, del valor pico de la señal en el dominio del tiempo en aceleración o en velocidad, y la frecuencia dominante, dado que en la peligrosidad con respecto a una estructura, así como las molestias a sus ocupantes, influyen ambos factores. En el presente trabajo se analizan los perjuicios dinámicos, constructivos o estructurales, causados sobre una vivienda unifamiliar por las labores industriales de una empresa siderúrgica.

Palabras clave: Patología de estructuras; impactos; vibraciones.

1. Introducción

El funcionamiento de una planta de clasificación de escorias perteneciente a una acería, causa graves perjuicios constructivos sobre una vivienda unifamiliar, situada a unos 100 metros de distancia. La finalidad de la citada planta de clasificación, es el reciclado de las escorias de la acería, separando la chatarra de la escoria, para su posterior reutilización. Los trozos grandes se fracturan con ayuda de una grúa, dejando caer sobre los mismos -desde una altura de unos 20 metros- una bola metálica de grandes dimensiones, con el estruendo y las vibraciones inducidas que ello conlleva (Fig. 1).

Con anterioridad a los trabajos de medición de las mismas, los propietarios se pusieron en contacto con diversos medios de comunicación (televisión, prensa local, revistas, etc.) al objeto de dar a conocer a la sociedad la problemática

How to cite: Villa-García, L.M., Análisis de los daños constructivos sobre una vivienda unifamiliar producidos por vibraciones inducidas por impactos contra el suelo en sus proximidades DYNA, 84(203), pp. 328-333, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.



Figura 1. Planta de clasificación de escorias, con la carretera regional en primer término.
Fuente: el autor.

creada por la Planta de Clasificación de Escorias, e intentar llamar la atención sobre la misma. Desde entonces las labores en la citada planta se han vuelto muy esporádicas; esto es, los trabajos de fracturación de trozos de escoria de grandes dimensiones, ya no se realizan de forma continuada, en una franja horaria regular, sino a intervalos cortos de tiempo y totalmente aleatorios, lo que hace mucho más difícil y prolongada la recogida de datos; ya que en muchas ocasiones, cuando el técnico llegaba al lugar del asunto, las operaciones ya se habían detenido. Asimismo, se ha podido observar, que la bola impactadora, ya no se levanta hasta su cota vertical máxima mediante la grúa, sino que se detiene aproximadamente a un tercio de la altura total antes de dejarla caer. Además -según la declaración de los propietarios- también se ha dejado de utilizar una segunda bola de dimensiones aún mayores (de aproximadamente el doble), que ha estado causando un estruendo y unas vibraciones inducidas, considerablemente mayores que las actuales producidas con una bola de menores dimensiones.

Para informar del alcance y los efectos dinámicos, sobre la totalidad de la estructura de la vivienda y de su influencia sobre la calidad de vida de sus ocupantes, se solicitó la colaboración del *Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación* de la *Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón*.

2. Objeto

El presente trabajo tiene por objeto cuantificar y valorar el efecto que producen los impactos citados sobre la vivienda. A tal efecto, el ingeniero que suscribe se desplazó a la vivienda del asunto en reiteradas ocasiones, al objeto de inspeccionar el lugar y realizar varias mediciones “in situ” de las vibraciones producidas.

Para ilustrar este trabajo, se ha escogido una parte sesgada del dictamen pericial correspondiente al tema del asunto. Como es obvio, se han omitido y/o alterado los nombres propios y el lugar.

3. Descripción de la vivienda

La vivienda está ubicada dentro de un polígono industrial, en frente de una planta de clasificación de escorias, separada de esta por una carretera regional. La edificación está constituida por dos plantas: planta baja y una altura. A esta última se accede a través de una escalera exterior que discurre por la fachada lateral.

4. Lesiones observadas

En la primera planta, los pavimentos del salón y de la cocina (este último recientemente colocado), presentan unas fisuras longitudinales, con las baldosas cerámicas fracturadas, de amplitud inferior a 1 mm. Asimismo, el techo de la cocina, reformado recientemente, al igual que su pavimento, presenta varias fisuras en las proximidades de la fachada principal.

En la planta baja, en el interior de un pequeño almacén situado bajo la escalera, se aprecian notablemente, desprendimientos en el techo de la carga de mortero, quedando a la vista las bovedillas y viguetas del forjado.

Todas las lesiones mencionadas se sitúan en el entorno de la fachada principal.

5. Prediagnóstico y estudio patológico

Se hace necesario valorar la posible influencia de otros factores antes de atribuir a las vibraciones inducidas, por impactos contra el suelo, los daños descritos:

- Según la forma y ubicación de las fisuras existentes, se descartan asientos diferenciales en la vivienda, ya que no hay fisuras presentes en ninguna de las paredes.
- También se descartan flechas o deformaciones excesivas en el forjado de la planta primera o en el techo de esta, ya que los cerramientos verticales interiores no presentan figura alguna.
- Se descartan directamente la influencia de otros factores, debido a la edad de la construcción: retracciones plásticas de la capa de compresión, afogarado, etc.

5.1. Medición de vibraciones “in situ”

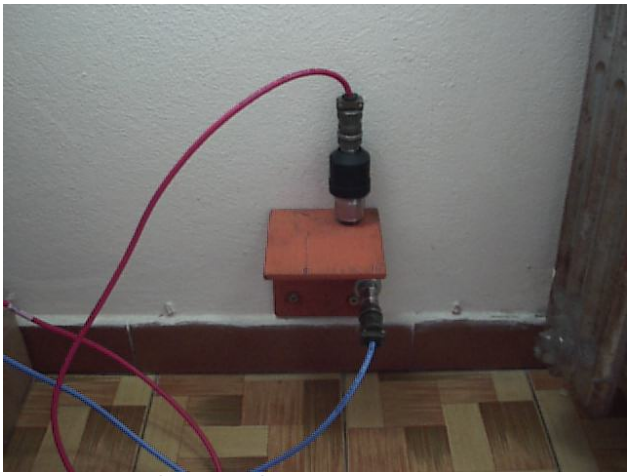
A la vista de los hechos, con el fin de justificar la valoración de los efectos producidos sobre la estructura y sobre las personas que en ella viven, se programa una campaña de ensayos, consistente en una serie de mediciones de las vibraciones en el interior de la vivienda.

A continuación se expone la metodología utilizada y el equipo empleado, así como los resultados de las mediciones de las vibraciones, en el interior de la vivienda.

5.1.1. Equipo utilizado

El equipo de captación y almacenamiento de datos, empleado en las mediciones “in situ” está formado por los siguientes componentes:

- Un analizador colector CSI, modelo 2120-A2: RBM-Consultant, con procesador FFT que soporta una resolución máxima de 6400 líneas y entrada para dos canales dinámicos simultáneos.
- Un acelerómetro PCB (IMI Division), modelo 636A03, con sensibilidad nominal de 1000 mV/g.
- Dos acelerómetros industriales CSI, modelo A0760GP, con sensibilidad nominal de 100 mV/g.


Figura 2. Disposición de acelerómetros en una de las paredes de la vivienda. Fuente: el autor.

- Un ordenador portátil y diverso software para tratamiento de la señal y análisis modal.

5.1.2. Ubicación de sensores

Como se ha mencionado anteriormente, la vivienda unifamiliar se compone de planta baja (destinada a garaje y almacén) y primera planta (destinada a las estancias de la vivienda propiamente dicha). La ubicación de los sensores de captación de datos, se ha realizado mediante base magnética, sobre las paredes de cerramiento laterales, e incluso en zonas próximas a las esquinas de la mismas -de mayor rigidez- con ello se tiende a medir las aceleraciones que se producen en la base de la vivienda, las cuales podrían amplificarse, en función de las frecuencias propias de los diferentes componentes de la vivienda, particularmente de los forjados (Fig. 2).

Debido a que las vibraciones constituyen un movimiento espacial, han sido registradas mediciones de las mismas, en tres direcciones sensiblemente ortogonales (Fig. 3), correspondientes a:

- $\mathbf{a_v}$: aceleración vertical.
- $\mathbf{a_{h\ long}}$: aceleración horizontal longitudinal (dirección aprox. 290º oeste).
- $\mathbf{a_{h\ trans}}$: aceleración horizontal transversal (dirección aprox. 200º sur).

5.1.3. Resultados de las mediciones “in situ”

No existe actualmente una normativa específica que trate esta problemática, ni un consenso general en lo relativo a los niveles admisibles de vibración en normas que tratan problemas relacionados (hinca de pilotes, paso de trenes, voladura de rocas, etc.) [1-3]. Por ello y teniendo en cuenta la naturaleza impulsiva de la fuente de excitación (es decir, impactos de alto nivel, de corta duración), se justifica el empleo como indicador de las vibraciones medidas, del valor pico de la señal en el dominio del tiempo en aceleración o en velocidad (en el presente trabajo se ha utilizado la primera) y la frecuencia dominante, dado que en la peligrosidad con respecto a una estructura, así como las molestias a sus ocupantes, influyen ambos factores [4].

Como se ha mencionado en el apartado anterior, las vibraciones se registraron como componentes en tres direcciones ortogonales. Con el objeto de caracterizar las vibraciones inducidas sobre la estructura, en este trabajo se utilizaron los siguientes parámetros característicos de la vibración:

- valor pico de la aceleración (en la señal en el tiempo) de su mayor componente,
- y la frecuencia dominante de la vibración, obtenida a través de un espectro de frecuencias de la señal.

Si se da la circunstancia de que un registro presente varios picos de aceleración de vibración del mismo orden y con diferentes frecuencias, se debe considerar la menor de las mismas. Esta circunstancia queda cubierta al efectuar un análisis de Fourier para generar el espectro [4,5].

De las tres componentes registradas se ha seleccionado la dirección vertical ($\mathbf{a_v}$), ya que presenta unos niveles de magnitud sensiblemente superiores a las componentes horizontal longitudinal ($\mathbf{a_{h\ long}}$) y transversal ($\mathbf{a_{h\ trans}}$); dándose además la circunstancia de que dicha componente vertical, es la más sensible en lo que respecta a la incomodidad de las personas y para la que además se presume -a falta de un análisis de esfuerzos más detallado- causa mayores daños estructurales en los forjados de la vivienda [5-7].

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados de varias mediciones, indicándose el número de registro y de impacto para cada uno de ellos, así como el valor pico de la amplitud vertical de la aceleración $\mathbf{a_v}$ en términos de la aceleración de la gravedad terrestre en [g’s] y del sistema internacional de unidades en [m/s^2], y la frecuencia dominante en [Hz], que aparece en el espectro de la señal vertical de la aceleración de cada uno de los impactos. A continuación, se representan los gráficos correspondientes a los dos últimos registros de la respuesta vertical, efectuados en día y hora diferentes, en el dominio del tiempo, en el primero de ellos (Fig. 4) se pueden apreciar claramente ocho impactos, mientras que el tercero (registro nº 3) presenta un único impacto -sin lugar a dudas de mayor magnitud-.

Seguidamente -y a modo ilustrativo- se representa una ampliación de los impactos nº 12 y 14, así como su correspondiente espectro de aceleración en el dominio de la frecuencia (Figs. 5 y 6).

Al objeto de ilustrar y cuantificar la magnitud de las fuerzas inducidas sobre la totalidad de la estructura de la vivienda, considérese por ejemplo el valor pico correspondiente a la señal en el tiempo del impacto número 14, perteneciente al registro número 3 (Fig. 6), en la que se muestra una aceleración vertical de hasta 0.12650 m/s^2 (tabla 1), la Segunda Ley del Movimiento de Newton, pone de manifiesto que por cada 1000 kg de masa que gravitan sobre la estructura de la vivienda, se generan unos esfuerzos adicionales de 126.5 N. Adicionalmente, nótese que el registro citado se corresponde únicamente con la respuesta vertical, mientras que el efecto de las vibraciones inducidas por los impactos constituyen un movimiento espacial, en tres dimensiones, por lo que el valor pico total, resultante de la combinación de las tres componentes sería:

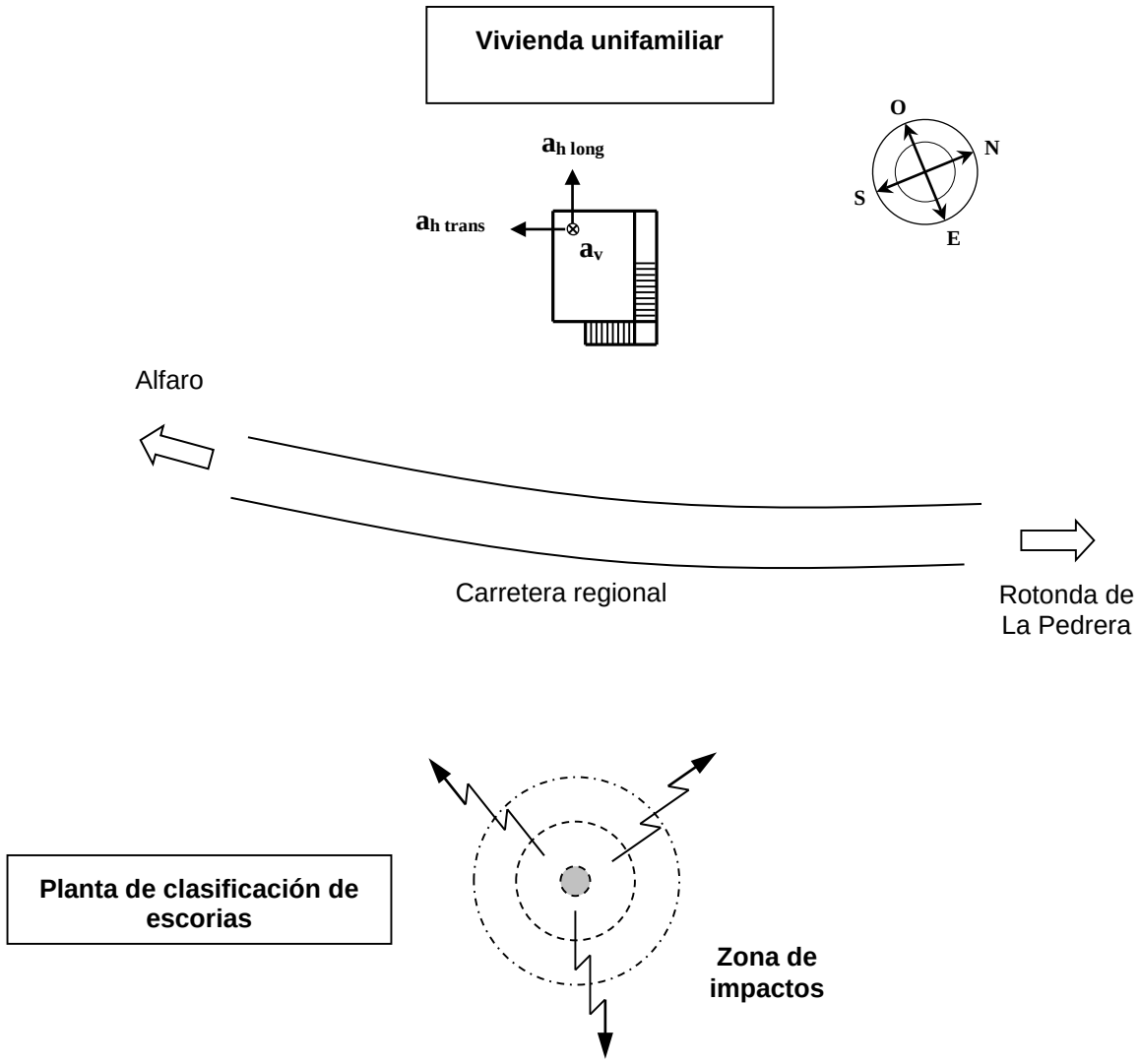


Figura 3. Croquis de la vista en planta del lugar de los hechos; en el que también se indica la orientación de los sensores de captación.
Fuente: el autor.

$$\sqrt{(a_v)^2 + (a_{h\,long})^2 + (a_{h\,trans})^2} \quad (1)$$

siendo **a**, el valor pico de la aceleración en la señal, en el dominio del tiempo, para:

- $\mathbf{a_v}$: la dirección vertical.
- $\mathbf{a_{h\ long}}$: componente horizontal longitudinal (dirección aprox. 290º oeste).
- $\mathbf{a_{h\ trans}}$: componente horizontal transversal (dirección aprox. 200º sur).

el cual tiene una magnitud -evidentemente-, mayor que las mostradas en la tabla 1.

Tabla 1.

Registro nº	***Impacto nº***	$\mathbf{a_v}$		**Frecuencia dominante [Hz]**
		[G's]	**[m/s²]**	
	1	0.00697	0.06835	20.50
	2	-0.00814	-0.07982	20.00
1	3	-0.00728	-0.07139	20.00
	4	-0.00682	-0.06688	20.00
	5	0.00825	0.08090	20.00
	6	-0.00658	-0.06452	20.50
	7	-0.00582	-0.05707	20.00
	8	-0.00602	-0.05903	20.00
2	9	-0.00794	-0.07786	20.50
	10	-0.00797	-0.07815	20.50
	11	-0.00948	-0.09296	20.00
	12	-0.00978	-0.09590	20.00
	13	-0.00819	-0.08031	20.00
3	14	-0.01290	-0.12650	20.50

Fuente: el autor.

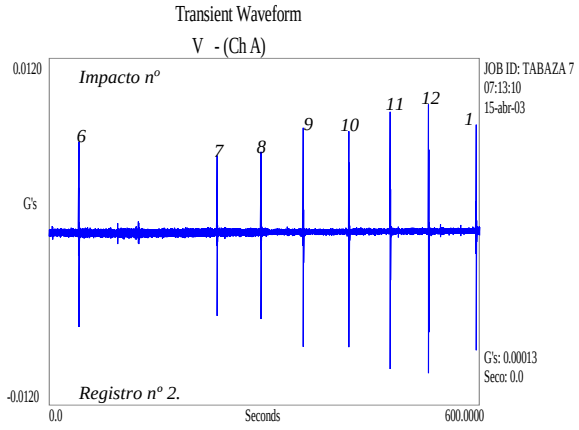
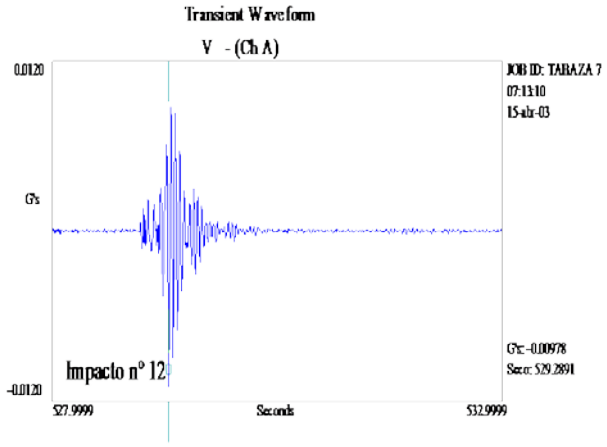


Figura 4. Registro nº 2.
Fuente: el autor



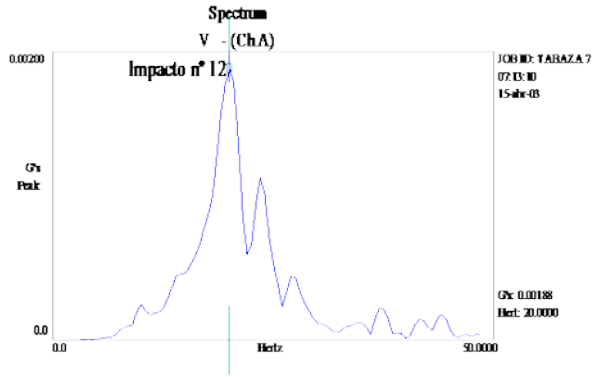
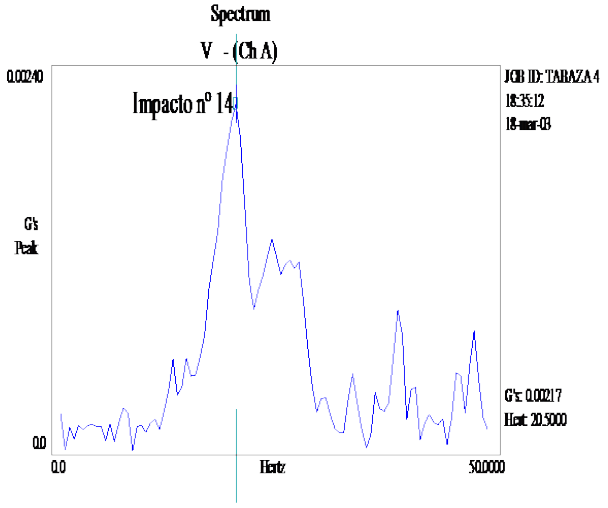


Figura 5. Ampliación del impacto nº 12 y espectro del mismo.
Fuente: el autor

6. Conclusiones

Durante la realización del presente trabajo -debido a las razones que se han citado en la introducción- no ha sido posible efectuar mediciones de impactos producidos con la bola de mayores dimensiones, la cual sin lugar a dudas hubiese causado un estruendo y vibraciones inducidas sensiblemente mayores que las aquí expuestas. A pesar de todo, los registros obtenidos con la bola de menores dimensiones -sin izarla hasta su cota máxima- se considera que ya alcanzan por si mismos una magnitud sobradamente intolerable, siendo presumiblemente las correspondientes aceleraciones la causa principal de los daños que se observan en la vivienda, tanto en elementos como: falsos techos, enlucidos, pisos, tabiques, etc.

Tal como se ha mencionado en el apartado 5.1.3, la composición de las aceleraciones según sus componentes resulta de la expresión (1), por lo que el efecto dinámico es aún superior al captado en la dirección vertical. Además -y he aquí la conclusión final de este párrafo- los esfuerzos en los elementos resistentes, con cargas predominantemente distribuidas y puntuales, aumentan de forma drástica proporcionalmente a la magnitud de la aceleración actuante sobre las masas que gravitan sobre ellos.



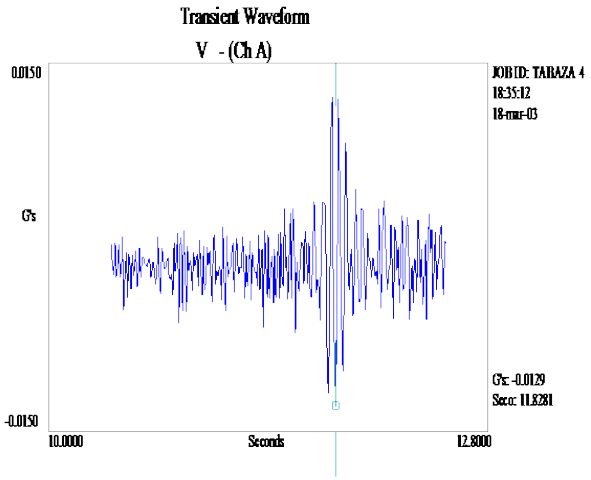


Figura 6. Ampliación del impacto nº 14 y espectro del mismo.
Fuente: el autor

Si bien la representación gráfica en las páginas anteriores, de los registros de algunas de las mediciones realizadas, constituye una prueba palpable de la problemática que se está analizando, el testimonio del técnico que suscribe, testigo de excepción de los impactos que se indican, corrobora que las vibraciones inducidas por los impactos, sobre la vivienda de la demandante, son inaceptables para unas condiciones de confort y de calidad de vida óptimas.

En relación con la estructura de la vivienda, ha de mencionarse que toda solicitación cíclica (impactos aislados en el tiempo varias veces por semana) entraña un proceso de acumulación de daño, que no ha sido previsto en su día -por razones obvias- en el proyecto de ejecución de la vivienda; por lo que se considera, que la continuación de las labores de impacto en los niveles presentes constituye una imprudencia. Sin lugar a dudas, los daños actuales manifiestan un aviso del previsible agravamiento de los mismos, y la aparición de otros posibles adicionales que se producirían en un futuro, de continuar con las citadas labores.

Por último -en lo que a la alteración de la vida normal y a las molestias sobre las personas que habitan la vivienda se refiere- se insiste en que las oscilaciones verticales (que como hemos dicho presentan una mayor magnitud que las horizontales longitudinales y transversales) son -evidentemente, después de todo lo mencionado- claramente perceptibles, y capaces de interrumpir el descanso de las personas, dándose además la circunstancia de que esta componente de las oscilaciones es la más sensible para el cuerpo humano.

Como ya se ha mencionado -en la actualidad-, dado que no existe normativa de referencia sobre el problema analizado, y por otra parte, entre la comunidad científica internacional, tampoco hay acuerdo entre los niveles de vibración admisibles en normas que tratan problemas relacionados (hinca de pilotes, voladura de rocas, paso de trenes, etc.); las recomendaciones de actuación que se pueden dar para el problema tratado son de carácter general. Entre ellas se pueden citar:

- Aumentar la distancia de separación, en la medida de lo posible, de zonas urbanas y residenciales.
- Esta distancia es variable y no solo depende de la magnitud del impacto (dependiente a su vez de la masa proyectada y de la altura de izado), si no también de la propia naturaleza del terreno circundante. Al trasmitirse las vibraciones por ondas a través del suelo, estas pueden amortiguar en mayor o menor medida, el movimiento del mismo según el tipo de terreno por el que se desplazan.
- Debido a esta heterogeneidad de los terrenos, antes del inicio de labores industriales seriadas en el tiempo, se hace necesario la realización de un informe técnico previo, en donde a través de una monitorización de las vibraciones del suelo en la ubicación de la zona de actividad, permita valorar la idoneidad del emplazamiento previsto o la conveniencia de aumentar la distancia de seguridad; en función de la tipología de las construcciones próximas, del uso de las mismas, y de los riesgos de daños.

References

[1] López-Jimeno, C., Manual de perforación y voladura de rocas, Instituto Tecnológico Geominero de España, España 1994.

[2] Vega, J., Fraile, A., Alarcón, E., Hermanns, L., Dynamic response of underpasses for high-speed train lines, J. Sound Vib. 331, pp. 5125-5140, 2012.

[3] Romero, A., Galvín, P., Domínguez L., Comportamiento dinámico de viaductos cortos considerando la interacción vehículo-vía-estructura-suelo, Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing. 28, pp. 55-63, 2012.

[4] Norma UNE 22-381-93. Control de vibraciones producidas por voladuras. AENOR, España.

[5] Clough, R.W., Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw Hill, USA, 1993.

[6] Vega, J., Hermanns, L., Alarcón, E., Fraile, A., Measuring dynamic effects on underpasses of high-speed railway lines, Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, volume 10, issue 1, pp. 41-56, 2014.

[7] Vega, J., Hermanns L., Alarcón E., Fraile, A., Fórmulas para el cálculo del factor de impacto de estructuras semienterradas en líneas de ferrocarril de alta velocidad, Rev. int. Métodos numér. cálc. diseño ing., 30, pp. 188-193, 2014.

L.M. Villa-García, is PhD. degree in Eng. Construction and Fabrication, Industrial Engineer (1995), Technical Industrial Engineer (1991), both at the Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, Spain. Technical Specialist (1988), Assistant Technician (1985), both in Revilla Gigedo Foundation, Gijón, Spain. Currently professor of the Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, Spain, since 1998.
ORCID: 0000-0002-1353-3434



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

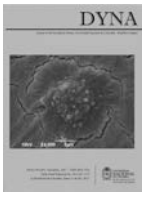
Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Composting of biowaste: Research trends and relevance in developing countries

Jonathan Soto-Paz [a], Ricardo Oviedo-Ocaña [b], Patricia Torres-Lozada [a], Luis Fernando Marmolejo-Rebellón [a] & Pablo Cesar Manyoma-Velásquez [c]

[a] *EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. jonathan.soto.paz@correounivalle.edu.co, patricia.torres@correounivalle.edu.co, luis.marmolejo@correounivalle.edu.co*
[b] *Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. eroviedo@uis.edu.co*
[c] *Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. pablo.manyoma@correounivalle.edu.co*

Received: December 13th, 2016. Received in revised form: October 10th, 2017. Accepted: October 25th, 2017.

Abstract
Biowaste is the main fraction of MSW in developing countries. Composting is a promising alternative for the management of biowaste in these contexts. However, its implementation has not been effective in developing countries, for which it is necessary to explore options to improve its application in this context. This article reviewed the research trends on biowaste composting and the potential application in developing countries such as Colombia. For this purpose, the technology monitoring methodology was used in databases of specialized scientific journals (period 2006 to 2017), using bibliometric tools such as RefViz® and Tlab®. The research has focused on optimizing the process through measures such as the use of amendment or support materials, strategies for reducing nitrogen losses, aerobic biodegradability studies and the development of empirical models to predict process conditions. The integration of this research in the context of developing countries can contribute to improve the application of biowaste composting.

Keywords: Resource recovery; biowastes; composting; product quality; modeling.

Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo

Resumen
Los biorresiduos son la mayor fracción de los Residuos Sólidos Municipales-RSM en países en desarrollo, siendo el compostaje una alternativa promisoria para su gestión. La implementación del compostaje en este contexto no ha sido efectiva requiriéndose estrategias para mejorar su aplicación. Este artículo analiza tendencias investigativas del compostaje de biorresiduos y presenta una reflexión crítica al respecto. Para tal efecto, emplea elementos de vigilancia tecnológica, analizando revistas científicas especializadas (periodo 2006 a 2017) y usando herramientas bibliométricas como RefViz® y Tlab®. Las investigaciones para optimizar el proceso se han enfocado en el uso de materiales de enmienda o de soporte, estrategias para la reducción en las pérdidas de nitrógeno, desarrollo de estudios de biodegradabilidad aerobia y de modelos empíricos para predecir condiciones del proceso. La integración de estas investigaciones en el contexto de países en desarrollo puede contribuir al mejoramiento de la aplicación del compostaje de biorresiduos.

Palabras clave: Aprovechamiento; biorresiduos; compostaje; calidad del producto; modelado.

1. Introducción

En países en desarrollo, los biorresiduos se caracterizan por ser la fracción predominante de los RSM [1,2] y ser los de mayor complejidad de tratamiento en comparación con otros residuos orgánicos, debido a aspectos asociados con sus características fisicoquímicas, tales como composición física heterogénea, alta humedad, presencia de sales, y deficiencia tanto de carbono orgánico y de nutrientes como el fósforo [3-9].

How to cite: Soto-Paz, J., Oviedo-Ocaña, R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, F. and Manyoma-Velásquez, C., Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo DYNA, 84(203), pp. 334-342, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

Tradicionalmente, en países en desarrollo ha predominado la disposición final de los biorresiduos [10]; sin embargo, este método presenta mayores impactos ambientales asociados a la generación de gases de efecto invernadero-GEI y lixiviados, respecto a alternativas de aprovechamiento y valorización como el compostaje, la digestión anaerobia y el vermicompostaje [11-13].

El compostaje es de las tecnologías de mayor aplicación para el manejo de los biorresiduos en países en desarrollo, debido a aspectos como su bajo costo de inversión, operación sencilla y la generación de un producto de valor agregado cuyas propiedades fisicoquímicas y biológicas contribuyen a mejorar la disponibilidad de materia orgánica y nutrientes en el suelo [12, 14-18]. En el caso de Colombia, las plantas de compostaje de biorresiduos se han instalado principalmente en municipios con poblaciones menores a 15.000 habitantes (i.e. 78% de las instalaciones) y su implementación no ha sido efectiva [19] como consecuencia de inadecuados diseños, falencias operacionales y financieras, carencia de voluntad política y calidad objetable de biorresiduos y productos, situación similar a la reportada en otros países en desarrollo como Brasil, Etiopia, India y Malasia [5,8,20].

A pesar de que existe una amplia documentación en torno del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo, los principales esfuerzos investigativos se enfocan en determinar el efecto de variables como aireación, humedad, relación C/N, tamaño de partícula, incorporación de inóculos y de materiales de enmienda o de soporte como estrategias para reducir el tiempo del proceso, hacerlo más eficiente y mejorar la calidad del producto [21,22]. Así mismo, autores como Li *et al.*[23], Komilis [24] y Oviedo-Ocaña *et al.*[25], resaltan que a pesar de desarrollarse numerosas investigaciones y avances en el campo del compostaje de biorresiduos, se presentan retos para mejorar la calidad del producto y ahondar en el conocimiento del proceso. Uno de los aspectos críticos en países en desarrollo está relacionado con la limitada calidad del producto generado al utilizar solo biorresiduos como sustrato, ya que generalmente no cumple con todos los estándares de calidad [5,8,26] ni satisface los requerimientos de los sistemas agroambientales en los que se emplea.

En este artículo se presentan las tendencias de investigación durante el periodo 2006-2017 en el campo de compostaje de biorresiduos a nivel mundial. Para tal efecto, se emplearon herramientas bibliométricas que son fundamentales para la captación de información, su análisis y toma de decisiones. A partir del análisis de la información, se desarrolla una reflexión crítica sobre las tendencias de investigación aplicables al contexto de países en desarrollo, que permitan optimizar el proceso y mejorar la calidad del producto del compostaje de biorresiduos.

2. Material y métodos

Se realizó una búsqueda sistemática de información en las bases de datos especializadas Scopus y Google Scholar, empleando las palabras clave: “Sustainability AND composting”, “Biowaste OR Food Waste AND Composting”, “Quality AND Composting", "composting AND climate change" and "use of food waste”. Teniendo en cuenta que el propósito era analizar tendencias actuales, se consideraron los artículos publicados a partir de enero de 2006 hasta septiembre de 2017.

La información obtenida de las ecuaciones de búsqueda fue procesada mediante los software RefViz® y Tlab® en versión libre; RefViz® se empleó para conformar galaxias con los 129 artículos resultantes de las ecuaciones de búsqueda; cada galaxia estuvo constituida por artículos que presentaban semejanza o proximidad entre sus palabras claves y permitían su compilación. Las galaxias fueron posteriormente agrupadas en grupos temáticos para determinar las tendencias de investigación; estos grupos se conformaron tomando como criterio aspectos convergentes o semejanzas en los temas abordados por cada galaxia. De otro lado, Tlab® se utilizó para establecer cuál de los grupos encontrados presentó mayor co-ocurrencia de palabras claves a través de la función coseno y determinar las tendencias investigativas de mayor importancia.

Para el análisis de la información, debido al considerable número de publicaciones, se seleccionaron 22 artículos de lectura obligatoria considerando dos criterios: número de citaciones e impacto del artículo. En el primer caso, se tuvo como referencia la frecuencia en el número de citaciones, revisándose aquellos con 22 o más citaciones. En el segundo caso, para artículos que no cumplían con el primer criterio (i.e. aquellos artículos publicados recientemente y que en el momento pueden no tener la frecuencia de citación propuesta), se realizó la lectura de los resúmenes y conclusiones y se seleccionaron aquellos que realizan una contribución aplicable al contexto de estudio.

Finalmente, se realizó una reflexión crítica sobre las tendencias de investigación identificadas y el potencial de aplicación en países en desarrollo como alternativas para la optimización del proceso. Para tal efecto, se tuvieron en cuenta las publicaciones específicas que muestran los resultados de aplicación del compostaje en países en desarrollo.

3. Resultados

3.1. Tendencias investigativas en compostaje de biorresiduos

Los biorresiduos representan entre el 30 y 40% de los RSM en países desarrollados, mientras que entre el 50 y 70% en países en desarrollo [27]. El manejo de los biorresiduos en algunos países en desarrollo se ha caracterizado por su disposición final en rellenos sanitarios o vertederos a cielo abierto [10,28,29] y además, ha representado costos significativos del servicio de aseo, que varían entre el 20% y 50% con poco o ningún valor obtenido de estas prácticas [30].

A pesar de la amplia investigación e implementación del compostaje como alternativa para el manejo de biorresiduos y para el control de la contaminación ambiental, tanto en países desarrollados [31] como en países en desarrollo [32,33] aún se realizan esfuerzos investigativos para analizar variables de proceso y profundizar en una mejor comprensión

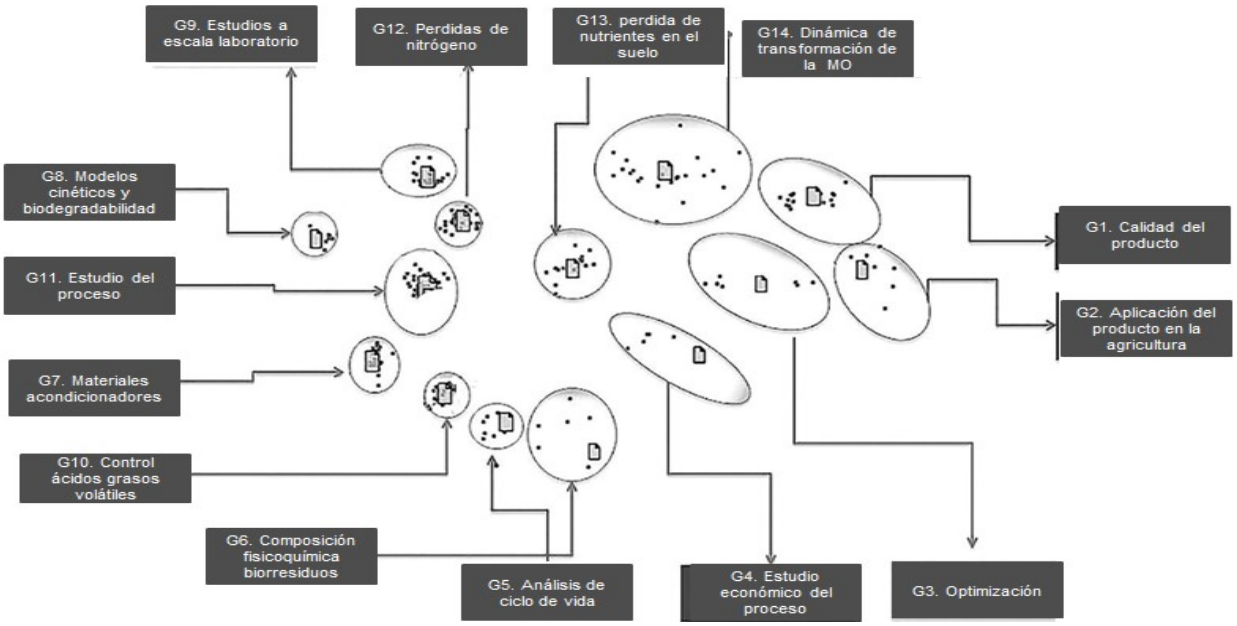


Figura 1. Tendencias investigativas en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en el periodo 2006-2017.
Nota: Una mayor proximidad entre los puntos de cada grupo significa mayor congruencia entre los temas abordados por cada grupo.
Fuente: Elaboración propia con RefViz® versión libre.

de los fenómenos bioquímicos del proceso [22,31]. De acuerdo con Sundberg y Navia [34], los procesos de compostaje y de monitoreo han evolucionado a lo largo de los años, desde técnicas muy sencillas hasta niveles más complejos y efectivos. Los procesos de compostaje pueden incluir diseños específicos de reactores y aireación controles de suministro de agua y nutrientes, así como tratamiento de olores. Además, los procedimientos de monitoreo de compostaje incluyen actividades para medir la porosidad de los residuos orgánicos y las concentraciones de oxígeno durante el proceso. De igual manera, se utilizan métodos para monitorear la calidad del producto de compost, medido por índices de madurez y estabilidad.

En la década 2006 a 2017, los 129 artículos analizados muestran que el estudio de estas variables del proceso se ha complementado con otros tópicos de investigación como se muestra en la Fig. 1.

Se encontraron 14 galaxias en torno a las investigaciones sobre el proceso de compostaje de biorresiduos (Ver Fig. 1). De éstas, se conformaron cuatro grupos: i) calidad del producto; ii) control de contaminación ambiental; iii) modelos y optimización y iv) salida y usos del producto, cada uno de estos grupos se constituyen a partir de las semejanzas y consistencia temáticas que presentaron las galaxias (Ver Tabla 1).

El grupo 1 se relaciona con el mejoramiento de la calidad del producto y se caracteriza por tener el mayor número de publicaciones asociadas [35]. En éste se plantea el efecto de la composición fisicoquímica de los biorresiduos y el uso de materiales acondicionadores (enmienda o soporte) sobre el proceso [14,35]. De igual manera, se abordan estudios tendientes a mejorar la eficiencia de transformación de la materia orgánica carbonacea y nitrógenada a través de diferentes tasas aireación [36,38], rangos de temperatura de operación, modificaciones de pH del sustrato y del proceso [39].

Tabla 1.
Agrupamiento de las galaxias en grupos.

Grupo	Galaxia	Número de publicaciones
1. Calidad del producto	G6: Composición fisicoquímica sustratos	3
	G7: Materiales acondicionadores (enmienda y/o de soporte)	29
	G11: Estudio de parámetros de proceso	23
2. Control de contaminación ambiental	G5: Análisis ciclo de vida	8
	G10: Emisión de compuestos orgánicos volátiles.	8
	G12: Pérdidas de nitrógeno en el proceso y generación de olor	12
	G13: Estudios de lixiviación de nutrientes y movilidad de metales en el suelo	7
3. Modelos y optimización	G8: Modelos cinéticos y biodegradabilidad	10
	G9: Estudios a escala de laboratorio	11
	G3: Optimización del proceso	4
4. Salida y uso del producto	G1: Usos del producto	5
	G2: Aplicación del producto en agricultura	4
	G4: Estudio económico	2
	G14: Dinámica de transformación del producto en el suelo	3

Nota: G: Galaxia
Fuente: Elaboración propia

Uno de los aspectos a resaltar en el grupo 1 está relacionado con estudios para reducir los tiempos del proceso, a través del estudio de las tasas de biodegradación de los biorresiduos [40,41], incorporación de materiales de enmienda, de soporte o inóculos con la finalidad de determinar su efecto en el proceso y por ende en la calidad del producto final. Esto como consecuencia de que el compostaje de biorresiduos no ha sido efectivo en plantas de

compostaje de países en desarrollo como lo sugieren Oviedo-Ocaña *et al.* [19].

Respecto al grupo 2, se abordan temas relacionados con impactos ambientales asociados a la emisión de GEI y pérdida de potenciales nutrientes en el proceso como el nitrógeno. Esto se corrobora con el número de publicaciones relacionadas con el análisis de ciclo de vida-ACV de los biorresiduos (8 publicaciones) y con los estudios enfocados en minimizar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (8 publicaciones), líneas que han llamado la atención debido a la generación de olores, emisiones gaseosas e incidencia de las variables fisicoquímicas sobre el proceso [42-44].

El grupo 3 muestra que los estudios a escala de laboratorio (reactores con volúmenes entre 5L y 300 L con estrictas configuraciones para minimizar las pérdidas de calor, trampas de gases, cuantificadores de flujo de aire e instrumentos para la medición de oxígeno y dióxido de carbono) permiten simular el proceso de compostaje con cierta proximidad respecto de lo observado en estudios a escala real [15,45]. Este tipo de estudios brinda la oportunidad para analizar variables de interés en el proceso, minimizando los costos que podrían representar estudios a una mayor escala. Los resultados experimentales encontrados en estos ensayos, son usualmente contrastados con modelos cinéticos de biodegradación de la materia orgánica, generalmente basados en una cinética de orden uno [46], para calibrar variables de los modelos (Tasas de degradación del sustrato, tasa de consumo de oxígeno o de producción de dióxido de carbono, generación de nitritos y nitratos, emisión de compuestos orgánicos volátiles- COV y NH_3) y con ello intentar predecir el comportamiento que tendrá el proceso y la posible calidad del producto. En la actualidad se proponen modelos biológicos que consideran la ecuación de Monod y la participación de diferentes organismos implicados en el proceso [47], así como modelos fundamentados en balances de masa o energía en torno al proceso de compostaje [48, 49], no obstante, son pocos los estudios que consideran ambos tipos de modelos, entre ellos el propuesto por Sole *et al.* [50].

Finalmente, el grupo 4 está directamente relacionado con los usos potenciales del producto en sistemas agroambientales. Uno de los criterios de calidad del producto se relaciona con la estabilidad del material, el cual se puede determinar a través de pruebas respirométricas (i.e. Índice de la Respiración Dinámico-DRI_{24}, Índice de Generación Dinámica Acumulativa de CO_2-CRI; Cociente Respiratorio-RQp), las cuales han sido ampliamente aplicadas y aceptadas [51,52].

De otro lado, otro criterio de calidad es la madurez del producto, que se ha determinado a partir de variables como pH, conductividad eléctrica, la relación de absorbancia (con diferente longitud de onda) y los ensayos de fitotóxicidad con semillas de rápida germinación [53] que se caracterizan por presentar una buena aproximación a los potenciales efectos inhibitorios para el crecimiento de las plantas [24,54]. No obstante, en la literatura se resalta la necesidad de ahondar en el desarrollo de técnicas estandarizadas para caracterizar la calidad del producto ya sea a través de métodos físicos, químicos, o biológicos como lo sugiere Komilis *et al.* [24]. Respecto a esto, Luo *et al.*[55] resaltan la necesidad de ahondar en el estudio de la madurez del producto final mediante la estandarización de pruebas de germinación, para lo cual sugieren estandarizar el tipo de semillas a emplear (semillas que sean sensibles a cambios en la concentración de compuestos fitotóxicos); el número de semillas utilizadas (basados en la probabilidad binomial, la germinación de una semilla incrementa conforme su número en una caja de Petri sea mayor) a fin de no obtener resultados que dificulten su comparación con otros estudios; la reducción de interferencias por la humedad de la muestra tomada en diferentes tiempos de proceso así como también, el desarrollo de técnicas simplificadas que puedan ser implementadas *in situ* en las plantas de compostaje de pequeña escala [19]. De otro lado, Van Fan *et al.* [56] han considerado también esta disyuntiva analizando que parámetros son relevantes para caracterizar el producto final, encontrando correlaciones entre parámetros que tienen un grado de complejidad superior y de mayor costo (i.e. ácidos húmicos y fúlvicos, cuantificación de carbono soluble en agua, actividad enzimática) respecto a otros de menor complejidad (i.e. sólidos volátiles, cuantificación de oxígeno y dióxido de carbono, materia orgánica, pH, contenido de nutrientes, color, olor entre otros) proponiendo la medición de estos parámetros a fin de que ofrezcan una información aproximada que permita la toma de decisiones en instalaciones de compostaje.

Teniendo en cuenta la variabilidad en la calidad del producto en las plantas de compostaje, una tendencia emergente para el análisis de la calidad del producto compete a la aplicación de la Teoría de Conjuntos Difusos [57], como un estrategia para clasificar el producto acorde con sus características y para potenciar la selección de sistemas agroambientales.

Si bien la mejora de la calidad del producto final es uno de los puntos de investigación en el compostaje de biorresiduos, este tópico está relacionado también con aspectos económicos y por ende con la sostenibilidad financiera de las plantas de compostaje (galaxia G4). En la actualidad, un estudio de Proietti *et al.* [58], revela la importancia de mejorar la calidad del producto final a través de la optimización del grado de mezcla entre el sustrato con materiales de enmienda o de soporte, para lo cual recomienda una adecuada selección de los materiales a fin de maximizar la calidad del producto y minimizar costos de adquisición y operación en las plantas. Aunque el funcionamiento de las plantas de compostaje varía dependiendo del tipo de tecnología empleada (i.e. aireación forzada o por volteo manual, proximidad y accesibilidad de materiales a la instalación), y por consiguiente su situación financiera, los esquemas de aprovechamientos en las plantas deben ser flexibles en términos de recursividad, resiliencia y apoyarse en estudios que optimicen el proceso y trate de mantener una calidad del producto que garantice su salida.

3.2. Análisis de las tendencias de investigación más estudiadas en el Compostaje de biorresiduos

A partir de los estudios para el compostaje de biorresiduos en países en desarrollo, se encontró que la calidad del producto final y la optimización del proceso son

las tendencias más estudiadas en la última década (Ver Fig. 2A). Esto puede estar asociado a que en diferentes países en desarrollo (e.g. Brasil, Colombia, Ecuador, México, Nigeria, India), el producto derivado solamente del compostaje de biorresiduos presenta características fisicoquímicas que limitan su uso y comercialización (i.e. mejorador de suelos), tales como elevado contenido de material inerte y conductividad eléctrica, pH alcalino y concentraciones limitadas de nutrientes que le restan valor agronómico [25]. Estas características hacen que el producto presente restricciones y no cumpla con los valores mínimos requeridos de algunos parámetros en los estándares o guías de calidad de la Comunidad Europea [59] o normativas latinoamericanas (i.e. Australian Standar; Guideline of The Fertilizer Order 1985; NADF-020-AMBT-2011; NCh2880; NBR 13591; NTC 5167).

Diferentes experiencias [5,19,26,60] en plantas de compostaje de biorresiduos de países en desarrollo, resaltan la importancia de mejorar el proceso a través de la evaluación de estrategias que se ajusten mejor a cada contexto (i.e. materiales de enmienda o de soporte, aireación, tamaño de partícula), lo hagan más eficiente en términos de biodegradación y maximice el contenido de nutrientes en el producto. Sin embargo, debido a factores como la variabilidad en las características fisicoquímicas de los biorresiduos y en las condiciones operacionales del proceso, las plantas requieren de un periodo prolongado (entre dos y seis meses) para alcanzar la estabilidad y madurez del producto [40,41], incidiendo en la extensión de las plantas de compostaje, las cuales en algunos casos, no han sido concebidos para estos tiempos de proceso [61].

La Fig. 2B muestra la co-ocurrencia de las palabras claves en torno a la calidad del producto final y la Fig. 2C, presenta las palabras que guardan relación con la optimización del proceso. La proximidad entre las palabras claves respecto a "*optimización*" y "*calidad del producto*" indican una mayor frecuencia de co-ocurrencia. En el caso contrario, la lejanía entre las palabras muestra que son aspectos que tienen baja relación con la tendencia a analizar.

El análisis de co-ocurrencias de las Figs. 2B y 2C muestran que están directamente relacionados, dado que una optimización en el proceso puede generar una mejora en la calidad del producto. Se observa que el uso de diferentes materiales acondicionadores en el compostaje de biorresiduos es uno de los temas más investigados, ya sea para la bioestimulación de los microorganismos a través del incremento de la disponibilidad de nutrientes o a través de la mejora en la estructura física de la pila para facilitar el intercambio de gases en la matriz sólido-liquida-gaseosa [62,63].

Los materiales más empleados en el compostaje de biorresiduos (Ver Fig. 3), corresponden a los residuos verdes y al aserrín que se caracterizan por aportar nutrientes como carbono o nitrógeno y soporte estructural. Otros materiales como la cascarilla de arroz, virutas de madera y el compost también han sido utilizados presentando bondades y limitaciones tanto en el desarrollo del proceso como en la calidad del producto. En menor proporción se emplean insumos químicos cuyo propósito es acondicionar el pH del sustrato y del proceso. Li *et al.* [23] resaltan la importancia de definir condiciones de mezcla óptima a fin de maximizar calidad y minimizar costos de adquisición y operación en las plantas. Aspecto que se resalta en la Fig. 2B, dado que una de las prioridades en las plantas de compostaje de países en desarrollo, dadas sus características económicas, debe ser la sostenibilidad ambiental y financiera, lo cual implica la selección de materiales acondicionadores a bajo costo y fácil manipulación por parte de los operarios de las plantas.

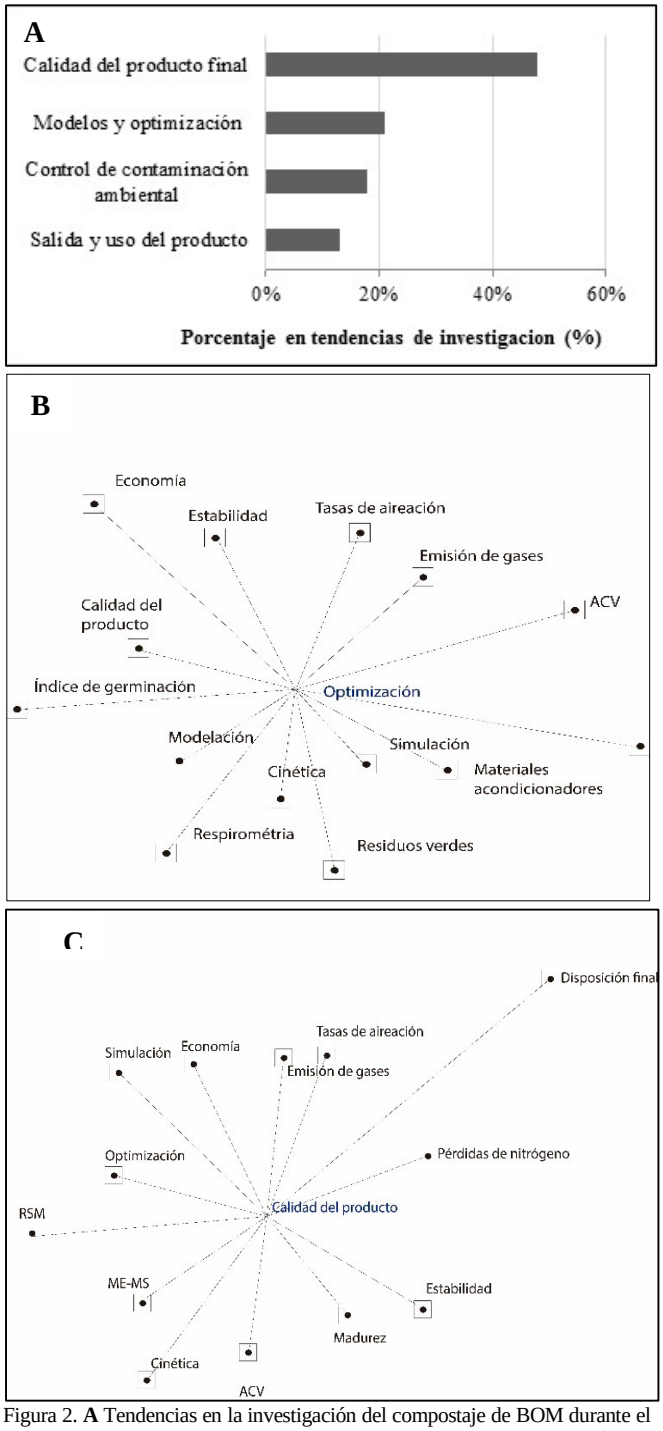


Figura 2. **A** Tendencias en la investigación del compostaje de BOM durante el 2006 al 2016. **B** Co-ocurrencias de palabras en torno a la optimización del proceso. **C** Co-ocurrencias de palabras en torno a la calidad del producto final. Fuente: elaboración propia.

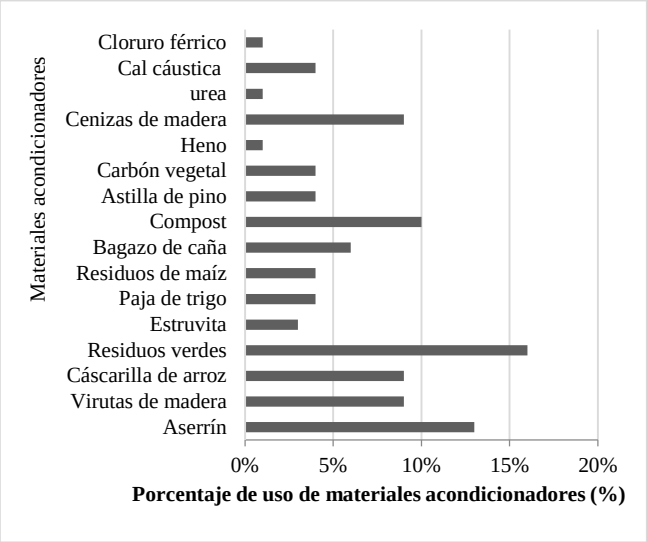


Figura 3. Frecuencia porcentual de materiales de enmienda y soporte más utilizados para el compostaje de biorresiduos reportados en 74 estudios. Fuente: elaboración propia.

Para ello, la selección de los materiales puede involucrar herramientas del análisis multicriterio para el apoyo en la toma de decisiones [64] y potencializar efectos sinérgicos en el proceso; este aspecto ha sido abordado en la selección de potenciales materiales para el aprovechamiento de biorresiduos en plantas de compostaje que han mostrado que la selección adecuada contribuye a mejorar la calidad del producto [19].

Pese a que el empleo de diferentes materiales puede mejorar la calidad del producto final, aún existen limitaciones para hacerlo competitivo frente otros productos mejoradores de suelo y fertilizantes. En países como Brasil y Colombia en el contexto latinoamericano, experiencias reportadas por Barreira [5], Marmolejo [61] y Oviedo-Ocaña [19] subrayan que el producto cumple con los estándares de calidad con la incorporación de materiales de acondicionamiento, pero aún se requieren investigaciones que permitan maximizar la calidad del producto.

De otro lado, la pérdida de nitrógeno en el proceso, principalmente en forma de amoniaco, es uno de los temas más abordados en las investigaciones debido a su relación con la calidad del producto y a las emisiones de NOx que se relacionan con los GEI [65]. Como alternativa para mejorar la calidad del producto final, los ensayos de escala de laboratorio pueden indicar si las opciones que se pretendan evaluar pueden ofrecer resultados satisfactorios en términos de biodegradabilidad o si por el contrario podrían afectar el proceso.

Una estrategia adicional para la optimización del proceso se fundamenta en el desarrollo y aplicación de algoritmos genéticos o modelos polinomiales empíricos que tratan de simular el proceso con un alto nivel de confianza. Sin embargo, pocos estudios han considerado la optimización numérica con la finalidad de definir las condiciones más adecuadas para el proceso en términos de humedad, aireación y disponibilidad de nutrientes, y no siempre se realizan respecto a los biorresiduos sino a otros residuos como los lignocelulíticos [66]. Los estudios relacionados con los biorresiduos se enfocan principalmente en la minimización de COV's y pocos se han centrado en maximizar las tasas de biodegradación [4,66]. Esto muestra un campo promisorio de investigación, que incluyen el uso de algoritmos genéticos o redes neuronales como una manera de reproducir datos a partir de ensayos experimentales y utilizar funciones objetivo que permitan definir las condiciones óptimas del proceso.

4. Discusión

4.1. Algunas reflexiones sobre las tendencias del proceso de compostaje de biorresiduos en países en desarrollo

El proceso de compostaje de biorresiduos ha mostrado avances en la última década respecto a las investigaciones precedentes, las cuales se centraban en definir las condiciones adecuadas para el desarrollo del proceso. Estos avances investigativos han estado enfocados en la identificación de alternativas para mejorar el proceso y la calidad del producto, analizando la incidencia independiente de cada parámetro sobre la evolución del proceso. En contraste, pocos estudios han considerado el efecto conjunto del ajuste de diferentes parámetros (i.e. aireación, relación C/N, humedad) que ayuden a comprender la dinámica del proceso con una mayor aproximación [42-44]. El desarrollo de este tipo de investigaciones, soportados en estudios cinéticos del proceso y en la incorporación de herramientas como las redes neuronales o algoritmos genéticos, pueden contribuir a la construcción de modelos empíricos que describan el comportamiento del proceso, predecir calidad del producto y definir las condiciones operacionales más adecuadas.

Respecto al desarrollo y aplicabilidad de modelos matemáticos para la simulación del proceso, gran parte de éstos presentan variabilidad en sus algoritmos y en muchos casos no consideran todos los organismos que intervienen en el proceso como consecuencia de su complejidad. Baptista *et al.* [49] recomiendan comparar los datos obtenidos a escala de laboratorio con su respectiva simulación con los resultados obtenidos a escala de campo, para comparar las incertidumbres obtenidas en las dos escalas y analizar cómo se restringe el error.

Otro factor en el que se ha evidenciado variabilidad es en la duración de los ensayos a escala de laboratorio, pues se reportan periodos que varían de horas [67] a días [15, 68]. De acuerdo con de Guardia *et al.* [37] la mayor parte de la degradación de la materia orgánica biodegradable se lleva a cabo durante las primeras fases del proceso mientras que compuestos de lenta degradación, requiere prolongar el ensayo hasta completar su degradación y alcanzar su estabilidad. Algunos autores [69] proponen suspender el ensayo cuando la tasa de producción de dióxido de carbono descienda a un valor estable y la tasa de consumo de oxígeno sea equivalente o inferior al 5% del volumen total producido hasta ese momento. Estos dos indicadores han mostrado ser fundamentales para la clasificación del producto final en términos de estabilidad y se han validado en el manejo de otro tipo de residuos como los lodos provenientes de sistemas de

tratamiento de aguas residuales [52]. No obstante, estos indicadores pueden ser complementados con otros de naturaleza fisicoquímica tales como la relación ácidos húmicos/ fúlvicos y mineralización de carbono y nitrógeno.

Acorde con las tendencias de investigación expuestas se presentan oportunidades de investigación en países en desarrollo como Colombia, donde aún el compostaje es una tecnología incipiente. Para esto, es fundamental profundizar en la caracterización fisicoquímica de los biorresiduos debido su variabilidad espacial y temporal [8] y analizar el efecto de esta variación, en la duración del proceso y calidad del producto. De igual manera, el conocimiento de la calidad de los biorresiduos resulta importante para la selección de ME y/o MS que puedan suplir las limitantes nutricionales de los biorresiduos. En este aspecto, la aplicación de herramientas multicriterio y sistemas de información geográfica, pueden contribuir a mejorar el proceso de selección de estos materiales con el mayor beneficio técnico, ambiental y económico.

El campo de la simulación del proceso de compostaje de biorresiduos es un reto a considerar en Colombia; la generación de modelos usando inteligencia artificial a través de lógica difusa, redes neuronales, algoritmos genéticos u otros métodos heurísticos, podrían permitir la optimización del proceso y la calidad del producto final a través de la definición de las condiciones operativas más adecuadas y el ME y/o MS más idóneo obtenidos aplicando las herramientas multicriterio.

Finalmente, es necesario evaluar la calidad del producto desde diferentes perspectivas: biológicas (indicadores microbiológicos, de estabilidad y de madurez), físicas (densidad, retención de agua, conductividad eléctrica), químicas (pH, capacidad de intercambio catiónico, nutrientes, materia orgánica) y agronómicas; ésta última tiene incidencia directa sobre los potenciales usos del producto final. Investigaciones tendientes al mejoramiento de la calidad son fundamentales debido a que definen el mercadeo y la comercialización del producto y por consiguiente, la sostenibilidad financiera de las plantas de compostaje. Adicionalmente, debe profundizarse en estudios que muestren la relación aplicación de productos y suelos, considerando los problemas de agotamiento de la materia orgánica de los suelos en el contexto colombiano [70].

5. Conclusiones

Este trabajo mostró la prioridad de mejorar la calidad del producto obtenido del compostaje de biorresiduos de países en desarrollo, para lo cual son fundamentales estudios de optimización del proceso y de definición de indicadores estandarizados de la calidad del producto final, que favorezcan la obtención de resultados confiables, reproducibles y comparables entre diferentes investigaciones. Algunas propuestas que se plantean como aporte son: *i.* Incorporar herramientas para la selección de materiales acondicionadores que consideren múltiples criterios y estén sujetas al contexto que permitan obtener un efecto sinérgico sobre el proceso (materiales con características fisicoquímicas complementarias a los biorresiduos) y conduzcan a su optimización; *ii*. Realizar ensayos a escala laboratorio en conjunto con la aplicación de modelos cinéticos dinámicos para la simulación del proceso a partir de datos experimentales, y con ello, determinar potenciales acciones correctivas; *iii*. Optimización del proceso de compostaje a partir de redes neuronales o desarrollo de modelos empíricos que permitan definir las condiciones más adecuadas y mejoren la calidad del producto final; iv) realizar estudios de viabilidad económica en plantas de compostaje articulados con la optimización del proceso.

Finalmente, se resalta la necesidad de redefinir aspectos normativos de la calidad del producto final, que pueden estar orientados a establecer estándares de calidad en función de los posibles usos del producto. Así mismo, podría considerar las condiciones de contexto por las diferencias fisicoquímicas que presentan los biorresiduos entre regiones geográficas

Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos por el apoyo financiero al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Investigación – COLCIENCIAS a través de las convocatorias 727 de 2015 para financiación de los estudios de doctorado nacionales otorgada al Ing. Jonathan Soto Paz. E.R y al proyecto con C. I. 2962 de la Universidad del Valle. Oviedo-Ocaña agradece a la Universidad Industrial de Santander por el soporte para la escritura de este artículo.

Referencias

[1] Aalok, A., Tripathi, A. and Soni, P., Vermicomposting: a better option for organic solid waste management. J. Hum. Ecol, 24(1), pp. 59-64, 2008.

[2] Thi, N.B.D., Kumar, G. and Lin, C.-Y., An overview of food waste management in developing countries: Current status and future perspective. Journal of Environmental Management, 157, pp. 220-229, 2015. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.04.022.

[3] Wang, H. and Nie, Y.M. s.w.c.a.m.i.C., Municipal solid waste characteristics and management in China. Journal of the Air & Waste Management Association, 51, pp. 250-263, 2001. DOI: 10.1080/10473289.2001.10464266

[4] Kumar, M., Ou, Y.-L. and Lin, J.-G. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. Waste Management, 30 (4), pp. 602-609, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.11.023.

[5] Barreira, L.P., Philippi Junior, A. and Rodrigues, M.S., Usinas de compostagem do Estado de São Paulo: qualidade dos compostos e processos de produção. Eng. Sanit. Ambient, 11(4), pp. 385-393, 2006.

[6] Zhang, R., El-Mashad, H.M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C. and Gamble, P., Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. Bioresource Technology, 98(4), pp. 929-935, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.02.039.

[7] Sitorus, B., Sukandar, S. and Panjaitan, S., Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes. Energy Procedia, 32, pp. 176-182, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.023

[8] Faverial, J., Boval, M., Sierra, J. and Sauvant, D., End-product quality of composts produced under tropical and temperate climates using different raw materials: A meta-analysis. Journal of Environmental Management, 183(Pt3), pp. 909-916, 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.09.057

[9] Götze, R., Boldrin, A., Scheutz, C. and Astrup, T.F., Physico-chemical characterisation of material fractions in household waste: Overview of data in literature. Waste Management, 49, pp. 3-14, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.01.008.

[10] Noguera, K. y Olivero, J., Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso colombiano. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 34(132), pp. 347-356, 2010.

[11] De Feo, G., De Gisi, S. and Williams, I.D., Public perception of odour and environmental pollution attributed to MSW treatment and disposal facilities: A case study. Waste Management, 33(4), pp. 974-987, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.12.016.

[12] Saer, A., Lansing, S., Davitt, N.H. and Graves, R.E., Life cycle assessment of a food waste composting system: Environmental impact hotspots. Journal of Cleaner Production, 52, pp. 234-244, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.03.022

[13] Bernstad-Saraiva-Schott, A., Wenzel, H. and La Cour-Jansen, J., Identification of decisive factors for greenhouse gas emissions in comparative life cycle assessments of food waste management - An analytical review. Journal of Cleaner Production, 119, pp. 13-24, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.079.

[14] Adhikari, B., Barrington, S., Martinez, J. and King, S., Characterization of food waste and bulking agents for composting. Waste Management, 28(5), pp. 795-804, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.08.018.

[15] Lashermes, G., Barriuso, E., Le Villio-Poitrenaud, M. and Houot, S., Composting in small laboratory pilots: Performance and reproducibility. Waste Management, 32(2), pp. 271-277, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.011

[16] Coelho, C., Cavani, L., Halle, A.t., Guyot, G., Ciavatta, C. and Richard, C., Rates of production of hydroxyl radicals and singlet oxygen from irradiated compost. Chemosphere, 85(4), pp. 630-636, 2011. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.007.

[17] Wu, T.Y., Lim, S.L., Lim, P.N. and Shak, K.P.Y., Biotransformation of biodegradable solid wastes into organic fertilizers using composting or/and vermicomposting. 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014 (JJ Klemes (HU) 23 August 2014 to 27 August 2014): The Italian Association of Chemical Engineering; 2014. pp. 1579-1584.

[18] Abu-Bakar, R.b., Froome, C., Elwan, A., Arief, Y.Z., Adzis, Z. and Muhamad, N.A., 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) 2014, Sustainable Energy for Green MobilityLife Cycle Assessment-based Environmental Impact Comparative Analysis of Composting and Electricity Generation from Solid Waste. Energy Procedia, 68, pp. 186-194, 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.247.

[19] Oviedo, R., Marmolejo, L. and Torres, P., Advances in research on biowaste composting in small municipalities of developing countries. Lessons from Colombia. Revista Ingenieria Investigacion y Tecnologia, 18(1), pp. 31-42, 2017.

[20] Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., López, M., López-Lluch, D.B., Gavilanes-Terán, I. and Moral, R., Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. Journal of Cleaner Production, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.178.

[21] Diaz, L.F.S.G., Diseño de sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en localidades menores a 50.000 habitantes. Foro – Taller. Corporación Autónoma Regional del Quindío – CRQ, UNICEF y Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2008.

[22] Stentiford, E. and de Bertoldi, M., Composting process, in: Christensen, T., Solid Waste Technology & Management, 1ra Ed., United Kingdom, Blackwell Publishing Ltd., 2010, pp 515-532.

[23] Li, Z., Lu, H., Ren, L. and He, L., Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. Chemosphere, 93(7), pp. 1247-1257, 2013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.06.064.

[24] Komilis, D.P., Compost quality: Is research still needed to assess it or do we have enough knowledge? Waste Management, 38, pp. 1-2, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.023.

[25] Oviedo, E., Dominguez, I., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L., Komilis, D. and Sanchez, A., A qualitative model to evaluate biowaste composting management systems using causal diagrams: A case study in Colombia. Journal of Cleaner Production, 133, pp. 201-211, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.115.

[26] Saha, J., Panwar, N. and Singh, M., An assessment of municipal solid waste compost quality produced in different cities of India in the perspective of developing quality control indices. Waste Management, 30(2), pp. 192-201, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.041.

[27] Hoornweg, D. and Bhada-Tata, l.P., What a waste: A global review of solid waste management. Washington DC, USA, Urban Development Series Knowledge Papers No. 15. The World Bank, 2012.

[28] Aleluia, J. and Ferrão, P., Characterization of urban waste management practices in developing Asian countries: A new analytical framework based on waste characteristics and urban dimension. Waste Management, 58, pp. 415-429, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.05.008.

[29] Henry, R.K., Yongsheng, Z. and Jun, D., Municipal solid waste management challenges in developing countries–Kenyan case study. Waste management, 26(1), pp. 92-100, 2006. DOIO: 10.1016/j.wasman.2005.03.007

[30] Mundial, B., Municipal solid waste: Turninga problem into resource 2014.

[31] Golueke, C.G., Understanding the process. The Biocycle Guide to the art and science of composting. The JG Press, Inc. Emmans, PA, USA, 1991, pp. 14-27.

[32] Slater, R. and Frederickson, J., Composting municipal waste in the UK: Some lessons from Europe. Resources, Conservation and Recycling, 32(3), pp. 359-374, 2001. DOI: 10.1016/S0921-3449(01)00071-4

[33] Golueke, C. and Diaz, L., Historical review of composting and its role in municipal waste management. The science of composting, Springer, 1996, pp. 3-14.

[34] Sundberg, C. and Navia, T., Is there still a role for composting?. Waste Management & Research 32(6), pp. 459-460, 2014. DOI: 10.1177/0734242X14536094

[35] Chang, J.I. and Chen, Y.J., Effects of bulking agents on food waste composting. Bioresource Technology, 101(15), pp. 5917-5924, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.042.

[36] Evangelou, A.C., Chintzios, V.T. and Komilis, D.P., Effect of aeration rate on the respiration activity of the fresh organic fraction of municipal solid wastes. EurAsia Waste Management Symposium, 2-4 May 2016, YTU 2010 Congress Center, İstanbul/Türkiye, 2016.

[37] de Guardia, A., Mallard, P., Teglia, C., Marin, A., Le Pape, C., Launay, M., Benoist, J.C. and Petiot, C., Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 1, Biodegradability, stabilization kinetics and temperature rise. Waste Management, 30(3), pp. 402-414, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.10.019

[38] Almeira, N., Komilis, D., Barrena, R., Gea, T. and Sánchez, A., The importance of aeration mode and flowrate in the determination of the biological activity and stability of organic wastes by respiration indices. Bioresource Technology, 196, pp. 256-262, 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.07.102.

[39] Sundberg, C. and Jönsson, H., Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration. Waste Management, 28(3), pp. 518-526, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.01.011

[40] Awasthi, M.K., Pandey, A.K., Khan, J., Bundela, P.S., Wong, J.W. and Selvam, A., Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. Bioresource Technology, 168, pp. 214-221, 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.048

[41] Patidar, A., Gupta, R. and Tiwari, A., Integrated composting and vermicomposting: A boon to industry for waste clearance. International Journal of Environment and Waste Management, 13(3), pp. 274-290, 2014. DOI: 10.1504 / IJEWM.2014.059933.

[42] Scaglia, B., Orzi, V., Artola, A., Font, X., Davoli, E., Sanchez, A. and Adani, F., Odours and volatile organic compounds emitted from municipal solid waste at different stage of decomposition and relationship with biological stability. Bioresource technology, 102(7), pp. 4638-4645, 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.016.

[43] Pagans, E., Font, X. and Sánchez, A., Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by biofiltration. Journal of Hazardous Materials, 131(1), pp. 179-186, 2006. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.017.

[44] Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., Sánchez-Monedero, M., Roig, A., Cayuela, M. and Mondini, C., Greenhouse gas emissions from organic waste composting. Environmental Chemistry Letters, 13(3), pp. 223-238, 2015. DOI: 10.1007/s10311-015-0507-5.
[45] Petiot, C. and De Guardia, A., Composting in a laboratory reactor: a review. Compost Science & Utilization, 12(1), pp. 69-79, 2004. DOI: 10.1080/1065657X.2004.10702160
[46] Evangelou, A., Calabrò, P.S., Greco, R., Sánchez, A. and Komilis, D., Biodegradation activity of eight organic substrates: A correlation study of different test methods. Waste and biomass valorization, 2016, pp. 1-14. DOI: 10.1007/s12649-016-9532-2.
[47] Denes, J., Tremier, A., Menasseri-Aubry, S., Walter, C., Gratteau, L. and Barrington, S., Numerical simulation of organic waste aerobic biodegradation: A new way to correlate respiration kinetics and organic matter fractionation. Waste Management, 36(0), pp. 44-56, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.013.
[48] Zhang, Y., Lashermes, G., Houot, S., Doublet, J., Steyer, J.P., Zhu, Y.G., Barriuso, E. and Garnier, P., Modelling of organic matter dynamics during the composting process. Waste Management, 32(1), pp. 19-30, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.008.
[49] Baptista, M., Silveira, A. and Antunes, F., Theoretical analysis of the kinetic performance of laboratory-and full-scale composting systems. Waste Management & Research, 30(7), pp. 700-707, 2012.
[50] Sole-Mauri, F., Illa, J., Magrí, A., Prenafeta-Boldú, F. and Flotats, X., An integrated biochemical and physical model for the composting process. Bioresource Technology, 98(17), pp. 3278-3293, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.07.012.
[51] Barrena, R., Vázquez, F. and Sánchez, A., The use of respiration indices in the composting process: A review. Waste Management & Research, 24, pp. 37-47, 2006. DOI: 10.1177/0734242X06062385.
[52] Ponsá, S., Gea, T. and Sánchez, A., Different indices to express biodegradability in organic solid wastes. Waste Managament, 39(2), pp. 706-712, 2010. DOI: 10.2134 / jeq2009.0294.
[53] Yuan, J., Chadwick, D., Zhang, D., Li, G., Chen, S., Luo, W., Du, L., He, S. and Peng, S., Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting. Waste Management, 56, pp. 403-410, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.07.017.
[54] Komilis, D.P. and Tziouvaras, I.S., A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts. Waste Management, 29(5), pp. 1504-1513, 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.10.016
[55] Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G. and Zhang, D., Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. Waste Management, 2017. DOI: DOI: 10.1016/j.wasman.2017.09.023.
[56] Van Fan, Y., Lee, C.T., Klemeš, J.J., Bong, C.P.C. and Ho, W.S., Economic assessment system towards sustainable composting quality in the developing countries. Clean Technologies and Environmental Policy, 18(8), pp. 2479-2491, 2016. DOI: 10.1007/s10098-016-1209-9.
[57] Zhang, Y.M., Huang, G.H., He, L. and Li, Y.P., Quality evaluation for composting products through fuzzy latent component analysis. Resources, Conservation and Recycling, 52(10), pp. 1132-1140, 2008. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.05.003.
[58] Proietti, P., Calisti, R., Gigliotti, G., Nasini, L., Regni, L. and Marchini, A., Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted. Journal of Cleaner Production, 137, pp. 1086-1099, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.158.
[59] Cesaro, A., Belgiorno, V. and Guida, M., Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use. Resources, Conservation and Recycling, 94(0), pp. 72-79, 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.11.003.
[60] Ekelund, L. and Nyström, K., Composting of municipal waste in South Africa. Sustainability aspects Uppsala Universitet, Sweden, 2007.
[61] Marmolejo, L., Marco conceptual para el aprovechamiento en plantas de manejo de residuos sólidos de poblaciones menores a 20.000 habitantes del Norte del Valle del Cauca, Colombia. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2011.
[62] Gabhane, J., William, S., Bidyadhar, R., Bhilawe, P., Anand, D., Vaidya, A. and Wate, S., Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost. Bioresource Technology, 114, pp. 382-388, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.040
[63] Yang, F., Li, G.X., Yang, Q.Y. and Luo, W.H., Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. Chemosphere, 93(7), pp. 1393-1399, 2013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.002.
[64] Escalante, H., Castro, L., Gauthier-Maradei, P. and Rodríguez-de la Vega, R., Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion. Bioresource Technology, 219, pp. 80-90, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.06.136.
[65] de Guardia, A., Mallard, P., Teglia, C., Marin, A., Le Pape, C., Launay, M., Benoist, J.C. and Petiot, C., Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 2, Nitrogen dynamic. Waste Management, 30(3), pp. 415-425, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.10.018.
[66] Bueno, P., Tapias, R., López, F. and Díaz, M., Optimizing composting parameters for nitrogen conservation in composting. Bioresource Technology, 99(11), pp. 5069-5077, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.08.087
[67] Liwarska, E., Bizukojc, M. and Ledakowicz, S., Kinetics of the aerobic biological degradation of shredded municipal solid waste in liquid phase. Water Research, 36(8), pp. 2124-2132, 2002. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00418-3.
[68] Yuan, J., Yang, Q., Zhang, Z., Li, G., Luo, W. and Zhang, D., Use of additive and pretreatment to control odors in municipal kitchen waste during aerobic composting. Journal of Environmental Sciences, 37, pp. 83-90, 2015. DOI: 10.1016/j.jes.2015.03.028.
[69] Barrena, R., Artola, A., Font, X., Gea, T., Pognani, M., Ponsá, S., Colón, J., Ruggieri, L. Y Sánchez, A., La respirometría como herramienta para la clasificación de la biodegradabilidad de residuos orgánicos. Resultados de la experiencia de 10 años. Grupo de investigación en compostaje, Departamento de Ingeniería Química, Universitat Autònoma de Barcelona, España, 2013.
[70] Cuervo, G.V. and Gómez, C.E., La desertificación en Colombia y el cambio global. Cuadernos de Geografía, (12), pp. 121-134, 2003.

J. Soto-Paz, es Ing. Sanitario, estudiante de doctorado en ingeniería, énfasis ingeniería sanitaria y ambiental de la Universidad del Valle. Asimismo, es integrante del grupo de investigación Estudio y control de la contaminación ambiental (ECCA).
ORCID: 0000-0002-9211-6435

E.R. Oviedo-Ocaña, es Ing. Sanitario, MSc. y Dr. en ingeniería por la Universidad del Valle. Es profesor asistente de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y director del grupo de investigación Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH).
ORCID: 0000-0002-8970-7322

P. Torres-Lozada, es Ing. Sanitaria, MSc. y Dra. en Ing.Civil por la Universidad de Sao Paulo. Es profesora titular de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad del Valle y directora del grupo de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA).
ORCID: 0000-0001-9323-6677

L.F. Marmolejo-Rebellón, es Ing. sanitario y Dr. en Ingeniería por la Universidad del Valle. Es profesor asociado en la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad del Valle. Asimismo, integrante del grupo de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA).
ORCID: 0000-0001-9993-2841

P.C. Manyoma-Valásquez, es Ing. Industrial y Dr. en Ingeniería por la Universidad del Valle. Es profesor asociado en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle. Asimismo, es integrante del grupo de investigación Logistica y Producción.
ORCID: 0000-0003-1479-5986

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

On the $PM_{2.5}/PM_{10}$ fraction estimation

Javier Olaya-Ochoa, Diana Paola Ovalle & Cristhian Leonardo Urbano

Escuela de Estadística, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. javier.olaya@correounivalle.edu.co, diana.ovalle@correounivalle.edu.co, cristhian.urbano@correounivalle.edu.co

Received: May 24th, 2017. Received in revised form: October 30th, 2017. Accepted: November 3rd, 2017.

Abstract
We discuss the estimation of the $PM_{2.5}/PM_{10}$ fraction, which some authors report as the $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio. Previous studies highlight the importance of this fraction in the study of the impact of airborne particles on human health and their potential use in reconstruction and imputation of $PM_{2.5}$ fine particle hourly levels from the PM_{10} coarse particle hourly levels. We suggest adapting the estimation process using different strategies for particular situations. We used the general linear model (GLM), the regression through the origin model (RTO), the generalized additive models (GAM) and the regression models based on weighted least squares (WLS).

Keywords: Environmental pollution, fine particles, thick particles, GLM, RTO, GAM, WLS.

Acerca de la estimación de la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$

Resumen
Se discute la estimación de la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$, que algunos autores reportan como la razón $PM_{2.5}/PM_{10}$. Estudios previos destacan la importancia de esta fracción en el estudio del impacto de las partículas en el aire sobre la salud de las personas y su uso potencial en la reconstrucción y en la imputación de datos de los niveles de partículas finas $PM_{2.5}$ a partir de los niveles de partículas gruesas PM_{10}. Se sugiere adaptar la estimación, mediante el uso de diferentes estrategias para situaciones particulares, incluyendo el modelo lineal general (GLM), la regresión a través del origen (RTO), los modelos aditivos generalizados (GAM) y los modelos de regresión usando mínimos cuadrados ponderados (WLS).

Palabras clave: Contaminación ambiental, partículas finas, partículas gruesas, GLM, RTO, GAM, WLS.

1. Introducción

La presencia de contaminantes en el aire se encuentra relacionada con diferentes problemas de morbilidad y mortalidad, según lo ha definido la Organización Mundial de la Salud [13]. Dentro de esos contaminantes es de especial interés el material particulado (PM), el cual se clasifica en tres tipos: partículas gruesas (PM_{10}), finas ($PM_{2.5}$) y ultrafinas (PM_1). Las partículas gruesas son aquellas con un diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 µm; las finas tienen diámetro menor que 2.5 µm; y las ultrafinas menor que 1 µm [7].

En las definiciones anteriores es importante observar que el $PM_{2.5}$ no es una parte del PM_{10}, por lo que formalmente el cociente $PM_{2.5}/PM_{10}$ es una razón. Sin embargo, los equipos de lectura están diseñados para medir la cantidad de partículas en el aire que tienen un diámetro aerodinámico menor que 10 µm, por lo que en estas mediciones de partículas gruesas se incluyen las partículas finas de un diámetro aerodinámico menor que 2.5 µm. Es por esta razón que en este trabajo se prefiere hablar de la "fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$", en lugar de hablar de la "razón $PM_{2.5}/PM_{10}$".

De acuerdo con Munir en 2017, el tamaño de las partículas en el aire es un factor decisivo para determinar el tiempo que permanecen las partículas en la atmósfera, así como para determinar en qué partes del tracto respiratorio se podrían depositar [11]. En este contexto, según Munir en 2017, la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$ es un indicador de la presencia de partículas finas en el aire que contribuye al estudio del tamaño de las partículas [11]. Gomiscek, en el 2004, se apoyan en estudios epidemiológicos generales para afirmar que la fracción de partículas finas en el aire tiene un impacto considerable sobre la salud humana, incluso en concentraciones por debajo de los límites establecidos para $PM_{2.5}$ en las normas internacionales [9]. Por otra parte, según la OMS en 2016, las partículas $PM_{2.5}$ se encuentran asociadas a la aparición de enfermedades respiratorias crónicas como

How to cite: Olaya-Ochoa, J., Ovalle, D.P. and Urbano, C.L., Acerca de la estimación de la fracción PM2.5/PM10 DYNA, 84(203), pp. 343-348, December, 2017.
© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

cáncer de pulmón, asma y pulmonía, entre otras [13]. Debido a ello, se han implementado normas para la medición del contaminante, lo cual requiere protocolos de monitoreo y vigilancia permanente. Sin embargo, al contrario de lo que sucede con la medición de partículas PM_{10}, la medición de partículas $PM_{2.5}$ suele estar restringida en los sistemas de vigilancia de la calidad del aire en ciudades de países en vía de desarrollo, debido esencialmente a problemas de costos o de implementación técnica, por lo que la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$ sería útil además como herramienta de estimación de los niveles de $PM_{2.5}$ a partir de los niveles de PM_{10}. Esta herramienta podría utilizarse bien para imputar datos faltantes en una estación, o bien para efectos de estimación en estaciones de vigilancia en los que se mide PM_{10} pero no $PM_{2.5}$. En trabajos previos [4, 17], usan modelos de regresión lineal para estimar la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$ en las ciudades de Medellín y Bogotá (Colombia), respectivamente. Adicionalmente, el departamento de protección ambiental de Hong Kong [6] propone un método de estimación de la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$, citando a Smyth en el 2006 [19], pero no dan indicaciones de las propiedades del estimador propuesto.

Este artículo evalúa varias aproximaciones para la estimación de la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$, validando sus potencialidades como herramienta de estimación, iniciando desde un modelo lineal general (GLM) [8,1], un modelo de regresión a través del origen (RTO) [12] y un modelo aditivo generalizado (GAM) [10, 20]. En lo que sigue, se describen brevemente los métodos usados, se muestran los resultados de su aplicación a un conjunto de datos particular y se formulan algunas recomendaciones para posibles usos de estos modelos en este marco.

2. Materiales y métodos

Los datos que se utilizan para ilustrar este artículo fueron colectados en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. La ciudad cuenta con un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCASC) a cargo del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente [3] y cuenta con ocho estaciones fijas en operación, así como una unidad móvil, ubicadas en diferentes puntos de la ciudad. El sistema mide las partículas con diámetro menor a 10 μm incluyendo las partículas gruesas y finas y reporta este resultado como PM_{10}. La medición de las partículas finas se reportan en concordancia con la definición oficial de la EPA (2015) [7]. Cuatro de las nueve estaciones de vigilancia del SVCASC se encuentran habilitadas para la medición de partículas finas y en dos de estas se miden ambos contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$; en este trabajo se usan los datos de ambos contaminantes en la estación Compartir.

La estación Compartir del SVCASC es la estación de vigilancia de la calidad del aire ubicada más al oriente en la ciudad de Santiago de Cali. Aún más al oriente de la estación, se encuentra una extensa planicie que va desde el Río Cauca hasta la cordillera central colombiana, planicie en la que predominan cultivos de caña de azúcar. No hay plantas industriales mayores en la zona y la generación de partículas suspendidas en el aire se puede asociar principalmente a las fuentes móviles y a emisiones de polvo de vías pavimentadas y sin pavimentar, a construcciones en la zona y a la erosión debida al viento en áreas cultivadas y sin cultivar [15]. En esta estación se cuenta con un total de 3,125 datos disponibles para el período Enero-Noviembre 2015. Esta es una cantidad mucho mayor a los datos con los cuales se realizaron los trabajos de Rojas en el 2005 [17] y Echeverri en el 2008 [4] y similar a los que se usaron en EPD en 2017 [6], aunque estos últimos se refieren a varios años. Los datos de otras estaciones se incluyen en algunos análisis adicionales. Todo el procesamiento de datos se hace usando el lenguaje y ambiente para computación estadística R [16].

2.1. Regresión lineal (GLM)

De acuerdo con Fox en el 2016, el análisis de regresión lineal simple examina la relación entre una respuesta $\boldsymbol{Y}$ y una variable de predicción $\boldsymbol{X}$ [8]. El modelo busca estimar la media de la respuesta $\boldsymbol{Y}$ para un valor dado de $\boldsymbol{X}$ y presume que esta media se encuentra sobre la recta de regresión. Según Agresti en el 2015, en el modelo lineal ordinario se asume que el vector $\boldsymbol{y} = (\boldsymbol{y_1}, \dots, \boldsymbol{y_n})$ tiene media $\boldsymbol{\mu} = (\boldsymbol{\mu_1}, \dots, \boldsymbol{\mu_n})$ y varianza $\boldsymbol{V} = \boldsymbol{\sigma^2 I}$, donde $\boldsymbol{I}$ es la matriz identidad de tamaño $\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{n}$. Así que se busca estimar el vector de medias $\boldsymbol{\mu}$ que se representa como $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{X\beta}$, con $\boldsymbol{X} = \boldsymbol{x_{ij}}$ la matriz de diseño y $\boldsymbol{\beta}$ un vector de parámetros de tamaño $\boldsymbol{p} \times \boldsymbol{1}$ con $\boldsymbol{p} \leq \boldsymbol{n}$ [1].

Una forma alternativa de expresar este modelo es:

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{1}$$

En esta versión del modelo, se presume que $\boldsymbol{\varepsilon}$ es un término de error tal que tiene $\boldsymbol{E(\varepsilon) = 0}$ y matriz de covarianza $\boldsymbol{var} = (\boldsymbol{\varepsilon}) = \boldsymbol{\sigma^2 I}$. [1].

Si se adiciona el supuesto de Normalidad de *Y* en la primera formulación del modelo o de $\boldsymbol{\varepsilon}$ en la segunda, entonces el modelo sería un Modelo Lineal Generalizado (GLM), que usa la identidad como función de enlace.

Bajo estas condiciones, la estimación de $\boldsymbol{\beta}$ se conduce mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS). Pero si la matriz $\boldsymbol{V \neq \sigma^2}$, entonces β se deberá estimar usando Mínimos Cuadrados Ponderados (WLS). En el primer caso el estimador será $\boldsymbol{\widehat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y}$; en el segundo será $\boldsymbol{\widehat{\beta} = (X'VX)^{-1}X'VY}$

Para evaluar los supuestos de estos modelos se acude habitualmente a los residuales, definidos como $\boldsymbol{e = (I - H)Y}$, donde *H* se define como $\boldsymbol{H_{OLS} = X(X'X)^{-1}X'}$ en el modelo OLS y como $\boldsymbol{H_{wLS} = X(X'VX)^{-1}X'V}$ en el modelo WLS.

2.2. Regresión a través del origen (RTO)

En ocasiones se ajustan modelos que pasan por el origen (RTO), es decir, que no ajustan un intercepto. Estos modelos tienen una larga tradición de estudio en los círculos académicos. En 1983, el profesor George Casella publicó en The American Statistician un artículo [2], en el cual busca precisar en particular los mecanismos de comparación de modelos con y sin intercepto. 20 años después, Joseph Eisenhauer compara cómo se hace RTO en tres software de

uso común [5]. Luego en 2014, Othman retoma la discusión de Casella [14]. La discusión sigue abierta.

Este modelo puede expresarse así:

$$y_i = \beta x_i + \varepsilon_i \tag{2}$$

Para efectos computacionales, en esta versión del modelo se modifica la matriz de diseño *X* suprimiendo la primera columna. Pero este cambio modifica por completo el modelo, de tal manera que no resulta ser una tarea sencilla comparar este nuevo modelo con un modelo en el que se ha ajustado el intercepto. El coeficiente de determinación $\boldsymbol{R^2}$, para dar solo un ejemplo, cambia radicalmente y la forma de calcularlo para el modelo RTO no es comparable con el obtenido para el GLM. Los autores Eisenhauer, Casella y Othman [5, 2, 14] muestran que ajustar un modelo sin intercepto es equivalente a añadir un punto adicional al problema. Luego se verifica si este punto adicional tiene un leverage muy alto y, en tal caso, se concluye que el intercepto no se puede suprimir. El punto que se añade se denota $(\boldsymbol{n^*\bar{x}, n^*\bar{y}})$, con $\boldsymbol{n^* = n/(\sqrt{n+1}-1)}$. Otros autores [18] sugieren comparar estos dos modelos usando el criterio de información de Akaike (AIC).

2.3. Modelos aditivos generalizados (GAM)

Los GAM fueron propuestos a finales de los años 1990's [9] y han sido gradualmente actualizados por versiones posteriores [20]. En los GAM se reemplaza la combinación lineal $\boldsymbol{X\beta}$ de los GLM, que luciría en notación extendida como $\sum_{j=1}^{p} \boldsymbol{\beta_j x_j}$, por la suma de funciones suaves definida en la ecuación 3 donde $\boldsymbol{s_j}$ es una función obtenida mediante métodos de suavización.

$$\sum_{j=1}^{p} \boldsymbol{s_j}(\boldsymbol{x_j}) \tag{3}$$

Las funciones suaves s_j se obtienen como combinaciones lineales de un conjunto de funciones que forman una base de un espacio funcional. La matriz *H* se construye en este caso usando las realizaciones de las funciones de la base en los valores de *X*, en lugar de usar los valores de *X*.

3. Resultados

3.1. Los datos

El diagrama de dispersión de la Fig. 1 muestra la relación entre la concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$. El coeficiente de correlación lineal es 0.83. En el proceso de depuración se suprimieron las observaciones que mostraban niveles de $PM_{2.5}$ mayores que los niveles de PM_{10}. Los mínimos de ambas variables están muy cerca al origen, como podría anticiparse ya que si el $PM_{2.5}$ es una fracción del PM_{10}, entonces el $PM_{2.5}$ debería ser nulo si no se observara presencia en el aire de partículas PM_{10}.

3.2. Dos modelos lineales generales

El primer modelo lineal simple construido con los 3,124 datos disponibles en la estación Compartir del SVCASC

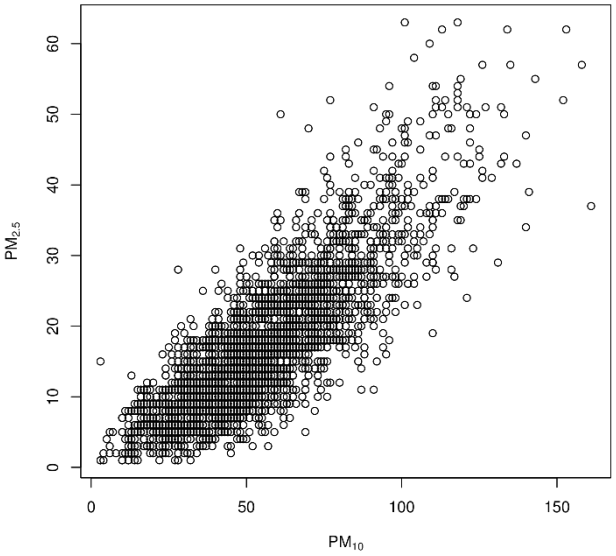


Figura 1. $PM_{2.5}$ vs PM_{10}.
Fuente: Elaboración Propia.

indica que los niveles de $PM_{2.5}$ (variable de respuesta *Y*) podrían estimarse a partir de los niveles horarios de PM_{10} (variable de predicción *X*), usando la ecuación $\boldsymbol{\hat{y}_i = -2.5975 + 0.3612 x_i}$

Los resultados de análisis indican que este modelo está en capacidad de explicar el 69.36% de la variación de las concentraciones de PM_{10} y que ambos estimadores son significativamente diferentes de 0. Si se asumiera la pendiente de este modelo como una aproximación a la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$ en esta estación, esto significaría que los niveles horarios de $PM_{2.5}$ se podrían estimar a partir de los de PM_{10} usando el multiplicador 0.3612. Pero esto implicaría ignorar el hecho de que el intercepto de la recta indica que para estimar un contaminante a partir del otro se debe restar la cantidad 2.5975 al producto del factor 0.3612 por la concentración de PM_{10}. De hecho este resultado conduce a una estimación negativa de la respuesta para valores de la variable de predicción incluso superiores a 7 µg/m^3.

Una opción sería construir un modelo sin intercepto. Como se observa en la Fig. 1, la nube de puntos se encuentra muy cercana al origen, por lo que no hay razón alguna para creer que el modelo dejará de ser lineal entre la nube de puntos y el origen. Por otra parte, siendo $PM_{2.5}$ una parte de PM_{10}, entonces si $\boldsymbol{PM_{10} = 0}$, se sigue que necesariamente $\boldsymbol{PM_{2.5} = 0}$. Y, por último, el parámetro β de un modelo del tipo 2 es evidentemente un estimador de la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$, evitando de paso las dificultades de estimación del modelo 1 ajustado a estos datos, que estima valores negativos de la concentración de $PM_{2.5}$ para valores pequeños de PM_{10}.

El modelo RTO ajustado a estos datos es $\boldsymbol{\hat{y}_i = 0.3211 x_i}$ que implica que el estimador de la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$ en la estación Compartir es 0.3211.

Ahora bien, el coeficiente de determinación para este modelo es $\boldsymbol{R^2 = 0.9186}$, que es mucho mayor que el del modelo con intercepto (0.6936). Pero estos dos valores no son comparables porque se obtienen de manera diferente [5], lo que implica la necesidad de acudir a estrategias de comparación

distintas. Siguiendo la recomendación de Rossiter en 2016, se comparan los AIC para ambos modelos, que resultan ser 19,641 para el modelo con intercepto y 19,741 para el modelo sin intercepto, indicando que el modelo con intercepto es mejor [18]. Ahora bien, la principal implicación sobre los estimadores es que en el modelo sin intercepto el estimador de $\boldsymbol{\beta}$ no es insesgado. Pero el sesgo resulta ser menor a medida que el tamaño de muestra es mayor, por lo que con más de 3,000 datos el sesgo es muy cercano a cero. Y dado que el cambio relativo en los AIC es pequeño, se preferirá el modelo sin intercepto. En cuanto a la idea de Casella en 1983, su propuesta se ve muy afectada por el hecho que el dato adicional depende de la cantidad $\boldsymbol{n}^*$, que diverge cuando *n* crece [2].

Nótese que el modelo sin intercepto mejora la estimación para valores pequeños de PM_{10}, en el sentido que no estima valores negativos. Pero para valores altos de PM_{10}, el modelo sin intercepto introduce una subestimación de los valores de $PM_{2.5}$, como se ilustra en la Fig. 2. En defensa del modelo sin intercepto, los valores altos de PM_{10} son menos frecuentes.

3.3. Un modelo aditivo generalizado

Para buscar una solución a esta disyuntiva de los modelos lineales se propone el uso de un modelo aditivo generalizado GAM, que es un modelo de regresión no-paramétrica y en consecuencia no presupone una forma de la función de regresión si no que se estima a partir de las observaciones. En la Fig. 3 se observa que el modelo GAM estima bien la respuesta para valores pequeños y grandes de la variable de predicción, tiene una capacidad explicativa de un 70.3% y tiene un AIC más pequeño que los dos modelos lineales. Sin embargo, el modelo no estima la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$, al menos no de manera directa, aunque sí permite estimar los niveles de $PM_{2.5}$ a partir de los niveles horarios de PM_{10}, lo que permitiría proponer un valor para la fracción, cuyas propiedades deberían estudiarse.

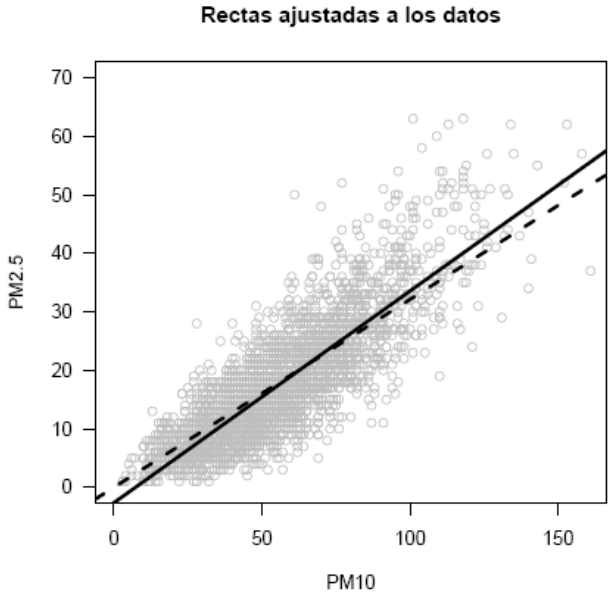


Figura 2. Modelo con intercepto (línea continua) y sin intercepto (línea punteada).
Fuente: Elaboración Propia.

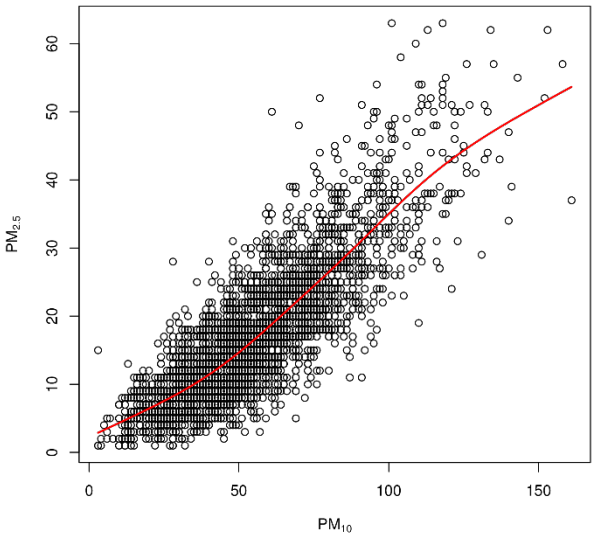


Figura 3. Ajuste GAM.
Fuente: Elaboración Propia.

Una limitación del modelo es que debido a la presencia de una función de suavización en el modelo GAM, no será posible usarlo en estaciones en las cuales no se midan ambos contaminantes, lo que impide la predicción de concentraciones de $PM_{2.5}$ cuando solo se cuenta con mediciones de PM_{10}. Pero definitivamente es una muy buena herramienta cuando se miden ambos contaminantes, por ejemplo para imputar datos faltantes.

3.4. Un modelo de mínimos cuadrados ponderados

Una primera mirada al cumplimiento de los supuestos de los modelos ajustados sugiere un posible crecimiento de la varianza asociado con el crecimiento de los niveles de $PM_{2.5}$. Una solución común en estas situaciones es utilizar un modelo en el cual se introduzca algún tipo de ponderaciones. Como los residuales tienen media cero pero no son homocedásticos, aún si los errores lo son, una idea de uso común es usar como pesos los cuadrados de los residuales. Se ajusta entonces un modelo de este tipo, que conduce a la estimación $\hat{y}_i = -2.623 + 0.3615x_i$. Es decir, los estimadores de los coeficientes de regresión son casi idénticos a los del modelo inicial con intercepto. En este caso el $\boldsymbol{R^2}$ crece hasta 99.95% y el AIC es considerablemente menor que el de los otros modelos. Al igual que el modelo original, este modelo producirá estimaciones negativas para valores pequeños de PM_{10} y tiene la misma dificultad que el modelo GAM, en el sentido que solamente sería útil en los casos en los cuales se miden ambos contaminantes en la misma estación, porque de otra forma no hay manera de calcular los residuales. Una nota de precaución es necesaria en este punto, porque se presentan residuales al cuadrado muy altos que implican el uso de pesos muy pequeños que tienen un gran impacto sobre la matriz de covarianzas, afectando severamente la estructura del error. Y además los supuestos del modelo no se cumplen, en particular el supuesto de normalidad.

3.5. Modelos entre estaciones

Teniendo en cuenta el contexto de contaminación en el que se está trabajando, es posible que las estaciones que se encuentran relativamente cercanas o que presenten condiciones similares con respecto a las actividades antropogénicas, muestren también similaridad en las mediciones de los contaminantes de interés. Por tal motivo, en la Fig. 4 (izquierda) se muestra una comparación entre la relación de PM_{10} y el $PM_{2.5}$ dentro de la estación Compartir, entre tanto, en la Fig. 4 (derecha) se muestra una relación entre estaciones usando el PM_{10} de la estación transitoria como variable de predicción y el $PM_{2.5}$ de la estación compartir como variable de respuesta. Estas estaciones se encuentran a una distancia lineal aproximada de 3.7 km y en zonas con grandes similaridades desde el punto de vista de la generación de contaminantes ambientales. La gráfica apoya la posibilidad de ajustar un modelo lineal basado en esta relación entre estaciones aludiendo semejanzas ambientales y de cercanía espacial.

Con base en lo anterior, se propone el modelo tomando como variable respuesta el $PM_{2.5}$ de la estación Compartir y como variable explicativa el PM_{10} de la estación Transitoria. En el ajuste por mínimos cuadrados sin intercepto se estima la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}= 0.3441$, con un $\boldsymbol{R^2} = 0.8145$.

Salta a la vista la similaridad entre los coeficientes obtenidos, siendo 0.321 para el modelo dentro de la estación y 0.344 para el modelo entre estaciones, lo cual reafirma la similitud de las condiciones en ambos sectores. Siguiendo esta misma idea, se procede a ajustar varios modelos entre estaciones similares. Algunos resultados de interés se resumen en la Tabla 1. No se incluyen las estaciones Base Aérea y ERA, porque a pesar de su cercanía geográfica se trata de estaciones con comportamientos ambientales diferentes. Mientras la base aérea está rodeada de una zona industrial, aparte del impacto de la quema de combustible propio de la operación aérea, la Escuela República Argentina está en una zona residencial. El flujo vehicular en ambas estaciones es similar.

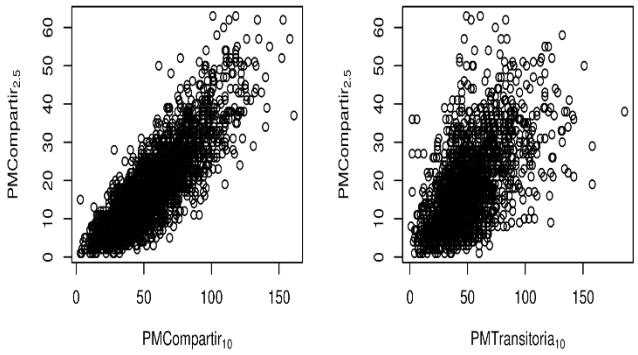


Figura 4. Comparativos
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.
Resultados modelos cruzados.

Estación PM_{10}	Estación $PM_{2.5}$	Distancia entre Estaciones	Coeficiente Estimado	R^2
Transitoria	Compartir	3.7 km	0.344	0.815
Pance	Univalle	10 km	0.448	0.718
Cañaveralejo	Univalle	4.7 km	0.416	0.807

Fuente: Cálculos propios.

4. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

El modelo lineal general (GLM), que ajusta una recta con intercepto, no parece ser la mejor solución para estimar la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$, en primer lugar porque la pendiente de esta recta no podría asimilarse a una fracción; y, en segundo lugar, por su incapacidad para producir valores positivos cerca del origen.

Por su parte, el modelo aditivo generalizado (GAM) permite superar los problemas de estimación para valores pequeños de los contaminantes. Pero formalmente no produce una estimación de la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$. Su uso se vería limitado a una posible estrategia de imputación de datos faltantes en las estaciones en las que se midan ambos contaminantes.

El modelo lineal mediante mínimos cuadrados ponderados (WLS) debe mirarse con cuidado en este problema, en la medida que el supuesto de normalidad de los errores no se satisface, con las implicaciones conocidas sobre la calidad del estimador.

El modelo lineal general a través del origen (RTO), que no ajusta un intercepto, luce como la alternativa más adecuada para estimar la fracción $PM_{2.5}/PM_{10}$, ya que las propiedades de este estimador se derivarían de las propiedades del estimador de regresión, una vez verificado el cumplimiento de los supuestos del modelo.

El uso de la metodología de modelos lineales entre estaciones parece ser coherente en el contexto de contaminantes aéreos siempre y cuando se presente similaridad de condiciones y cercanía entre las estaciones, dado que en estos casos los estimadores de los parámetros son similares. Por tal motivo se propone como una alternativa para proponer una estimación de la concentración horaria de partículas finas en el aire en sitios en los cuales se mide solo un contaminante, ya sea $PM_{2.5}$ o PM_{10}.

Algunas opciones analíticas que podrían aún explorarse en este problema podrían ser la regresión cuantílica, posiblemente alguna variación robusta, y la aplicación de modelos basados en análisis de datos funcionales.

Agradecimientos

Este artículo es uno de los resultados del proyecto de investigación “Modelación estadística de la contaminación del aire por partículas de diámetro aerodinámico menor que 2.5 µm ($PM_{2.5}$)” (CI 2842), que fue financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad el Valle.

Referencias

[1] Agresti A., Foundations of linear and generalized linear models, Wiley, 2015.

[2] Casella, G., Leverage and regression through the origin, The American Statistician. [online]. 37(2), pp. 147-152, 1983. Available at: http://amstat.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00031305.1983.10482728

[3] Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente, Informe de diseño y operación del sistema de vigilancia de la calidad del aire, DAGMA, Cali, Colombia. [online]. 2012. Available at: www.cali.gov.co/descargar.php?idFile=7672.

[4] Echeverri, C. y Maya, G., Relación entre las partículas finas ($PM_{2.5}$) y respirables (PM_{10}) en la ciudad de Medellín, Revista Ingenierías Universidad de Medellín. [en línea]. 7(12), pp. 23-42, 2008. Disponible en: http://www.redalyc.org/html/750/75011517002/

[5] Eisenhauer, J.G., Regression through the origin, Teaching Statistics, 25, pp. 76-80, 2003.
[6] Environmental Protection Department, Guidelines on the estimation of $PM_{2.5}$ for air quality assessment in Hong Kong, EPD, Atmospheric Environment. [online]. 40, pp. 2735-2749, [date of reference April 30th of 2017]. Available at: http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/guide_ref/guide_aqa_model_g5.html.
[7] Environmental Protection Agency, Particulate matter, EPA, United States, [online]. 2015. Available at: www3.epa.gov/pm/.
[8] Fox, J., Applied regression analysis and generalized linear models, 3era edition, SAGE, 2016.
[9] Gomiscek, B., Hauck, H., Stopper, S. and Preining, O., Spatial and temporal variations of PM_1, $PM_{2.5}$, PM_{10} and particle number concentration during the AUPHEP-project, Atmospheric Environment, 38, pp. 3917-3934, 2004.
[10] Hastie, T.J. and Tibshirani, R.J, Generalized additive models, Chapman & Hall/CRC, USA, 1990.
[11] Munir, S., Analysing temporal trends in the ratios of $PM_{2.5}/PM_{10}$ in the UK, Aerosol and Air Quality Research, 17, pp. 34-38, 2017.
[12] Neter, J., Wasserman, W. and Kutner, M., Applied linear regression models, Richard D. Irwin, INC., 1983.
[13] Organización Mundial de la Salud, Calidad del aire ambiente (exterior) y salud, OMS, [en línea]. 2016. Disponible en: www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/.
[14] Othman, S.A., Comparison between models with and without intercept, General Mathematics Notes, 21, pp. 118-127, 2014.
[15] Pace, T.G., Examination of the multiplier used to estimate $PM_{2.5}$ fugitive dust emissions from PM_{10}, 2014.
[16] R Core Team, R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, [online]. 2017, Available at: https://www.R-project.org/.
[17] Rojas, N. y Galvis, B., Relación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la ciudad de Bogotá, Revista de Ingeniería Universidad de los Andes 22, pp. 54-60, 2005.
[18] Rossiter, D.G., Technical note: Curve fitting with the r environment for statistical computing, 2016.
[19] Smyth, S.C., Jiang, W., Yin, D., Roth, H. and Giroux, E., Evaluation of CMAQ O_3 and $PM_{2.5}$ performance using Pacific 2001 measurement data, Atmospheric Environment, 40, pp 2735-2749, 2006.
[20] Wood, S.N., Generalized additive models: An introduction with R, Chapman & Hall-CRC, 2006.

J. Olaya-Ochoa, es Tecnólogo Químico en 1977, Estadístico 1985 de la Universidad del Valle, MSc Ciencias Matemáticas 1997, PhD Management Science 2000, Clemson University. Profesor titular Universidad del Valle.
ORCID: 0000-0001-7014-2782

D.P. Ovalle-Muñoz, es Estadística de la Universidad del Valle en 2014, actualmente estudiante de Maestría en Estadística de la Universidad del Valle.
ORCID: 0000-0002-5408-5762
C.L. Urbano-León, es Matemático de la Universidad del Cauca en 2012, actualmente estudiante de Maestría en Estadística de la Universidad del Valle.
ORCID: 0000-0003-4622-538X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



DYNA
http://dyna.medellin.unal.edu.co/

Study of elements behavior for integration management system with enterprise architecture approach

Annette Malleuve-Martínez, Daniel Alfonso-Robaina & José Lavandero-García

Facultad de Industrial, Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba. amalleuve@ind.cujae.edu.cu, dalfonso@ind.cujae.edu.cu, lavandero@tesla.cujae.edu.cu

Received: May 31th, de 2017. Received in revised form: October 27th, 2017. Accepted: November 7th, 2017

Abstract
Enterprise Architecture as Information Communication Technologies (ICTs) integration approach, and the theory of Integration of Management System in Enterprises(IMSE) have as common element the integration; however IMSE couldn´t develop capacities for ICTs integrated administration since management perspective, in a competitively business context marked for an efficient management of ICTs to achieve strategic goals. In this article is proposed an instrument for assessing interrelated variables of enterprise architecture in a strategic management model based on integration theory of management system in enterprises. The instrument`s application in Park View hotel allowed to identify causes of low behaviors in important variables such as: business actors relationship and technological vigilance, this represent an advantage for focusing improvement areas and developing enterprise architecture capacities in strategic management process hotel`s.

Keywords: Enterprise architecture; strategic management; integration.

Estudio del comportamiento de variables para la integración del sistema de dirección de la empresa con enfoque de arquitectura empresarial

Resumen
La arquitectura empresarial como enfoque de integración de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), y la teoría de Integración del Sistema de Dirección de la Empresa (ISDE) poseen como elemento común la integración; sin embargo la ISDE no ha logrado desarrollar capacidades para la gestión integrada de las TIC desde la perspectiva de la dirección, en un contexto empresarial donde la gestión eficiente de TIC para alcanzar los objetivos estratégicos constituye una capacidad distintiva. Por tanto se propone un instrumento para evaluar variables de arquitectura empresarial en un modelo de dirección estratégica basado en la teoría de la ISDE. La aplicación del instrumento en el hotel Park View permitió identificar las causas de bajo desempeño de variables importantes como: relación entre actores del negocio y vigilancia tecnológica, ello ayudó a focalizar las áreas de mejora y desarrollar capacidades de arquitectura empresarial en el proceso de dirección estratégica.

*Palabras clave:*Arquitectura empresarial; dirección estratégica; integración.

1. Introducción

En el mundo actual existe una tendencia vertiginosa a la globalización de los mercados lo que hace necesario un desarrollo incremental inminente de las prestaciones e impacto positivo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) en el contexto empresarial [1,2,3]. Este fenómeno ha traído como consecuencia una rápida evolución del concepto de Tecnología de la Información (TI) caracterizada actualmente por la integración y sistematización de las tecnologías, la información, las personas, las estrategias empresariales y los procesos de negocio. De ahí que se desarrolle

How to cite: Malleuve-Martínez, A., Alfonso-Robaina, D. and Lavandero-García, J., Estudio del comportamiento de variables para la integración del sistema de dirección de la empresa con enfoque de arquitectura empresarial DYNA, 84(203), pp. 349-355, December, 2017.

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.

bajo esta mirada el enfoque de Arquitectura Empresarial (AE) encargado de interconectar y armonizar los componentes del diseño organizacional aprovechando al máximo las capacidades de las TIC para agilizar la toma de decisiones, brindar información completa y oportuna, y flexibilizar los procesos ante cambios en el entorno interno y externo de la organización[4]. Muchos autores han coincidido en la representación de la AE a través de cuatro dimensiones o capas interrelacionadas: arquitectura de negocio, gestiona elementos claves de la empresa como los procesos (principalmente aquellos que agregan valor a los productos o servicios), los objetivos y estrategias y la cultura organizacional; arquitectura de información, se encarga de definir y manejar todo el flujo de datos e información entre los procesos; arquitectura de aplicaciones, compuesta por los sistemas de información que soportan la ejecución efectiva de los procesos de negocio; y la arquitectura de infraestructura tecnológica formada por las estructuras computacionales que garantizan el funcionamiento de los sistemas de información como las bases de datos y las plataformas de programación[5,6,7]. Estas capas han sido conceptualizadas con el fin facilitar la integración práctica TIC-organización a través de modelos de AE como: el Esquema de Arquitectura de Open Group (TOGAF, *The Open Group Architectural Framework)* que utiliza el Método de Desarrollo de la Arquitectura (*ADM, Architecture Development Method*) para dirigir la tecnología hacia el logro de los objetivos y requerimientos del negocio [5,6];el Esquema de Arquitectura de la Empresa Gartner (*GEAF, Gartner Enterprise Architectural Framework*) y el Marco de Arquitectura del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (*DoDAF, The United States Department of Defense Architecture Framework*)[8].Estos modelos o marcos de trabajo (*frameworks*) de AE a través de nuevas actualizaciones, han permitido desarrollar incrementalmente la gestión integrada de las tecnologías desde un enfoque de negocio, disminuyendo la complejidad en su implementación que aún constituye un reto para muchas organizaciones que los adoptan debido a los continuos y rápidos cambios del entorno, que demandan herramientas de AE más ágiles y flexibles.

La unión intrínseca del enfoque de AE con la gestión empresarial es un elemento importante para analizar la gestión de la AE como enfoque integrador vinculado con la teoría de la Dirección Estratégica Integrada la cual se basa en el fortalecimiento de las relaciones entre los procesos organizacionales como vía fundamental para agregar valor a los productos finales[9].Bajo esta teoría se han desarrollado instrumentos como el Modelo de Dirección Estratégica para la Integración del Sistema de Dirección (DEISDE) que contribuye a gestionar eficientemente el proceso de dirección estratégica a través de la evaluación de la integración entre los procesos internos, y de estos últimos con las entidades externas, dígase proveedores, clientes, entidades reguladoras y administrativas, con el objetivo de identificar desconexiones entre eslabones importantes, eliminar relaciones que no agregan valor y tomar decisiones certeras para llevar a la empresa a un nivel superior de desarrollo [9].La robustez de esta teoría se ha incrementado, ya que se han desarrollado bajo este enfoque, variables que inciden directamente sobre la integración del sistema de dirección como los riesgos [10] y las competencias laborales[11], no obstante es evidente que un mayor nivel de tratamiento de la variable información a través de las TIC en los modelos de dirección actuales se hace imprescindible para lograr un alto impacto de los mismos en la práctica[12].En este artículo se propone un instrumento de diagnóstico basado en un conjunto de variables propias de la AE para evaluar la gestión de las mismas a través de las etapas del modelo DEISDE. El campo escogido para la aplicación de este instrumento es el sector turístico, específicamente la rama hotelera, debido a que constituye uno de los principales renglones económicos de Cuba y requiere de una actualización constante de sus TIC como vía para la captación de mercados nacionales, e internacionales fundamentalmente, así como para la renovación continúa de los productos y servicios.

2. Materiales y métodos

Como respuesta a esta problemática se presenta un instrumento basado en las etapas del modelo DEISDE y en variables de Arquitectura Empresarial, que tiene como objetivo medir el desempeño de dichas variables y encontrar desconexiones que afecten la integración del sistema de dirección de la empresa.

Para el diseño del instrumento se ejecutaron las siguientes actividades:

2.1. Identificación de las variables de Arquitectura empresarial

Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura sobre AE, específicamente los modelos y marcos de trabajo más referenciados: TOGAF y Zachman, [13] y se listaron todos los elementos identificados que caracterizan la gestión de la AE. Se seleccionaron 10 expertos teniendo en cuenta el prestigio científico en la investigación sobre AE. Dichos expertos a través del método Delphi en tres rondas realizadas llegaron a la conclusión que de 50 elementos, 34 de ellos debían ser considerados como variables importantes de AE. Este acuerdo se comprobó a través del indicador de Concordancia de Kendall con un valor de W igual a 0.95 lo que indica que existe una alta concordancia entre los expertos.

2.2. Agrupamiento de las variables por etapa del Modelo DEISDE.

El modelo DEISDE está compuesto por tres etapas fundamentales: **Etapa 1:**Diseño estratégico básico: cuyo objetivo es definir el rumbo estratégico de la organización y preparar a la dirección y los trabajadores para el gran cambio, **Etapa 2:**Diseño estratégico basado en procesos: esta etapa se enfoca en la evaluación de las relaciones entre los procesos claves y funcionales para agregar valor a los productos y servicios a partir del cumplimiento de los objetivos estratégicos, y **Etapa 3:**Implementación, supervisión y ajuste: tiene como objetivo poner en práctica y supervisar un conjunto de acciones de mejora a las relaciones de bajo desempeño encontradas en la etapa 2. Teniendo en cuenta el objetivo de estas etapas y la funcionalidad de cada variable de AE se agruparon estas últimas dentro de las etapas utilizando como herramienta fundamental el Diagrama de Afinidad. La Tabla 1 muestra los resultados de esta asociación.

Tabla 1.
Relación entre las capas de AE y Modelo DEISDE.

Etapas del Modelo DEISDE	Capas de Arquitectura Empresarial			
	Negocio	**Información**	**Aplicaciones**	**Infraestructura Tecnológica**
Diseño estratégico básico	PO RA LD	CD TDE GIM	RE	DGI
Diseño estratégico basado en procesos	EO FI P R PI	GI TDT AO	LE GV SF SI	
Implantación y supervisión	GAP MV	SIN HA TDO RO	PR GP VT	SP IP II CR IT

Leyenda:
Etapa 1.Diseño estratégico básico
PO- Política de la Organización
RA- Relación entre Actores del Negocio
LD- Liderazgo de la Dirección
CD- Compromiso de la Dirección con la Gestión de la Información
TDE- Toma de Decisiones Estratégicas
MIM- Mayor información del Micro y Macroentorno
RE- Rumbo Estratégico
DGI- Dirección y Equipo Especialista gestionan la Inversión
Etapa 2.Diseño estratégico basado en procesos
SI- Sistemas Integrados
SF- Sistemas Flexibles
GV- Generación de Valor
LE- Lenguaje Estándar
AO- Alineación con los Objetivos del Negocio
TDT- Toma de Decisiones Tácticas
GI- Generación de la Información
PI- Posibilidades de Innovación
R- Recursos
P- Procesos
FI- Comunicación y Flujo Informativo
EO- Estructura Organizacional
Etapa 3.Implantación y supervisión
IT-La Infraestructura Tecnológica es aprovechada en su totalidad
CR-Capacidad de Respuesta ante los cambios
II-Intercambio de Información en tiempo real
IP-Integración con la Plataforma de Aplicaciones
SP-Soportan los Procesos Claves
VT-Vigilancia Tecnológica
GP-Gestión de las Plataformas de Infraestructura
PR-Precio
RO-Registros de las Operaciones realizadas por la Empresa
TDO-Toma de Decisiones Operativas
HA-Herramientas para el Almacenamiento de la Información
SIN-Seguridad de la Información
MV-Desempeño de las Habilidades y Competencia/ medición de valor
GAP-Gestión y Automatización de los Procesos

Fuente: elaboración propia.

2.3. Conformación de la lista de chequeo por etapa del modelo DEISDE

A partir de la agrupación de las variables se diseña una Lista de Chequeo compuesta por 8, 11 y 14 preguntas en las etapas 1,2 y 3 respectivamente. El diseño tiene concebido por cada una de las interrogantes 4 estados de comportamiento del desempeño del proceso de dirección estratégica con respecto a la variable a evaluar. Los niveles de comportamiento son 0-25; 25-50; 50-75; 75-100, un valor de 0 es considerado de no desempeño de la variable y un valor de 100 de excelente desempeño. La herramienta debe ser aplicada como mínimo a 7 especialistas y directivos identificados en la empresa objeto de estudio, cuyos resultados deben ser sometidos a la medición de la concordancia entre los expertos a través del Índice de Concordancia de Kendall. Los resultados numéricos de desempeño de cada pregunta se procesan a través de la media geométrica por variable.

2.4. Análisis de la relación causa - efecto entre las preguntas de la lista de chequeo por etapa del modelo DEISDE

La identificación en cada etapa del proceso de Dirección Estratégica de las variables causas y efectos constituye una fortaleza del instrumento, ya que permite realizar un análisis de las variables en función de sus interrelaciones e identificar los elementos limitantes cuyo desempeño frena el del resto de las variables con las que se relaciona y por ende el desempeño del sistema. La determinación de estas relaciones se realiza a través de las herramientas Diagrama de Relaciones e Inograf. En el caso del Inograf la cruz representa que la variable de la fila incide o es causa de la variable de la columna por lo que el número de la última columna es la suma de todas las cruces de la variable de esa fila, la variable de mayor número en esa columna se considera la más causal del sistema. Los números de la última fila es la suma de las cruces de las variables de la columna, en este caso la de mayor número en esa fila se considera la variable efecto del sistema. A continuación

se muestran los diagramas de relaciones de cada etapa del Modelo DESIDE (Figs.1, 2 y 3); así como los resultados del análisis causa efecto realizado (Tablas 2, 3 y 4).

En la representación del Inograf de esta etapa (Tabla 2) se observa que el elemento causa principal es la **Relación entre Actores del Negocio (RA)** y el elemento efecto principal la **Dirección y Equipo Especialista gestionan la Inversión (DGI)**, esto explica que para lograr un equipo de trabajo eficiente e integrado dentro de la empresa que gestione exitosamente las

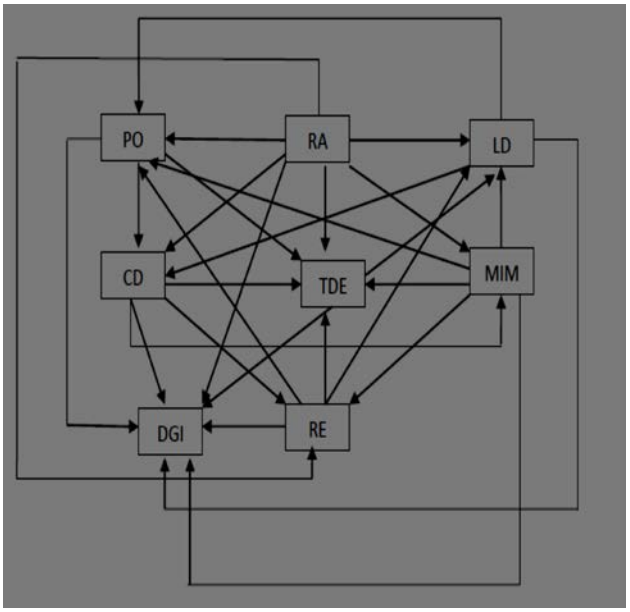


Figura 1. Diagrama de relaciones de la etapa Diseño estratégico básico.
Fuente: elaboración propia

Tabla 2.
Inograf de las variables de la etapa Diseño estratégico básico.

	PO	RA	LD	CD	TDE	MIM	RE	DGI	
PO		-	-	x	x	-	-	x	3
RA	x		x	x	x	x	x	x	7
LD	x	-		x	-	-	-	x	3
CD	-	-	-		x	x	x	x	4
TDE	-	-	x	-		-	-	x	2
MIM	x	-	x	-	x		x	x	5
RE	x	-	x	-	x	-		x	4
DGI	-	-	-	-	-	-	-		0
	4	0	4	3	5	2	3	7	

Fuente: elaboración propia

inversiones en TIC, debe existir un ambiente de buenas relaciones de comunicación e integración entre los actores internos(especialistas de los diferentes subsistemas que conforman la empresa y la dirección), y entre estos últimos y los actores externos (proveedores; principalmente los de servicios de TIC, clientes, organismos superiores de dirección, ministerios, entidades normativas y reguladoras afines).

En la etapa 2 según muestra la Tabla 3, el elemento causa principal es la **Alineación con los Objetivos del Negocio (AO)** y los elementos efecto principal son los **Recursos (R)** y la **Generación de Valor (GV)**, esto se refiere a que una fuerte

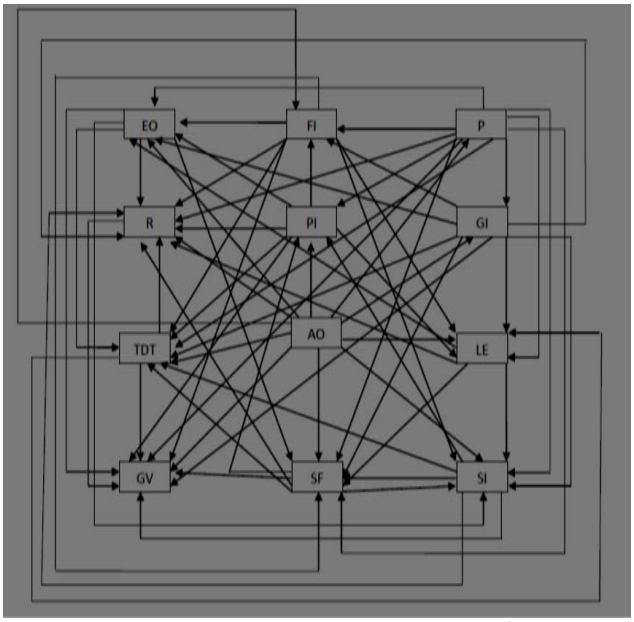


Figura 2. Diagrama de relaciones de la etapa Diseño estratégico basado en procesos.
Fuente: elaboración propia

Tabla 3.
Inograf de las variables de la etapa diseño estratégico basado en procesos

	EO	FI	P	R	PI	GI	TDT	AO	LE	GV	SF	SI	
EO		-	-	x	-	-	x	-	-	x	x	x	5
FI	x		-	x	-	-	x	-	x	x	x	x	7
P	x	x		x	x	x	x	-	x	x	x	x	10
R	-	-	-		-	-	-	-	-	x	-	-	1
PI	x	x	-	x		-	x	-	x	x	-	-	6
GI	x	x	-	x	-		x	-	x	x	x	x	8
TDT	-	-	-	x	-	-		-	x	x	-	-	3
AO	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	11
LE	x	-	-	x	-	-	-	-		-	x	x	4
GV	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	0
SF	-	-	-	x	x	-	x	-	-	x		x	4
SI	-	-	-	X	x	-	x	-	-	x	x		5
	6	4	1	10	4	2	8	0	6	10	7	7	

Fuente: elaboración propia

alineación de las estrategias de TIC con los objetivos del negocio contribuyen a un ahorro eficiente de los recursos informativos, materiales y financieros de la empresa; así como a la eliminación de aquellas actividades que no agregan valor a los procesos claves y al mejoramiento continuo de la calidad de los productos/servicios.

Según se muestra en la Tabla 4, la realización de una efectiva **Vigilancia Tecnológica (VT)** que responda a las necesidades de captación, gestión y utilización de la información tecnológica relevante del entorno para transformar incrementalmente los procesos de la empresa[14]; constituye el principal efecto de un proceso de **Toma de Decisiones Operativas (TDO)** oportuno y dirigido incrementar las capacidades operacionales en los procesos claves y funcionales, aprovechando las oportunidades técnico-tecnológicas que ofrece el entorno.

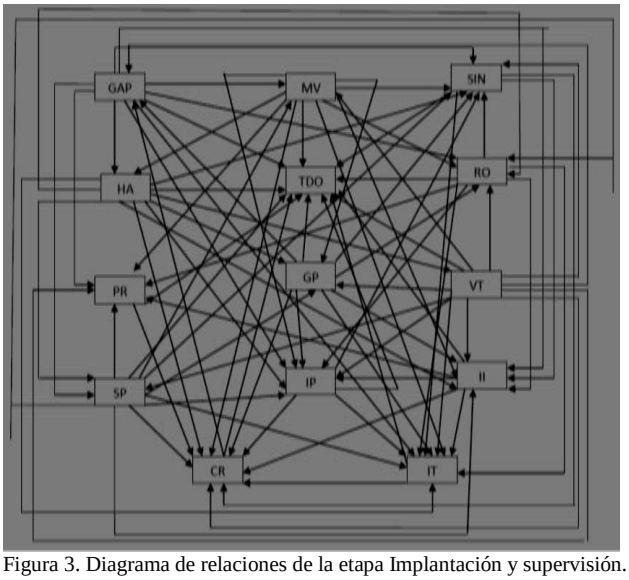


Figura 3. Diagrama de relaciones de la etapa Implantación y supervisión.
Fuente: elaboración propia

Tabla 4.
Inograf de las variables de la etapa Implantación y supervisión.

	GAP	MV	SIN	HA	TDO	RO	PR	GP	VT	SP	IP	II	CR	IT	
GAP		x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	x	-	x	10
MV	-		x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	10
SIN	-	-		-	x	-	-	-	-	-	-	x	x	x	4
HA	-	-	x		x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	10
TDO	--	-	-	-		-	-	-	-	--	-	-	-	-	0
RO	-	--	x	-	x		x	-	-	-	x	x	x	x	7
PR	-	-	-	-	x	-		-	-	-	-	-	x	-	2
GP	x	-	x	-	x	x	-		-	-	x	x	x	x	8
VT	x	x	x	x	x	-	x	x		x	x	x	x	x	12
SP	-	x	x	-	x	x	x	x	-		x	x	x	x	10
IP	-	-	x	-	x	-	-	-	-	--		-	x	x	4
II	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	x		x	x	5
CR	x	-	-	-	x	--	-	-	-	-	-	-		-	2
IT	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	x		2
	3	3	8	3	13	5	6	4	1	3	8	8	11	10	

Fuente: elaboración propia

2.4. Evaluación de los resultados de aplicación de la lista de chequeo por etapa del modelo DEISDE

La Lista de Chequeo fue aplicada en el hotel Park View de la Compañía Turística Habaguanex S.A cuya misión está dirigida a satisfacer los gustos y preferencias de los clientes a través de productos de calidad que se distinguen por brindarse en un entorno de gran valor arquitectónico, histórico y cultural en Cuba. El instrumento fue aplicado a 7 especialistas y directivos del hotel y de la compañía que atienden el hotel directamente, teniendo en cuenta para su selección entre otros criterios: la experiencia y evaluación del desempeño satisfactorio de dichos expertos. La evaluación del nivel de confiabilidad de las preguntas se calculó utilizando el indicador Alpha de Cronbach en el software estadístico MINITAB y se obtuvo como resultado 0.75 por encima de 0.7, lo cual demuestra la efectividad del instrumento diseñado. Por otra parte utilizando el software antes mencionado se determinó el coeficiente de Concordancia de Kendall para evaluar la concordancia entre los expertos con respecto a las respuestas a las preguntas obteniéndose un valor de W igual a 0.746, a través de una prueba de hipótesis se rechazó la hipótesis nula con este resultado y por tanto se comprobó que existe concordancia entre los expertos. Un elemento importante de la evaluación fue el análisis de los resultados por variable dentro del diagrama de relaciones presentado por etapa el modelo DEISDE, con un enfoque basado en la teoría de las restricciones, esto permitió analizar las causas del bajo desempeño de algunas variables de AE y su influencia en el desempeño del resto de las variables con las que tienen relación. A continuación se presentan los resultados por etapa de Modelo DEISDE, en cada casilla de la variable representada dentro del diagrama de relaciones se muestra el desempeño alcanzado por cada variable, los elementos de más bajo desempeño se resaltan en color rojo, así como las flechas que inciden desde ellos hacia el resto de los elementos con los que tienen relación.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados del desempeño de las relaciones por etapa del modelo DEISDE.aplicación en el Hotel Park View

En esta etapa la **Relación entre los Actores del Negocio(RA)** constituye la variable más causal y a su vez en el hotel es una de las variables con el desempeño más crítico, lo cual tiene una influencia negativa en el resto de las variables que se relacionan como se muestra en la Fig. 4. En el diseño estratégico básico del hotel aunque la máxima dirección conoce y transmite a los subordinados de forma general la misión, la visión, las estrategias de la organización; fomentan la participación y colaboración de forma sistemática en actividades de mejora y en la toma de decisiones;no se reconoce la existencia de tecnologías que contribuyan a fortalecer las relaciones de comunicación con los clientes estratégicos y los proveedores más relevantes y al mismo tiempo se recoge y gestiona información parcial del comportamiento del mercado.

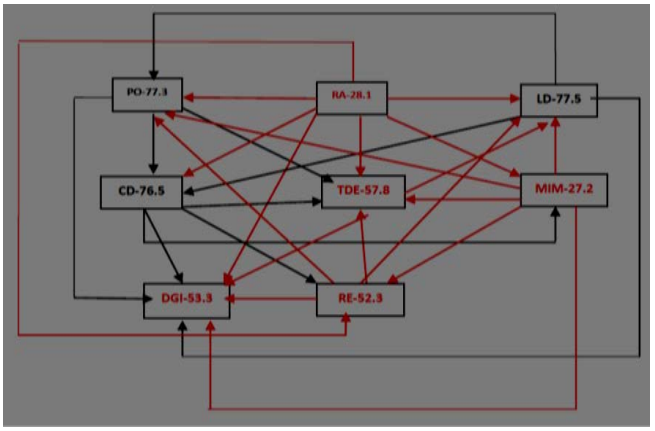


Figura 4. Resultados del desempeño de la etapa Diseño estratégico básico en el hotel Park View.
Fuente: elaboración propia

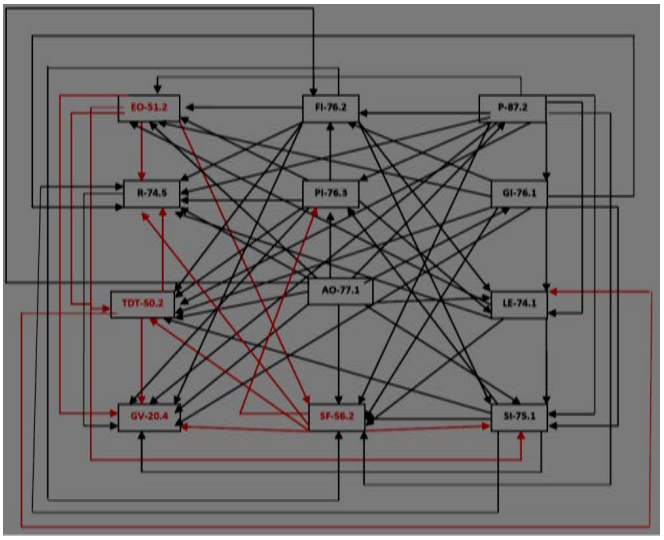


Figura 5. Resultados del desempeño de la etapa Diseño estratégico basado en procesos en el hotel Park View.
Fuente: elaboración propia

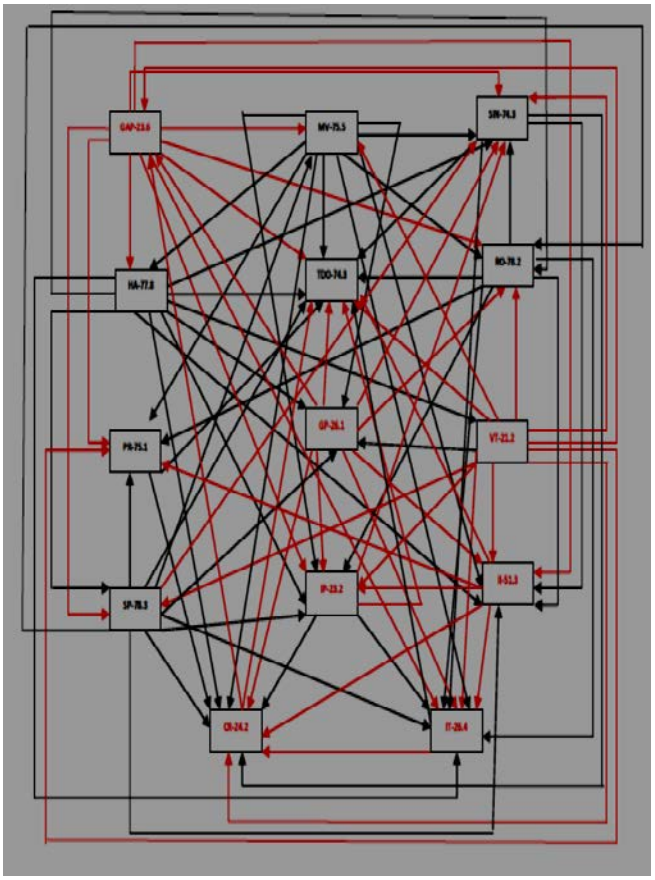


Figura 6. Resultados del desempeño de la etapa Implantación y supervisión en el hotel Park View.
Fuente: elaboración propia

Por otra parte la aplicación del instrumento en la etapa 2 arrojó que existe un desempeño aún bajo de la **Estructura Organizacional (EO)** basada actualmente en un enfoque funcional que limita la integración y el desempeño de los procesos claves, lo que influye negativamente en la agregación de valor a los productos y servicios que ofrece el hotel, esto se pudo comprobar a través del análisis de las quejas registradas de los clientes fundamentalmente con el servicio de alojamiento. Por otra parte los sistemas de información y las TIC existentes no se utilizan adecuadamente para tomar decisiones en el mediano plazo que contribuyan al alcance de los objetivos estratégicos lo que afecta la mejora continua y el desempeño incremental como se observa en las Figs. 5 y 6 a través de la variable **Generación de Valor (GV)**.

En la etapa de Implantación y supervisión se identifican y evalúan los riesgos de seguridad de la información, se minimizan a travésde la puesta en marcha de estrategias en este sentido y se controla su ejecución por la dirección. Es insuficiente en esta etapa la **Capacidad de Respuesta (CR)** ante los cambios que ocurren en el entorno interno y externo, lo que provoca que en muchas ocasiones no se tomen decisiones adecuadas y se afecte el cumplimiento de las estrategias, la **Vigilancia Tecnológica (VT)** no es efectiva pues no logra anticiparse a la ocurrencia de cambios ni está alineada a los objetivos del hotel. Por otro lado existe una alta desintegración de las aplicaciones informáticas dadas por una desconexión de las plataformas tecnológicas que las soportan, lo que impide que se aprovechen en su totalidad para la gestión de los procesos fundamentales.

4. Conclusiones

1. El instrumento ofrece un enfoque de diagnóstico del proceso de dirección estratégica desde una mirada tecnológica donde las TIC no representan el centro del negocio y sí un medio para contribuir al aprovechamiento de las existentes y la generación de nuevas capacidades de arquitectura empresarial para la integración del sistema de dirección de la empresa, en un contexto dominado por el uso de las tecnologías de la información.
2. El instrumento ofrece un enfoque de diagnóstico del proceso de dirección estratégica desde una mirada tecnológica donde las TIC no representan el centro del negocio y sí un medio para contribuir al aprovechamiento de las existentes y la generación de nuevas capacidades de arquitectura empresarial para la integración del sistema de dirección de la empresa, en un contexto dominado por el uso de las tecnologías de la información.
3. Con la aplicación del instrumento se pone de manifiesto el enfoque de sistema en el análisis de la dirección en las organizaciones. La interrelación de variables de Arquitectura Empresarial a través de las etapas del modelo DEISDE permitió identificar los elementos de menor desempeño los que coinciden en las etapas 1 y 3 con los elementos más causales, la mejora de estos elementos a partir de la implementación de un programa de acciones causará un efecto positivo en el comportamiento de las variables consecuentes.
4. Como resultado fundamental del análisis de las variables en las etapas del modelo DEISDE se obtuvo

que en la primera etapa la variable con desempeño más crítico es la relación entre los actores del negocio elemento determinante para alcanzar con éxito el rumbo estratégico de la organización y tomar decisiones estratégicas adecuadas, en la etapa 2 la estructura organizacional está marcada por un desempeño funcional de las actividades en el hotel lo que incide negativamente en la generación de valor de forma continua en los productos y servicios que se ofrecen; y en la etapa 3 el bajo desempeño causado por la variable vigilancia tecnológica incide en que no se adquieran capacidades para responder rápidamente ante los cambios del entorno interno y externo y que no se aproveche en su totalidad la infraestructura tecnológica existente.

5. El hotel caso de estudio necesita aprovechar todo el potencial de las TIC que poseen en función de mejorar el desempeño organizacional, los procesos claves y el desempeño de los trabajadores para alcanzar la visión mediante objetivos estratégicos bien trazados y alineados que tomen como punto de referencia el comportamiento de las variables analizadas.

Referencias

[1] Blandford, A. and Attfield, S., Interacting with information. [Online]. Ed. Morgan & Claypool Publishers. Penn State University. Jhon M. Carroll, 2010. [Consulted, March 23/30 of 2017]. Available at: http://ieeexplore.ieee.orgxplebooksbookPdfWithBanner.jspfileName=6812765.pdf&bkn=6812765&pdfType=book. DOI: 10.2200/S00227ED1V01Y200911HCI006

[2] Arocena, N.R.T., P., Barbosa, D., Carenini, G., Gomes, L., Jou, S., Leung, R.A., Milios, E., Miller, R.J., Mylopoulos, J., Pottinger, R.A., Tompa, F. and Yu, E., Perspectives of business intelligence. [Online]. Editorial Morgan & Claypool Publishers. University of Waterloo. M. Tamer, 2013. [Consulted, March 23/30 of 2017]. Available at: http://ieeexplore.ieee.orgxplebooksbookPdfWithBanner.jspfileName=6812589.pdf&bkn=6812589&pdfType=book. DOI: 10.1109/IGCC.2015.7393709

[3] Grudin, J., From tool to partner: The evolution of human-computer interaction. [online]. Ed. Morgan & Claypool Publishers. Penn State University. Jhon M. Carroll, 2017. [consulted, March 23/30 of 2017]. Available at: http://ieeexplore.ieee.orgxplebooksbookPdfWithBanner.jspfileName=7873540.pdf&bkn=7873540&pdfType=book. DOI: 0.2200/S00745ED1V01Y201612HCI035

[4] Jonkers, H., Concepts for modeling enterprise architecture. Revista International Journal of Cooperative Information Systems, 13(3), pp. 257-287, 2004. DOI: 10.1142/S0218843004000985

[5] Hernández, E.I., Arquitectura empresarial como práctica para mantener la estabilidad de los sistemas de una organización. Revista UPIICSA, Tecnología Ciencia y Cultura. [en línea], 6(7), 2008. [Fecha de consulta: febrero de 2017]. Disponible en: http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5392/47-3.pdf?sequence=3

[6] D. Orantes, S., Arquitecturas empresariales: Gestión de los procesos de negocios. Arquitecturas orientadas a servicios ¿Se relacionan?. Revista Tecnura, 13(25), pp. 319-338, 2009. DOI: 10.1002/sys.20008

[7] Arango-Serna, M.D., Londoño-Salazar, J.E. y Zapata-Cortés, J.A., Arquitectura empresarial - Una visión general. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. [en línea], 9(16), pp. 101-111, 2010. [fecha de consulta febrero de 2017]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v9n16/v9n16a09.pdf

[8] Alfonso, D., Modelo de dirección estratégica para la integración del sistema de dirección de la empresa, Tesis Doctoral, Centro de Estudios de Técnicas de Dirección, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba,2007.

[9] Bolano, Y., Modelo de dirección estratégica basado en la administración de riesgos para la integración del sistema de dirección de la empresa, Tesis Doctoral, Centro de Estudios de Técnicas de Dirección, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2014.

[10] Soltura, A., Tecnología de integración estratégica del sistema de competencias de la organización, Tesis Doctoral, Centro de Estudios de Técnicas de Dirección, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2009.

[11] Simon, D., Fischbach, K., Shanks, G. and Schoder, D., An exploration of enterprise architecture research. Communication of the Association of Information Systems, 32(1), pp.1-72, 2013. DOI: 10.1016/jprocs.2016.09.228

[12] Infante, M.B., Modelo de vigilancia tecnológica basado en patrones asociados a factores críticos, Tesis Doctoral, Departamento de Sistemas de Información, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2013.

A. Malleuve-Martínez, es graduada en el año 2013 en la carrera de Ingeniería Industrial en la CUJAE. Profesora con categoría académica instructor desde septiembre de 2013 del Centro de Estudio de Técnicas de Dirección(CETDIR) en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría(CUJAE). Nombrada subdirectora del CETDIR en el año 2015. Miembro del comité académico del diplomado en Dirección y Gestión Empresarial para cuadros del estado y el gobierno cubano. Miembro de comité académico de la carrera de ingeniería industrial. Actualmente realizando su proyecto de doctorado en temas vinculados con la dirección estratégica y la teoría de arquitectura empresarial. Ha realizado consultorías en estos temas en sectores como la agricultura y el turismo.
ORCID ID: 0000-0003-4428-0297

D.Alfonso-Robaina, es graduado en el año 2003 en la carrera de Ingeniería Industrial en la CUJAE. En el año 2007 obtuvo el título de Dr. en ciencias técnicas en el campo de la dirección. Profesor con categoría académica titular y adjunto al CETDIR en la Facultad de Ingeniería Industrial de la CUJAE. Vicerrector de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Miembro del comité académico del diplomado en Dirección y Gestión Empresarial para cuadros del estado y el gobierno. Miembro del comité académico de la carrera de ingeniería industrial. Miembro del comité académico de la maestría en dirección. Miembro de la comisión de ciencias de la dirección para la implementación de los lineamientos del 6to Congreso del Partido Comunista de Cuba. El campo de investigación es la integración del sistema de dirección de la empresa. Ha trabajado en sectores como la agricultura, construcción, etc.
ORCID: 0000-0002-2741-5885

J. Lavandero-García, es graduado en el año 1968 en la carrera de Ingeniería Eléctrica. Dr. Honoris Causa en Ingeniería Industrial de la CUJAE en el año 2017 por los significativos aportes en el campo de la ingeniería. Profesor con categoría académica titular. Ha sido Vicerrector en las universidades: CUJAE y Universidad de Ciencias Informáticas (UCI). Miembro de la Comisión Nacional de Grados Científicos. Miembro del comité académico del diplomado en dirección y gestión empresarial para cuadros del estado y el gobierno cubano. Miembro del comité académico de la carrera de ingeniería industrial. Miembro del comité académico de la maestría en dirección. Su carrera investigativa está centrada en áreas como: las ciencias informáticas, la gestión de la innovación y la dirección estratégica.
ORCID: 0000-0002-7602-635X

Entregando
lo mejor de los
colombianos

Línea de atención al Cliente Nacional: **01 8000 111 210**
Línea de atención al Cliente Bogotá: **(57-1) 472 2000**
www.4-72.com.co

DYNA
84 (203), December, 2017
is an edition consisting of 150 printed issues
which was finished printing in the month of December of 2017
in Todograficas Ltda. Medellín - Colombia

The cover was printed on Propalcote C1S 250 g,
the interior pages on Propal Beige 90 g.
The fonts used are Times New Roman, Imprint MT Shadow

- Intermittent demand forecasting with time series methods and artificial neural networks: A case study
- Comparing energy consumption for rail transit routes through Symmetric Vertical Sinusoid Alignments (SVSA), and applying artificial neural networks. A case study of Metro Valencia (Spain)
- Carbon nanotube dispersion for in-vitro applications
- Surface hardness prediction based on cutting parameters in turning of annealed AISI 1020 steel
- Climate change effects on the climate dynamics of coastal Ecuador
- Dam failure Vega de Tera, hydraulic simulation of the flood propagation (Zamora, Spain)
- Development of the magnesium alloy industry in Colombia - An opportunity
- Requirements for hybrid laboratories in Manufacturing Engineering
- Performance evaluation of M-ary algorithm using reprogrammable hardware
- Variation of technological properties of field natural rubber lattices from Hevea brasiliensis clones and natural rubber-based compounds
- High power printed circuit board design for automotive fuse block usage
- Model for decision-making, change of LPG stove to induction stove, case in Ecuador
- Incidence of the mechanized sowing speed in irrigated rice
- Cooperative primary user detection in multiband environments based on uniform sub-Nyquist sampling in sparse domain
- Assesment of evaporative cooling efficiency in greenhouses equiped with wetted porous plates
- Identification of resilience factors, variables and indicators for sustainable management of urban drainage systems
- Manufacturing and evaluation of Chitosan, PVA and Aloe Vera hydrogels for skin applications
- A new mathematical model for coal flotation kinetics
- Burr formation and control for polymers micro-milling: A case study with vortex tube cooling
- Ubiquitous learning model based on platforms of multi-screen TV (uLMTV)
- Improvement of the adhesion on Hydroxyapatite coatings produced by oxyfuel thermal spray from results of numerical simulation
- Model the green procurement based coloured Petri nets
- Indicators of energetic performance: A path to sustainability. “A case study of a high-roasting industry of coffee”
- Survey on IoT solutions applied to Healthcare
- Fuzzy index for swine thermal comfort at nursery stage based on behavior
- Changes in liquid phase and mechanical properties during osmodehydrofreezing of papaya (carica papaya l.)
- Gaussian processes in ball bearing prognostics
- Productive development model of the fisheries chain Spanish
- Vapor-Liquid equilibria modeling using gray-box neural networks as binary interaction parameters predictor
- Fast estimation of chlorophyll content on plant leaves using the light sensor of a smartphone
- Wavelet denoising of partial discharge signals and their pattern classification using artificial neural networks and support vector machines
- Disintegration and recycling possibility of selected abrasives for water jet cutting
- A genetic algorithm to solve one mining selection problem
- Determination of unsafe behavior in bus drivers and its relationship to traffic accidents. Case study of a company of public transport in Colombia
- Parametric analysis of the geothermal power: Dry-Steam, flash steam and hybrid cycle
- Effect of solid wastes leachates on a tropical soil
- Sugarcane bagasse and its potential use for the textile effluent treatment
- Influence of thermal residual stresses on the free vibration of reinforced laminates
- Sensitivity analysis of the scor metrics selected for the measurement of the management of a fruit-growing supply chain
- Statistical techniques in an alternative to support decision making with small samples: A contribution based on Bootstrap
- Using the MACBETH Method to improve the scenario analysis tool PESTEL in large civil construction projects
- Analysis of constructive damage on single-family homes produced by vibrations induced by soil impacts in their surroundings
- Composting of biowaste: Research trends and relevance in developing countries
- On the PM2.5/PM10 fraction estimation
- Study of elements behavior for integration management system with enterprise architecture approach

- Previsión de demanda intermitente con métodos de series de tiempo y redes neuronales artificiales: Estudio de caso
- Comparando el consumo energético para rutas de tránsito ferroviario mediante Alineamientos Verticales Sinusoidales Simétricos (SVSA), y aplicando redes neuronales artificiales. Un estudio de caso de MetroValencia (España)
- Dispersión de nanotubos de carbono para aplicaciones in-vitro
- Predicción de la dureza superficial en base a los parámetros de corte en el torneado de acero AISI 1020 recocido
- Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático
- Rotura de la presa de Vega de Tera, simulación hidráulica de la propagación de la avenida (Zamora, España)
- Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - Una oportunidad
- Requerimientos para laboratorios híbridos en Ingeniería de Manufactura
- Evaluación del desempeño del algoritmo M-ary en hardware reprogramable
- Variación de las propiedades tecnológicas de látex de campo de caucho natural de variedades clonales de Hevea brasiliensis y de compuestos de caucho natural
- Diseño de tablillas eléctricas de alta potencia para uso en cajas de fusibles automotrices
- Modelo para la toma de decisiones, caso cambio de cocina de GLP a inducción en Ecuador
- Incidencia de la velocidad de siembra mecanizada en el arroz de riego
- Detección cooperativa de usuarios primarios en entornos multibanda basado en muestreo sub-Nyquist uniforme en el dominio disperso
- Evaluación de la eficiencia de equipos de enfriamiento evaporativo usando placas porosas en invernaderos
- Identificación de factores, variables e indicadores de resiliencia para la gestión sostenible de sistemas de drenaje urbano
- Fabricación y evaluación de hidrogeles de Quitosano, PVA y Aloe Vera para aplicaciones cutáneas
- Un nuevo modelo matemático para la cinética de flotación de carbones
- Formación de rebabas y su control para el micro-fresado de polímeros: Un caso de estudio con refrigeración por tubo vortex
- Modelo de aprendizaje ubicuo basado en plataformas de televisión multipantalla (uLMTV)
- Mejoramiento de la adherencia en recubrimientos de Hidroxiapatita elaborados mediante proyección térmica oxiacetilénica, a partir de resultados de simulación numérica
- Modelado de compras verdes mediante redes de Petri coloreadas
- Indicadores de desempeño energético: Una ruta hacia la sustentabilidad. “Caso de estudio una industria torrefactora de café”
- Revisión del estado del arte de soluciones IoT en salud
- Índice fuzzy para confort térmico de cerdos en la fase de pre-ceba con base en su comportamiento
- Cambios en fase líquida y propiedades mecánicas de papaya (carica papaya l.) osmodeshidratada durante la congelacion
- Procesos gaussianos en el pronóstico de vida útil en rodamientos de bolas
- Modelo de desarrollo productivo de la cadena pesquera española
- Modelamiento de equilibrio Líquido-Vapor usando redes neuronales grises como predictor de parámetros de interacción binaria
- Estimación rápida del contenido de clorofila en hojas usando el sensor de luz de un teléfono celular
- Filtrado wavelet de descargas parciales y su clasificación de patrones usando redes neuronales artificiales y máquinas de soporte vectorial
- La desintegración y el reciclado potencial posibilidad seleccionado abrasivo a chorros de agua de alta presión
- Técnicas genéticas en la solución de un problema minero
- Determinación de conductas inseguras en conductores de bus y su relación con accidentes de tránsito. Estudio de caso de una empresa de transporte público en Colombia
- Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos
- Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical
- Bagazo de caña de azúcar y su potencial aprovechamiento para el tratamiento de efluentes textiles
- Influencia de las tensiones térmicas residuales en la vibración libre de laminados reforzados
- Análisis de sensibilidad de métricas scor seleccionadas para medir la gestión de una cadena de abastecimiento frutícola
- Técnicas estadísticas en una alternativa de apoyo a la toma de decisiones con muestras pequeñas: Una contribución basada en Bootstrap
- Usando el Método MACBETH para mejorar la herramienta de análisis de escenarios PESTEL en grandes proyectos de construcción civil
- Análisis de los daños constructivos sobre una vivienda unifamiliar producidos por vibraciones inducidas por impactos contra el suelo en sus proximidades
- Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo
- Acerca de la estimación de la fracción PM2.5/PM10
- Estudio del comportamiento de variables para la integración del sistema de dirección de la empresa con enfoque de arquitectura empresarial

DYNA
Publication admitted to the
Sistema Nacional de Indexación y Homologación de
Revistas Especializadas CT+I - PUBLINDEX, Category A1

Red Colombiana de Revistas de Ingeniería

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS