XIII CONGRESO COLOMBIANO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA Y ÁREAS AFINES

60 AÑOS DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA 1965 - 2025

REVISTA
FACULTAD NACIONAL DE AGRONOMÍA MEDELLÍN
Órgano divulgativo de la Facultad de Ciencias Agrarias
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

MEMORIAS



XIII Congreso Colombiano de Ingeniería Agrícola y Áreas Afines

CONCIA-2025



Octubre

22 al 25 de 2025

Vol. 78(3) 2025
ISSN 0304-2847
e-ISSN 2240-7026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

LEOPOLDO MÚNERA RUIZ
RECTOR

MARY LUZ ALZATE ZULUAGA
VICERRECTORA · SEDE MEDELLÍN

OSCAR DE JESÚS CÓRDOBA GAONA
DECANO · FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL

Rita M. Ávila de Hernández, Ph.D.
Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado
Barquisimeto, Lara, Venezuela. ritaavila@ucla.edu.ve

Felipe Bravo Oviedo, D.Sc.
Universidad de Valladolid.
Valladolid, España. fbravo@pvs.uva.es

José Rafael Córdova, Ph.D.
Universidad Simón Bolivar y Universidad Central de
Venezuela. Baruta, Venezuela. jcordova45@yahoo.com

José Luis Crossa, Ph.D.
Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo
(CIMMYT). Texcoco, México. j.crossa@cgiar.org

Mateo Itzá Ortiz, D.Sc.
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Chihuahua, México. mateo.itza@uacj.mx

Juan Pablo Damián, Ph.D.
Universidad de la República, Uruguay.
jpablodamian@gmail.com

Moncef Chouaibi, Ph.D.
Higher School of Food Industries of Tunisia (ESIAT),
Tunisia. moncef.chouaibi@yahoo.com.au

Walter Motta Ferreira, D.Sc.
Universidade Federal de Minas Gerais.
Belo Horizonte, Brasil. pereira3456@hotmail.com

Tomas Norton, Ph.D.
University of Leuven. Leuven, Flanders, Bélgica.
tnorton@harper-adams.ac.uk

Pepijn Prinsen, Ph.D.
University of Amsterdam. Holanda.
pepijnprinsen33@hotmail.com

Aixa Ofelia Rivero Guerra, Ph.D.
Centro Europeo de Estadística Aplicada.
Sevilla, España. rivero-guerra@hotmail.com

Antonio Roldán Garrigos, Ph.D.
Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
Murcia, España. aroldan@cebas.csic.es

Elhadi M. Yahia, Ph.D.
Universidad Autónoma de Querétaro.
Querétaro, México. elhadiyahia@hotmail.com

Meisam Zargar, Ph.D.
RUDN University, Rusia.
zargar_m@pfur.ru

COMITÉ EDITORIAL

Período 2022-2024

Albeiro López Herrera, Ph.D.
Editor en Jefe
Universidad Nacional de Colombia. Colombia
alherrera@unal.edu.co

Flavio Alves Damasceno, Ph.D.
Universidade Federal de Lavras. Brasil
flavioua@gmail.com

Luz Estela González de Bashan, Ph.D.
The Bashan Institute of Science, USA
legonzal04@cibno.mx

Juan Diego León Peláez, Ph.D.
Universidad Nacional de Colombia. Colombia
jdleon@unal.edu.co

Deyanira Lobo Luján, Ph.D.
Universidad Central de Venezuela. Venezuela
lobo.deyanira@gmail.com

Sara Márquez Girón, Ph.D.
Universidad de Antioquia. Colombia
saramariamarquezg@gmail.com

Jousset Alexandre, Ph.D.
Utrecht University. Países Bajos
A.L.C.Jousset@uu.nl

Juan Gonzalo Morales Osorio, Ph.D.
Universidad Nacional de Colombia. Colombia
jgmoraleso@unal.edu.co

Jaime Parra Suescún, Ph.D.
Universidad Nacional de Colombia. Colombia
jeparrasu@unal.edu.co

Camilo Ramírez Cuartas, Ph.D.
Universidad de Antioquia. Colombia
camilo.ramirez@udea.edu.co

Iang Schroniltgen Rondon B. M.Sc. Ph.D(c)
Universidad del Tolima. Colombia
isrondon@ut.edu.co

Paola Andrea Sotelo Cardona, Ph.D.
World Vegetable Center (WorldVeg). Taiwan
paola.sotelo@worldveg.org

EDICIÓN TÉCNICA

Mario Alejandro Vallejos Jiménez - Ingeniero Biológico. M.Eng. Química-
mavallejosj@unal.edu.co

Periodicidad: Cuatrimestral
Vol. 78 No. 3 - 2025

Admitida en las Bases Bibliográficas:
Scopus
Scielo (Scientific Electronic Library Online)
ISI-Scielo Citation Index
REDIB (Red Iberoamericana e innovación y conocimiento científico)
Cabi (www.cabi.org)
EBSCO Host
Google Scholar
DOAJ (Directory of Open Access Journals)
Ulrich's Periodicals Directory (Global Serials Directory)
Redalyc (Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal)
Latindex (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal)
ProQuest
Teeal (The Essential Electronic Agricultural Library)
WZB (Berlin Social Science Center)
Cross ref
Cornell University
Field Crop Abstracts
Forestry Abstracts
Plant Breeding Abstracts
Índice Agrícola de América Latina y el Caribe
Índice Bibliográfico Nacional
Minciencias - Publindex
AGRIS-FAO

Portada: Programa de ganado de carne, Estación Agraria Cotové. Fotografía de Diana María Bolivar, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia - audiovisualfca_med@unal.edu.co

Contraportada: Klara Torres Restrepo

Dirección postal: Apartado Aéreo 568, Medellín, Colombia

Dirección electrónica: rfnagron_med@unal.edu.co

Página Web: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Teléfono: (*4) 430 90 06; Fax: (* 4) 230 04 20

Diagramación: Miryam Ospina Ocampo

Marcación: LandSoft S.A.

Diseño e Impresión: Centro de Publicaciones UN, Medellín.

Primera edición: Año 1939

ISSN: 0304-2847

ISSN formato web: 2248-7026

doi: 10.15446/rfnam

Licencia Ministerio de Gobierno: 275/64

Contenido

Volumen 78: Suplemento 1, 2025

XIII Congreso Colombiano de Ingeniería Agricola y Áreas Afines CONCIA-2025-

Decano
Director de Departamento
Comité Organizador
Comité Científico

INTRODUCCIÓN 10

CONFERENCIAS MAGISTRALES 11

Retos de la ingeniería agrícola para la transformación de los sistemas agroalimentarios 13
Juan Fernando Zuluaga Orrego

Teledetección para la gestión del agua en la agricultura. 15
Cessia Sixtina Santos Rodríguez

Integración de procesos termoquímicos y mecánicos para la conversión energética de residuos agroindustriales y forestales 21
Thiago de Paula Protásio, Paulo Fernando Trugilho

Uso de drones e agricultura digital aplicada no cultivo de cafeeiros no Brasil 30
Gabriel Araújo e Silva Ferraz

Intelligent dairies in the era of data revolution 36
Flávio Alves Damasceno

CONFERENCIAS ESPECIALES 43

Detección del estrés hídrico en frijol utilizando imágenes multiespectrales y sensores de humedad del suelo 45
Néstor Magdaleno Montoya Pineda, Marín Cadena Zapata, Alejando Zermeño González, Mario Alberto Méndez Dorado, Andrés Cadena Diaz

¿Subsistencia o agronegocio? el futuro incierto de la yuca en Colombia 49
Eduardo Rodríguez-Sandoval, Víctor Hernández

Automatización inteligente en la agricultura: una integración de conocimientos para la sostenibilidad y productividad 51
Andrés Felipe Higuera Villalba, Jesús Camacho Tamayo, Oscar García Navarrete

Desarrollo de productos agroindustriales a partir de la auyama (*Cucurbita maxima*) para fortalecer la competitividad de la cadena 57
Carlos Julio Márquez Cardozo, Héctor José Ciro Velásquez

RESÚMENES 61

Resúmenes Tema 1 62
Desarrollo rural y seguridad alimentaria

Resúmenes Tema 2 74
Ingeniería de los recursos agua y suelo

Resúmenes Tema 3 170
Ingeniería de procesos agroindustriales y biotecnológicos

Resúmenes Tema 4 270
Mecanización agrícola, agricultura digital y energía

Resúmenes Tema 5 408
Construcciones rurales, bioclimática, y medio ambiente

Resúmenes Tema 6 447
Instrumentación, control, y robótica en el sector agrario Colombia

XIII Congreso Colombiano de Ingeniería Agricola y Áreas Afines - CONCIA 2025

Decano

Oscar de Jesús Córdoba Gaona	Decano Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín decagron_med@unal.edu.co

Director de Departamento

Edilson León Moreno Cárdenas	Director del Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín diaa_med@unal.edu.co

Comité Organizador

Iván Darío Aristizábal Torres	Profesor Asociado - Coordinador CONCIA 2025 - Comité Científico
Julio César Arango Tobón	Profesor Titular - Comisión Financiera
Edith Marleny Cadena Chamorro	Profesora Asociada - Comisión Financiera
Carlos Alfredo Salazar Molina	Profesor Titular - Comisión Logística
Héctor José Ciro Velásquez	Profesor Titular - Comisión Logística
Edilson León Moreno Cárdenas	Profesor Asociado - Comisión de Comunicaciones
Isabella Benjumea Ocampo	Estudiante de Ingeniería Agrícola - Comisión Financiera y apoyo a la Coordinación
Johan Camilo Vergara Ríos	Estudiante de Ingeniería Agrícola - Comisión Logística
Jhonatan Andrés Ramiréz Castañeda	Estudiante de Ingeniería Agrícola - Comisión Comunicaciones

Comité Científico

Coordinador Comité Científico
Iván Darío Aristizábal Torres
UNAL Sede Medellín Colombia

1.Desarrollo rural y seguridad alimentaria
Juan Camilo de Los Ríos
UNAL Sede Medellín
Colombia

Elkin Alonso Cortes Marín
UNAL Sede Medellín
Colombia

Diego Iván Ángel Sánchez
UNAL Sede Palmira
Colombia

2. Ingeniería de los recursos agua y suelo
Miguel Ángel Valenzuela Mahecha
UNAL Sede Bogotá
Colombia

Roberto Villalobos Rebolledo
UNAL Sede Bogotá
Colombia

Israel Enrique Herrera Díaz
Universidad de Guanajuato
México

José Luis Arumi Ribera
Universidad de Concepción
Chile

Andrés Fernando Echeverri Sánchez
UNIVALLE
Colombia

3. Ingeniería de procesos agroindustriales y biotecnológicos
Saúl Dussan Sarria
UNAL Sede Palmira
Colombia

Cristian Torres León
Universidad Autónoma de Coahuila
México

Carlos Julio Márquez Cardozo
UNAL Sede Medellín
Colombia

Liliana Londoño Hernández
UNAD
Colombia

Thiago de Paula Protásio
Universidade Federal de Lavras
Brasil

4. Mecanización agrícola, agricultura digital y energía
Hugo Alberto González Sánchez
UNAL Sede Medellin
Colombia

Sandro Nolan Ipaz Cuastumal
UNAL Sede Palmira
Colombia

Cesar Gutiérrez Vaca
Universidad de Guanajuato
México

Oscar Chaparro Anaya
UNAL Sede palmira
Colombia

Christian José Mendoza Castiblanco
UNAL Sede Bogotá
Colombia

Juan Felipe Restrepo Arias
Universidad EAFIT
Colombia

Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Universidade Federal de Lavras - UFLA
Brasil

Fabio Rodrigo Leiva Barón
UNAL Sede Bogotá
Colombia

Pedro Casanova Treto
Universidad de Costa Rica
Costa Rica

Daniela Molina Hernández
Centro de investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas-CIEMAT
España

5.Construcciones rurales, bioclimática, y medio ambiente
Fernanda Campos de Sousa
Universidade Federal de
Viçosa – UFV
Brasil

Luis Octavio González Salcedo
UNAL Sede Palmira
Colombia

Robinson Osorio Hernández
UNAL Sede Bogotá
Colombia

Quelbis Román Quintero Bertel
Universidad de Sucre
Colombia

Claudia María Cardona Londoño
Universidad distrital Francisco José de Caldas
Colombia

6. Instrumentación, control, y robótica en el sector agrario Colombia
Jhonatan Paolo Tovar Soto
UNAL Sede Bogotá
Colombia

Ana Paola Montoya Ríos
Institución Universitaria Digital de Antioquia
Colombia

Christian Luis Jonnathan Correa Farías Colombia
Universidad de Concepción
Chile

Felipe Andrés Obando Vega
Institución Universitaria Digital de Antioquia
Colombia

PATROCINADORES

ASIAC
ASOCIACIÓN DE INGENIEROS AGRÍCOLAS DE COLOMBIA

FINAGRO

POLITÉCNICO COLOMBIANO
Jaime Isaza Cadavid

EL POLI
ACREDITADO EN ALTA CALIDAD

FEDEMADERAS
Federación Nacional de Industriales de la Madera

FSC
BOSQUES PARA TODOS PARA SIEMPRE
FSC-N003370

agrimanager

AGRODINCO

ARANGO QUINTERO Y CIA LTDA
ASESORES EN SEGUROS
NIT. 811018571-5

Colsistem

Construinmuniza
MADERA INMUNIZADA
15 AÑOS

APOYAN

GREATER MEDELLIN CONVENTION & VISITORS BUREAU

Medellín
Aquí todo florece

Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

poltec®

alpina

Hunter
Riego Agrícola

INTRODUCCIÓN

El XIII Congreso Colombiano de Ingeniería Agrícola y Área Afines CONCIA-2025, realizado del 22 al 24 de octubre de 2025 por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, con motivo de la conmemoración de los 60 años de creación del programa curricular de Ingeniería Agrícola, tuvo como como propósito principal integrar la comunidad académica de este programa y de otras áreas afines, con el sector productivo, y el sector empresarial agrario y agroindustrial, para socializar y analizar los resultados de los trabajos e investigaciones que estudiantes, profesores y profesionales desarrollan en los diferentes ejes temáticos de la ingeniería agrícola como aportes a los retos y demandas tecnológicas en la que esta profesión y otras afines tienen competencia. Se presentaron 112 trabajos entre conferencias magistrales, especiales, ponencias y póster. En este encuentro académico se tuvo la participación de expertos nacionales e internacionales de países como Brasil, Canadá, Chile, Colombia, Irlanda y México y la presencia de más de 307 participantes representados en profesores, estudiantes de pregrado y posgrado, y egresados de los programas de Ingeniería Agrícola de Colombia y también de otros países, así como de otras profesiones y áreas que comparten campos del conocimiento transversales y comunes. Este evento tuvo un relevante impacto académico y social por la proyección de la Facultad de Ciencias Agrarias y de la Universidad Nacional de Colombia, reflejado en los conocimientos adquiridos por todos los asistentes y por la transferencia que harán de los mismos en los respectivos entornos académicos y laborales. En este suplemento, se recopilan los resúmenes de 99 trabajos aceptados en las modalidades de ponencia oral y póster, así como algunas de las conferencias magistrales y especiales presentadas por expertos invitados al evento. Los avances y resultados que a continuación se comparten, permitirán motivar y promover el desarrollo y la sostenibilidad del sector agroalimentario de nuestros países y territorios.

Iván Darío Aristizábal Torres
Profesor Asociado
Coordinador CONCIA 2025
Director Área Curricular Agro Ingeniería y Alimentos
Facultad de Ciencias Agrarias

CONFERENCIAS MAGISTRALES

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Retos de la ingeniería Agrícola para la transformación de los sistemas agroalimentarios

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Juan Fernando Zuluaga Orrego[1]*

"El 15 de noviembre de 2022 la población mundial alcanzó los 8000 millones de personas: todo un hito en el desarrollo humano. En tan solo doce años la población mundial ha pasado de 7000 a 8000 millones de habitantes. Se estima que harán falta quince años —en 2037— para alcanzar los 9000 millones"[2].

Más que una cifra, este dato refleja uno de los mayores desafíos contemporáneos. En 2023, se estimó que 733 millones de personas sufrían subalimentación, es decir, 152 millones más que en 2019[3], lo que evidencia un retroceso preocupante en los avances hacia el hambre cero. Sin embargo, esta crisis alimentaria se desarrolla en medio de una paradoja alarmante: el mundo genera anualmente 1.050 millones de toneladas de desperdicios alimentarios, incluyendo restos no comestibles[4], lo que equivale a 132 kilogramos por persona y representa una quinta parte de todos los alimentos disponibles para el consumo humano.

En el caso de Colombia, el panorama no es ajeno a esta contradicción. Cerca de una cuarta parte de la población (25,9%) enfrenta inseguridad alimentaria[5], mientras que las pérdidas y desperdicios de alimentos alcanzan los 9,7 millones de toneladas por año[6]. Esta coexistencia entre escasez y desperdicio pone de manifiesto la ineficiencia estructural de los sistemas agroalimentarios, que desperdician recursos naturales, energía y trabajo humano, y subraya la necesidad urgente de replantear los modelos de producción, distribución y consumo para garantizar el acceso equitativo y sostenible a los alimentos.

En este contexto, los retos para las ciencias agrarias —y en especial para la Ingeniería Agrícola— se intensifican y demandan un enfoque integral que combine innovación tecnológica, sostenibilidad y justicia social. Estos desafíos pueden agruparse en cinco ejes estratégicos. En primer lugar, la necesidad de contribuir efectivamente a la reducción del hambre, estableciendo rutas de acción desde la ingeniería agrícola que sean coherentes con sus capacidades técnicas y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En segundo término, la planificación territorial con enfoque urbano-rural, que permita equilibrar el desarrollo de las ciudades con la protección de los suelos agrícolas. El tercer desafío corresponde al manejo del recurso hídrico en un contexto de cambio climático, que exige soluciones tecnológicas adaptativas para optimizar el uso del agua en la producción. El cuarto eje se relaciona con la conexión eficiente con los mercados, aprovechando las potencialidades agrologísticas para reducir pérdidas, mejorar la trazabilidad y fortalecer los circuitos cortos de comercialización. Finalmente, la innovación social para la apropiación tecnológica. Elementos que se consolidan como pilares transversales: solo mediante la formación, la participación comunitaria y la adaptación local de las tecnologías será posible construir sistemas agroalimentarios más resilientes, inclusivos y sostenibles.

[1]Coordinador de Proyectos FAO en Antioquia.

*Corresponding author: juzulu79@gmail.com

[2]UNFPA. Informe sobre el Estado de la Población Mundial 2023

[3]UNICEF, et al. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024: Financiación para acabar con el hambre, la inseguridad alimentaria y la malnutrición en todas sus formas. Food & Agriculture Org., 2024.

[4]https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-mundo-desperdicia-mas-de-1000-millones-de-platos-de

[5]https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/escala-de-experiencia-de-inseguridad-alimentaria-fies

[6]VILLEGAS CORREA, María. La pérdida y el desperdicio de alimentos en Colombia. 2017.

ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

En síntesis, los desafíos que enfrenta la ingeniería agrícola en el siglo XXI demandan una visión interdisciplinaria y un compromiso ético con la sostenibilidad. Su papel será determinante en la transformación de los sistemas agroalimentarios, contribuyendo a reducir el hambre, mejorar la gestión de los recursos naturales y fortalecer la resiliencia territorial. El camino de la integración del conocimiento científico con la acción social posibilita un futuro alimentario más justo, equitativo y ambientalmente responsable.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Teledetección para la gestión del agua en la agricultura

Remote control for agricultural water management

Cessia Sixtina Santos Rodriguez[1]*

RESUMEN

Ante la creciente escasez de agua y la necesidad de riego en la agricultura, que representa el 70% de la extracción mundial de agua, los gobiernos en el mundo apoyan los esfuerzos para mejorar el rendimiento del uso del agua en la agricultura. Mejorar la productividad del agua suele ser la vía más importante para afrontar la creciente demanda de agua en la agricultura (FAO, 2020). Si bien, el uso de la teledetección para evaluar y monitorear la productividad hídrica agrícola no es nuevo, ha llegado el momento de ampliar estas tecnologías y utilizarlas para la formulación de políticas eficaces, especialmente en zonas de regadío donde el agua es escasa. Las tecnologías de teledetección utilizan altas resoluciones espaciales y temporales para estimar diversas variables agrohidrológicas en diversas escalas, desde el campo hasta los sistemas de riego y las cuencas hidrográficas. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y sus socios han invertido en el desarrollo de bases de datos y herramientas que aplican la teledetección a la gestión del agua en la agricultura, centrándose en contextos de bajos ingresos y con escasez de datos.

Palabras clave:
Productividad del agua
Riego
Teledetección

ABSTRACT

Because of increasing water scarcity and the fact that irrigated agriculture accounts for 70% of global water withdrawals, governments around the world are supporting efforts to improve water use efficiency in agriculture. Improving water productivity is often the most important way to address the growing demand for water in agriculture (FAO, 2020). While the use of remote sensing to assess and monitor agricultural water productivity is not new, it is time to scale up these technologies and use them for effective policymaking, especially in irrigated areas where water is scarce. Remote sensing technologies use high spatial and temporal resolutions to estimate various agrohydrological variables at various scales, from the field to irrigation systems and watersheds. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and its partners have invested in the development of databases and tools that apply remote sensing to agricultural water management, focusing on low-income and data-scarce contexts.

Keywords:
Water productivity
Irrigation
Remote sensing

[1]Directora Adecuación de Tierras - Agencia de Desarrollo Rural - ADR, Bogotá, Colombia.
*Corresponding author: cessiasantos@gmail.com

CC BY NC SA

La presión sobre nuestros recursos naturales está en aumento debido al crecimiento poblacional, el desarrollo económico y el cambio climático. Un recurso particularmente afectado es el agua, vital para la agricultura. Por esta razón, es crucial **gestionar su uso de forma más inteligente y encontrar oportunidades para mejorar la productividad.**

Aunque la mayoría de los esfuerzos se centran en aumentar la "productividad hídrica" de los cultivos (es decir, el rendimiento por unidad de agua), según la FAO, este enfoque no siempre es el ideal. Si bien es útil para un solo cultivo, no funciona cuando varios compiten por los mismos recursos escasos. Dado que los rendimientos no son comparables entre sí, esta herramienta se queda corta en sistemas agrícolas complejos. En esos casos, se necesita una solución distinta.

La **productividad económica del agua de riego** (PEIR) es fundamental para la toma de decisiones. No obstante, su cálculo es complicado: los rendimientos y las prácticas de riego cambian constantemente y varían entre granjas, especialmente en sistemas donde se cultivan múltiples productos. Los métodos convencionales, que usan datos de campo para alimentar modelos teóricos, son costosos, difíciles de aplicar y, lo que es más importante, no logran estimar el suministro real de agua ni sus variaciones en el tiempo y el espacio. Ante esta limitación, las herramientas de teledetección representan una solución viable y económica para estimar el uso real del agua.

Los avances en productos de teledetección de acceso libre ofrecen nuevas oportunidades para mejorar las evaluaciones y la comprensión del consumo y la gestión del agua en el ámbito agrícola (Hellgers et al. 2010). Un ejemplo destacado es el portal WaPOR de la FAO, una herramienta diseñada para ayudar a los países a supervisar la productividad hídrica, además de identificar y reducir sus deficiencias (FAO 2022). Gracias a la información que proporciona casi en tiempo real, WaPOR capacita a las autoridades de riego para obtener conocimientos sobre el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua, lo que resulta fundamental para el monitoreo de políticas e inversiones en la gestión hídrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La productividad económica del agua de riego

La productividad económica del agua de riego (EIWP), expresada en dinero por metro cúbico ($ m^{-3}), se define por Hellegers et al. (2010) como el valor neto del agua para el productor. Su cálculo se basa en la biomasa beneficiosa multiplicada por el precio de mercado, de lo que se deducen los costos de producción (sin incluir el agua), y se divide por el volumen de agua consumida.

EIWP = (biomasa beneficiosa × precio de mercado – costos financieros de producción) / agua consumida.

Barker, Dawe e Inocencio (2003) distinguen entre el **retorno privado** y el **retorno social neto del agua**. A diferencia del primero, el retorno social neto elimina las distorsiones del mercado, como los subsidios, impuestos y los efectos de las políticas comerciales. Además, toma en cuenta las **externalidades**. No obstante, los autores señalan que las externalidades en la gestión del agua son difíciles de cuantificar económicamente, por ejemplo, los servicios ecosistémicos relacionados con el agua (Kiptala et al. 2018).

Las definiciones de productividad económica del agua de riego varían en la literatura. Por ejemplo, Nouri et al. (2020) la definen como el valor de la producción en la finca dividido por la evapotranspiración (ET), mientras que Schyns y Hoekstra (2014) emplean el valor de la producción de exportación dividido por la ET. Aunque estas definiciones simplificadas son de más fácil aplicación, su omisión de los costos de producción representa una limitación. Cuando se trata de cultivos con costos de producción disímiles, utilizar únicamente el valor de la producción puede no ser un indicador fiable de las diferencias en el retorno del agua.

La definición de la productividad económica del agua de riego requiere estipular una medida para el flujo de agua. Adeboye et al. (2015) opta por medir el agua de riego aplicada en el campo. A diferencia de las definiciones que solo consideran la evapotranspiración (ET), este enfoque no toma en cuenta las pérdidas de transporte o distribución (ajenas al agricultor), pero sí incorpora los

flujos de retorno no consuntivos. Conforme a lo anterior, los autores sugieren definir el EIWP mediante las siguientes ecuaciones:

EIWP privado = beneficio / agua de riego aplicada al campo,
EIWP social = beneficio económico / agua de riego aplicada al campo.

El beneficio, en línea con las definiciones de la FAO (2013) y Hellegers et al. (2010), se define como el valor de la producción (rendimiento por precio en origen) menos los costos de producción. Estos costos abarcan el consumo intermedio (incluyendo extracción, transporte y aplicación de agua, pero no su precio), la mano de obra, el capital fijo, intereses, rentas e impuestos. Una vez obtenido el beneficio privado, se puede convertir en beneficio social utilizando la metodología previamente expuesta.

El **agua de riego aplicada al campo** es la métrica preferida, ya que su uso facilita la comparación entre el rendimiento neto y el precio del agua. Esta elección se debe a que tanto el precio del agua como los costos de bombeo se basan en el volumen aplicado. A pesar de su idoneidad, esta métrica es difícil de medir con alta resolución espacial y temporal (especialmente si no se dispone de medidores de agua). En situaciones donde la medición es complicada, la proporción de la ET real del riego se considera una alternativa viable.

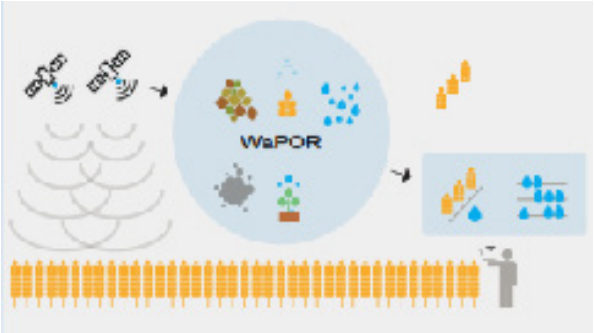
EL portal WAPOR

El portal **WAPOR** utiliza la **teledetección** para dar acceso a datos satelitales en tiempo real sobre la productividad hídrica, con una cobertura de diez años. Sus datos de código abierto ofrecen mapas decenales de la evapotranspiración real (ETa) y la producción primaria neta (PPN) a tres niveles de resolución espacial:
Continental: 250 metros.

Nacional: 100 metros, para países seleccionados.
Subnacional: 30 metros, para zonas agrícolas específicas.
Las estimaciones de ET y PPN se obtienen del procesamiento de diversos datos satelitales con distintas resoluciones espaciales y temporales.

Más información sobre WAPOR, su metodología, evaluaciones de calidad y la recopilación de informes sobre sus aplicaciones en diversas zonas geográficas está disponible en: www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/en/.

Se puede acceder al portal de WAPOR en: https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1



Source: FAO. 2022. WaPOR, remote sensing for wáter productivity. www.fao.org/in-action/remote-sensing-forwater-productivity/en

Medición del EIWP (productividad económica del agua de riego)

Medición de la rentabilidad. La teledetección puede ayudar a estimar el rendimiento de los cultivos de la siguiente manera:

(i) Los mapas de cobertura terrestre y aumento de biomasa (NPP*) se obtienen a partir de información derivada de la teledetección;
(ii) un estudio de campo evalúa los tipos de cultivos en diversas ubicaciones;
(iii) con base en estas dos fuentes de información, un algoritmo clasifica los píxeles no estudiados con el tipo de cultivo correspondiente;
(iv) se aplican parámetros específicos de cada cultivo para traducir el aumento de biomasa observado en rendimiento.

* El NPP es la conversión de dióxido de carbono en biomasa impulsada por la fotosíntesis (FAO, 2020).

Los precios de los productos, los costos de producción, los impuestos y los subsidios se estiman a partir de datos e información recopilados mediante estudios de campo, monitoreo de precios y fuentes secundarias de información.

Estudio de caso – proyecto finca Alsacia Tocaima – sistema de riego comunitario

El proyecto se desarrolla en una zona que depende del agua de lluvia y escorrentía generada en una microcuenca de 1.21 ha, donde se almacenan los excedentes en reservorios de tierra para su uso en épocas secas. La precipitación efectiva se calculó con la metodología FAO92 y la escorrentía con el método del Número de Curva del SCS, considerando características del terreno. La disponibilidad y demanda de agua se evaluaron mediante un balance hídrico, utilizando el método de Penman-Monteith (ET_o de 5.20 mm/día en julio mediante utilización de WAPOR), modelando seis reservorios para abastecer 3 ha de maíz y proyectando uno adicional para 7 ha de pastos. El riego se implementará con aspersores móviles, que cubrirán completamente el área en 36 décadas al año.



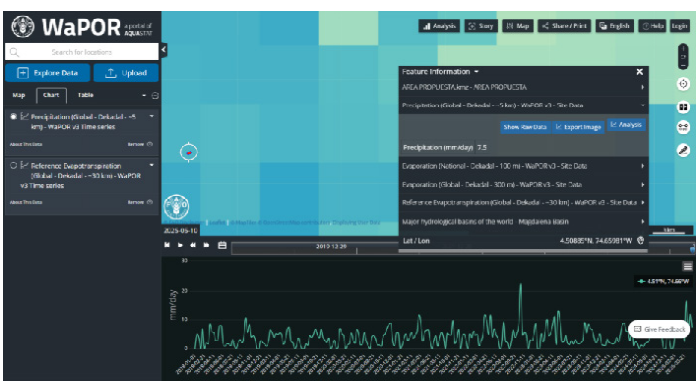
Figura 1. Localización y recorrido realizado.

Utilizacion de la teledeteccion

Se analizaron seis reservorios visibles mediante imágenes satelitales. Para su modelo, se utilizaron curvas de nivel con una precisión de 5 m, proporcionadas por la Agencia Catastral de Cundinamarca, generando un Modelo Digital del Terreno (MDT) para cada uno.

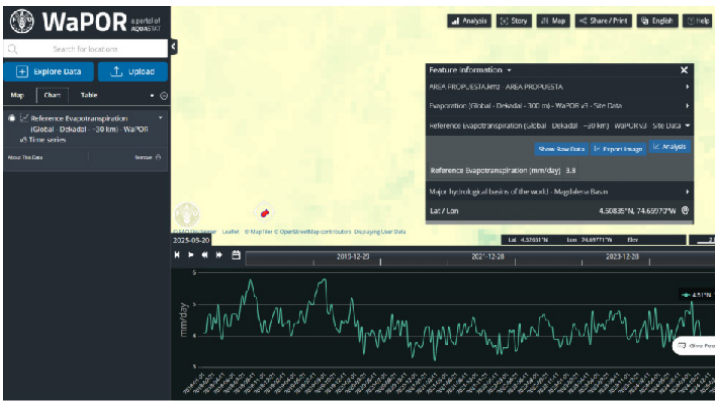
Adicionalmente, se obtuvo información climatológica (precipitación, evaporación y evapotranspiración) específica para las ubicaciones de los seis predios. Esta data se procesó mediante la plataforma WAPOR V3, herramienta que proporciona información climática a partir de puntos georreferenciados.

Con estos insumos, se desarrolló un balance hídrico orientado a un sistema de riego por aspersión móvil. Este sistema fue seleccionado por su capacidad para distribuir eficientemente el recurso hídrico entre múltiples predios, logrando una eficiencia de riego del 85%.



Fuente: https://data.apps.fao.org/wapor/?lang=en

Se ingresaron los datos geográficos y se seleccionan los datos climatológicos requeridos, posteriormente se ubicó el punto indicando la coordenada a analizar en la variable seleccionada, en la Figura 2 se encuentra la salida gráfica de los datos climatológicos de un predio.



Fuente: https://data.apps.fao.org/wapor/?lang=en

Con base en la información anterior, se realizó el balance hídrico del proyecto, por medio del cual se obtienen los datos de caudal requerido y se da inicio al planteamiento y estudio de alternativas de diseño del proyecto.

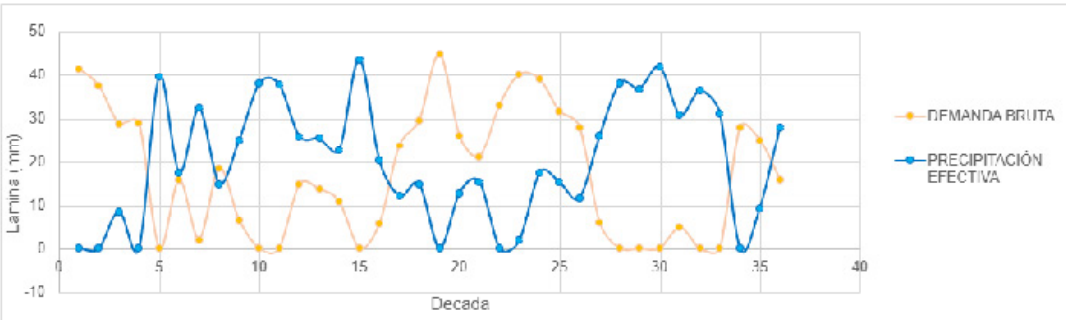


Figura 2. Gráfica de datos climatológicos.

Actualmente la ADR maneja todos los proyectos con información obtenida de WAPOR, encontrando que los mismos se ajustan a la climatología de la zona y ayuda al mejoramiento de la metodología de análisis de alternativas para el diseño de proyectos de riego en la entidad.

CONCLUSIONES

La medición del agua de riego aplicada en los cultivos se puede obtener directamente o estimar; sumando la Evapotranspiración (ET), la escorrentía, la percolación profunda y los cambios en el almacenamiento de agua en la zona radicular debido a la lluvia.

A diferencia de este enfoque, **WaPOR** no calcula el agua de riego aplicada, sino que utiliza la teledetección para medir la ET y mapear los cultivos, lo que permite estimar la ET del riego. Esta información se proporciona en periodos de diez días (Decadal) y por píxel. Aunque la teledetección también puede estimar la precipitación (por ejemplo, con datos de CHIRPS), su resolución espacial es más limitada. Lo que no puede estimar esta tecnología son los usos no consuntivos del agua, como la percolación profunda y la escorrentía superficial ni los cambios en la humedad del suelo.

Según la revisión de Karimi y Bastiaanssen (2015), la teledetección es una herramienta muy precisa. Su estudio concluyó que es posible estimar la evapotranspiración (ET) con un 95% de precisión, identificar el uso del suelo con un 85% de precisión y estimar la precipitación con un 82% de precisión. Por otra parte, una revisión de Blatchford et al. (2019) encontró que las estimaciones de productividad hídrica de los cultivos (CWP) con teledetección se diferencian de las mediciones en el campo entre un 7% y un 22% en los mejores productos.

REFERENCIAS

Adeboye OB, Schultz B, Adekalu, KO and Prasad K (2015) Crop water productivity and economic evaluation of drip-irrigated soybeans (*Glyxine max* L. Merr). Agriculture & Food Security 4 (10).https://doi.org/10.1186/s40066-015-0030-8

Barker R, Dawe D and Inocencio A (2003) Economics of water productivity in managing water for agriculture. In: JW Kijne, R Barker and D Molden. Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement, CABI. 19-35.

Hellegers PJGJ, Soppe R, Perry CJ and Bastiaanssen W (2010) Remote sensing and economic indicators for supporting water resources management decisions. Water Resources Management 24: 2419–2436.

FAO (2022) WaPOR 2. Using remote sensing in support of solutions to reduce agricultural water productivity gaps. FAO, Rome. www.fao.org/3/cb4451en/cb4451en.pdf

Karimi P and Bastiaanssen GM (2015) Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting – Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. Hydrology and Earth System Sciences 19: 507–532. https://doi.org/10.5194/hess-19-507-2015

Kiptala JK, Mul M, Mohamed Y, Bastiaanssen WGM and van der Zaag P (2018) Mapping ecological production and benefits from water consumed in agricultural and natural landscapes: A case study of the Pangani Basin. Remote Sensing 10.

Nouri H, Stokvis S, Borujeni SC, Galindo A and Brugnach M et al (2020) Reduce blue water scarcity and increase nutritional and economic water productivity through changing the cropping pattern in a catchment. Journal of Hydrology 588.

Schyns J and Hoekstra A (2014) The water footprint in Morocco: The added value of water footprint assessment for national water policy. UNESCO-IHE.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Integración de procesos termoquímicos y mecánicos para la conversión energética de residuos agroindustriales y forestales

Integration of thermochemical and mechanical processes for the energy conversion of agro-industrial and forestry residues

Thiago de Paula Protásio[1]* and Paulo Fernando Trugilh

Palabras clave:
Biochar
Bioeconomía
Descarbonización
Huella de carbono
Pellets

RESUMEN

La valorización energética de la biomasa se considera una opción estratégica para la generación descentralizada de bioenergía. Sin embargo, aún existe un conocimiento limitado sobre los aspectos técnicos, en particular sobre la sostenibilidad de la conversión de residuos lignocelulósicos en vectores energéticos modernos, como el biochar, el hidrochar y los pellets. Estos combustibles pueden utilizarse directamente o destinarse a procesos de pirólisis para mejorar la calidad del carbón vegetal y del bioaceite obtenidos. El presente trabajo presenta un resumen del proyecto de investigación "Integración de procesos termoquímicos y mecánicos para la conversión energética de residuos agroindustriales y forestales", que se encuentra en desarrollo en la Universidad Federal de Lavras (UFLA, Brasil). Como principales objetivos, la investigación busca ampliar el conocimiento científico y tecnológico asociado al uso de la biomasa como recurso energético, con el fin de aumentar la eficiencia ambiental de las tecnologías de conversión (torrefacción, hidrocarbonización, pirólisis y compactación), en el marco de modelos de desarrollo integrados. La ejecución de este proyecto promoverá soluciones científicas y tecnológicas orientadas a la mitigación de gases de efecto invernadero vinculados a la matriz energética de Brasil y para la región latinoamericana.

Keywords:
Biochar
Bioeconomy
Decarbonization
Carbon footprint
Pellets

ABSTRACT

Energy valorization of biomass is considered a strategic option for decentralized bioenergy generation. However, knowledge remains limited regarding the technical aspects, particularly concerning the sustainability of converting lignocellulosic residues into modern energy carriers such as biochar, hydrochar, and pellets. These fuels can be used directly or subjected to pyrolysis processes to improve the quality of the resulting charcoal and bio-oil. This work provides a summary of the research project "Integration of Thermochemical and Mechanical Processes for the Energy Conversion of Agro-industrial and Forestry Residues," currently underway at the Federal University of Lavras (UFLA, Brazil). The main objectives of the research are to expand the scientific and technological knowledge associated with the use of biomass as an energy resource, aiming to enhance the environmental efficiency of conversion technologies (torrefaction, hydrothermal carbonization, pyrolysis, and densification) within the framework of integrated development models. The implementation of this project will promote scientific and technological solutions aimed at mitigating greenhouse gas emissions associated with Brazil's energy matrix and for the Latin American region.

[1]Federal University of Lavras-UFLA, Department of Forest Science, 37203-202, Lavras, Minas Gerais, Brazil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5560-8350; https://orcid.org/0000-0002-6230-5462
*Corresponding author: thiagoprotasio@ufla.br,

CC BY NC SA

Actualmente, existe una creciente preocupación mundial por la dependencia de los países respecto a las fuentes fósiles de energía y los impactos ambientales derivados de la quema de petróleo y sus derivados (Santana et al. 2021). Unido a esto, surge la necesidad de fuentes de energía que estén disponibles localmente y sean de bajo costo (Scatolino et al. 2018). Por ello, la biomasa lignocelulósica se considera una fuente de energía alternativa, menos contaminante y que puede utilizarse para la generación de calor, bioelectricidad y/o transformarse en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Sin embargo, la biomasa agroindustrial presenta baja densidad, alta humedad, heterogeneidad granulométrica, variabilidad química y estacionalidad en la producción y, en consecuencia, bajo valor agregado (Souza et al. 2020; Santana et al. 2021). Para solucionar estos problemas, existe la posibilidad de realizar pretratamientos como la torrefacción (Silveira et al. 2023), hidrocarbonización (Carvalho et al. 2025) y densificación (Sá et al. 2024), para su posterior aplicación en rutas energéticas específicas, incluyendo la pirólisis para la producción de biochar, biorreductor y bio-óleo (Setter et al. 2020).

Minas Gerais es un estado ubicado en la región sureste de Brasil, que se destaca a nivel nacional por la producción de diversos cultivos agrícolas, como café, maíz y frijol. Como resultado, se generan grandes cantidades de residuos durante la cosecha y el procesamiento de los granos. Generalmente, esta biomasa residual se almacena y se subutiliza, contribuyendo así a la emisión de GEI. Además, muchas empresas del sector agrícola utilizan fuentes de energía no renovables en sus procesos, como diésel y gas natural, para la generación de calor en las plantas de procesamiento y secado de granos. Por otro lado, existe la posibilidad de utilizar los residuos generados en la cadena productiva agrícola para la generación de bioelectricidad, con el objetivo de diversificar la matriz energética de industrias y cooperativas de productores.

Sin embargo, estos materiales lignocelulósicos presentan baja densidad energética, lo cual es uno de los factores que dificulta el transporte y uso de estas biomasas como fuente de energía térmica (Souza et al. 2020; Santana et al. 2021). Por ello, existe la posibilidad de compactar estos residuos para producir biocombustibles sólidos cilíndricos, granulados, uniformes y con alta densidad energética en comparación con la materia prima de origen (Setter et al. 2020). Además, se puede optar por un tratamiento térmico de la biomasa lignocelulósica (torrefacción) de forma preliminar a la compactación (PAT - *pelletization after torrefaction*), con el fin de mejorar sus propiedades físicas y energéticas. La literatura indica que la opción más viable es realizar la torrefacción de los pellets producidos, proceso denominado "torrefaction after pelletization" (Sykorova et al. 2024). A pesar de estas posibilidades, es fundamental realizar investigaciones científicas para ajustar los parámetros del proceso y obtener biocombustibles sólidos de alta calidad.

Es importante destacar que los residuos lignocelulósicos generados en la cadena agroforestal pueden convertirse en materias primas energéticas para otras empresas situadas en el estado de Minas Gerais, como, por ejemplo, industrias que producen derivados de manganeso y carburo de silicio. En el proceso de producción de derivados de manganeso se utilizan como insumos energéticos pellets de biomasa y biochar. En el caso específico de la producción de carburo de silicio, se utiliza coque de petróleo, pero existe la posibilidad de emplear biochar proveniente de residuos agrícolas. Por lo tanto, la producción de pellets a partir de residuos agrícolas y forestales puede ser una excelente alternativa para la diversificación del agronegocio. No obstante, es fundamental realizar investigaciones para validar la aplicación de los pellets de residuos agrícolas como insumo energético industrial, así como evaluar en detalle las emisiones asociadas, las cuales pueden afectar el entorno cercano a las plantas.

Relacionado con esto, la conversión de estos residuos en diferentes combustibles sólidos (biochar e hidrochar, por ejemplo), además de bioelectricidad, permitirá aumentar los ingresos de los productores y mejorar la eficiencia ambiental y económica de las explotaciones rurales. El desarrollo económico y sostenible puede alcanzarse mediante tecnologías que agreguen valor a sus operaciones, constituyendo un medio de inversión orientado hacia un futuro con prácticas ecológicamente correctas. Unido a esto, será posible ampliar la generación de empleo en el ámbito rural con claros beneficios sociales.

La presente propuesta de proyecto científico/tecnológico tiene como objetivo promover el avance del conocimiento sobre los procesos relacionados con el uso energético

sostenible de la biomasa agroforestal, además de proporcionar una mejor comprensión de los productos y coproductos obtenidos. El proyecto tiene como finalidad ampliar el conocimiento científico y tecnológico asociado al uso de biomasa forestal y agroindustrial como recurso energético, con vistas a elevar la eficiencia ambiental de las tecnologías de conversión (torrefacción, hidrocarbonización, pirólisis y peletización), considerando modelos de desarrollo integrados. Los resultados obtenidos y presentados durante el CONCIA 2025 son importantes para todo el sur global y permitirán colaborar con las actuales metas internacionales de reducción de GEI y avances en la transición energética sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

La conferencia magistral realizada durante el XIII Congreso Colombiano de Ingeniería Agrícola y Áreas Afines se tituló "Integración de Procesos Termoquímicos y Mecánicos para la Conversión Energética de Residuos Agroindustriales y Forestales". La ponencia abordó los siguientes temas: principales procesos de conversión termoquímica (combustión, torrefacción y pirólisis/carbonización), procesos mecánicos de densificación y, finalmente, ejemplos de integración entre procesos termoquímicos y mecánicos. Se trata de una revisión bibliográfica basada en los principales resultados obtenidos por el grupo de investigación "Energia da Biomassa (en portugués)", registrado en el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Brasil, bajo la dirección del Dr. Paulo Trugilho, investigador de la Universidad Federal de Lavras – Departamento de Ciencias Forestales (UFLA/DCF). El grupo busca soluciones ecológicamente sostenibles para la descentralización de la matriz energética mediante el uso de biocombustibles derivados de biomasa lignocelulósica. Además, la ponencia presentó el proyecto de investigación financiado por FAPEMIG, con el objetivo de difundir las posibilidades de valorización energética de los residuos lignocelulósicos como vectores modernos en la cadena de bioenergía, considerando el contexto latinoamericano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Principales procesos de conversión termoquímica

Entre los principales procesos de conversión termoquímica se destacan la combustión, la torrefacción y la carbonización. La combustión consiste en una reacción de oxidación fuertemente exotérmica que ocurre en presencia de O_2, cuando la biomasa alcanza su temperatura de ignición. En esa condición, el material combustible sufre degradación térmica, convirtiéndose predominantemente en gases, quedando únicamente las cenizas como residuo sólido. Se trata de una reacción con variación de entalpía negativa ($-\Delta H$), caracterizada por la liberación de energía. El carbono y el hidrógeno, principales elementos combustibles de la biomasa lignocelulósica y del carbón vegetal, reaccionan con el O_2, originando CO_2 y H_2O, con la consecuente liberación de energía térmica. De esta manera, el poder calorífico superior (PCS) presenta una correlación positiva y directa con los contenidos de carbono e hidrógeno de la biomasa. En promedio, las biomasas leñosas exhiben un PCS más alto (4.731 kcal kg^{-1}), debido a concentraciones más elevadas de carbono (49,1%) e hidrógeno (6,4%), en comparación con las biomasas no leñosas, que presentan un PCS medio de 4.360 kcal kg^{-1}, con contenidos de carbono de 43,4% e hidrógeno de 5,7% (Tabla 1). La combustión es, por lo tanto, un proceso fundamental para la obtención directa de calor, siendo ampliamente estudiado para comprender la combustibilidad de las diferentes biomasas. Sin embargo, a pesar de su relevancia en el suministro de energía para procesos domésticos e industriales, resulta esencial aplicar tratamientos termoquímicos adicionales, como la torrefacción y la pirólisis, para la producción de biochar, gases y bioaceite, con el fin de atender a las demandas de sistemas energéticos más diversificados y sostenibles.

La biomasa *in natura* presenta limitaciones para su uso energético, tales como alto contenido de humedad, bajo poder calorífico, baja densidad energética, elevada higroscopicidad, dificultad de procesamiento y propiedades no uniformes, además de elevadas relaciones O/C y H/C (Chen et al. 2015). Estas desventajas pueden superarse mediante la torrefacción, un proceso termoquímico de pirólisis parcial realizado en atmósfera inerte, en el rango de 200 a 300 °C, con cortos tiempos de residencia. En este intervalo de temperatura ocurre principalmente la degradación de las hemicelulosas y de algunos extractivos, caracterizada por reacciones de deshidratación y ruptura de enlaces débiles entre sustituyentes y cadenas poliméricas primarias (Martínez et al. 2022; Silveira et al. 2023; Carvalho et al. 2025). Como resultado, la biomasa torrefactada presenta menor contenido de humedad y de higroscopicidad, mayor poder calorífico, incremento de la densidad energética, propiedades más uniformes y mayor facilidad de procesamiento (Chen et al. 2015).

Además, la torrefacción contribuye al aumento de la eficiencia energética y de la vida útil de los pellets, facilita el almacenamiento en ambientes húmedos y reduce la presencia de sustancias potencialmente nocivas para la salud. Estudios recientes se han dedicado a la definición de las condiciones óptimas de torrefacción de la biomasa lignocelulósica, como lo demuestra el trabajo de Silveira et al. (2023).

Tabla 1. Contenidos de carbono e hidrógeno y poder calorífico superior de diversas biomásas leñosas y no leñosas cultivadas en Brasil.

Biomasas	Carbono (% base masa seca)	Hidrógeno (% base masa seca)	PCS (kcal kg^{-1})
Cáscara de yuca	26,29	3,80	3797
Cáscara de arroz	35,74	5,12	3864
Cáscara de cacao	44,51	5,28	4225
Mazorca de maíz	44,88	5,84	4382
Cáscara de coco	46,25	5,49	4429
Bagazo de caña de azúcar	46,80	6,34	4511
Tallo y hojas de maíz	45,20	6,43	4515
Madera de eucalipto	48,20	6,36	4572
Semilla de “açaí”	48,47	5,80	4581
Cáscara de café	46,50	6,38	4606
Manojo de palma	48,99	6,61	4693
Madera de cedro australiano	50,00	6,26	4756
Madera de pino	49,00	6,65	4864

PCS: poder calorífico superior. Fuente: Protásio et al. (2013) y Costa et al. (2023).

La pirólisis es un proceso termoquímico que se realiza en una atmósfera inerte y a temperaturas generalmente superiores a 300 °C, en el cual ocurre la degradación térmica de los constituyentes lignocelulósicos (Lu and Gu 2022). En este proceso, los carbohidratos estructurales (celulosa y hemicelulosas) sufren una intensa descomposición, generando fracciones gaseosas condensables y no condensables, mientras que la lignina, debido a su mayor estabilidad térmica, es la principal responsable de la formación del residuo sólido rico en carbono, denominado biochar o carbón vegetal. Como consecuencia, se observa una concentración significativa de carbono en el producto sólido. Mientras que la biomasa no leñosa, como la cáscara de café, presenta aproximadamente un 45% de carbono elemental y un 24% de carbono fijo, el material pirolizado puede alcanzar valores cercanos al 70% de carbono elemental y al 69% de carbono fijo (Protásio et al. 2012). Además, la ruta de la pirólisis presenta una elevada eficiencia en la eliminación de oxígeno e hidrógeno, en proporciones superiores a las obtenidas mediante torrefacción y carbonización hidrotermal (HTC), lo que resulta en un incremento del poder calorífico superior (PCS) entre el 32% y el 58%, alcanzando valores en el rango de 25–30 MJ kg^{-1} (Carvalho et al. 2025). Por lo tanto, además de aumentar el contenido de carbono fijo, la pirólisis confiere al material mejores propiedades energéticas y mayor estabilidad química, posibilitando su uso tanto como combustible sólido de alto rendimiento como insumo para diversas aplicaciones industriales y ambientales.

Por lo tanto, las rutas de conversión termoquímica, como la torrefacción, carbonización hidrotérmica y pirólisis, pueden integrarse a la ruta de densificación para la producción de pellets y briquetas con propiedades energéticas mejoradas, o con el objetivo de generar biocombustibles líquidos y materias primas para aplicaciones en biorrefinerías. Además, la combustión de biocombustibles sólidos densificados presenta una mayor eficiencia, lo que permite aprovechar los residuos lignocelulósicos incluso fuera de los lugares de producción.

Producción de pellets y briquetas (biocombustibles sólidos)

El proceso de densificación o compactación consiste en la aplicación de presión sobre una masa de partículas con el objetivo de aumentar su densidad (Stelte et al. 2012). En la densificación de partículas de madera y de algunas biomasas vegetales, la adición de aglutinantes a menudo no es necesaria debido a la presencia natural de lignina que actúa como aglutinante, contribuyendo a la cohesión de las partículas. Además del incremento de densidad, la peletización ofrece otros beneficios, como la obtención de partículas con forma y tamaño homogéneos, lo que facilita la alimentación automatizada en sistemas de calderas.

Las distancias entre los sitios de producción de biomasa, como bosques y tierras agrícolas, y las áreas industriales o residenciales donde se requiere energía suelen ser grandes, lo que implica una logística considerable para el transporte y almacenamiento. Por ello, la densificación de la biomasa se recomienda como una alternativa para el transporte del material lignocelulósico fuera de los lugares de producción (Scatolino et al. 2018). La densidad energética de la biomasa varía aproximadamente entre 1,5 y 5,3 GJ m^{-3}. La peletización de la biomasa aumenta significativamente tanto la densidad aparente como la densidad energética, alcanzando aproximadamente 8,7 a 12,3 GJ m^{-3} (Tabla 2).

Tabla 2. Densidad energética de la biomasa disponible en Brasil y de los biocombustibles pellets.

Biomasas/Pellets	Densidad energética liquida (GJ m^{-3})	Referencia
Bagazo de caña de azúcar	1,5	Silva et al. (2020)
Hierba elefante	1,8	Silva et al. (2020)
Película plateada*	1,9	Faria et al. (2016)
Cáscara de café*	2,8	Faria et al. (2016)
Astillas de eucalipto	2,9	Santana et al. (2021)
Aserrín de pino	3,2	Pereira (2014)
Aserrín de eucalipto	4,0	Scatolino et al. (2018)
Residuos de soja	5,3	Santana et al. (2021)
Pellet de bagazo de caña de azúcar	8,7	Silva et al. (2020)
Pellet de residuos de soja	9,6	Santana et al. (2021)
Pellet de hierba elefante	9,7	Silva et al. (2020)
Pellet de madera de eucalipto	10,3	Silva et al. (2020)
Pellet de cáscara de café*	11,3	Faria et al. (2016)
Pellet de madera de pino	11,5	Pereira (2014)
Pellet de película plateada*	12,3	Farias et al. (2016)

*de los granos de café

La producción de pellets de biomasa se realiza en equipos diseñados para comprimir las partículas mediante rodillos y matrices, que pueden ser de tipo anillo o de placa plana. Durante el proceso, la fricción entre la biomasa y la superficie de la matriz genera calor y presión, lo que facilita que las partículas se cohesionen y se formen pellets densos y de tamaño uniforme. La correcta comprensión de las fuerzas físicas involucradas en el canal de prensa es fundamental para optimizar la peletización y ha sido ampliamente estudiada en la literatura especializada (Stelte et al. 2012).

Por otro lado, las briquetas pueden producirse en diferentes equipos: briquetadoras de pistón mecánico, briquetadoras de pistón hidráulico y extrusoras (prensa de tornillo), con diferentes formatos (Rabier et al. 2006). Generalmente, las briquetas de materiales lignocelulósicos presentan un diámetro de 50 a 100 mm y una longitud de 250 a 400 mm,

mientras que los pellets tienen un diámetro de 6 a 8 mm y una longitud que varía entre 3,15 y 40 mm. Actualmente, el mayor interés de empresarios y científicos se ha centrado en la producción y caracterización de pellets, debido a sus ventajas competitivas frente a la leña y las briquetas, tales como almacenamiento, combustibilidad y facilidad de automatización de procesos industriales.

Ejemplos de integración de procesos termoquímicos y mecánicos

La integración de procesos termoquímicos y mecánicos es necesaria para convertir la biomasa lignocelulósica en productos con mayor valor energético y en materias primas químicas para aplicaciones en biorrefinerías (Setter et al. 2020). Existen diversos ejemplos de integración de rutas de conversión; en el presente trabajo, el enfoque se centró en: producción combinada de biocarbón (biochar), bioaceite y gases; peletización combinada con torrefacción y pirólisis (y viceversa); briquetado combinado con torrefacción y pirólisis (y viceversa); producción de pellets con polvo de carbón vegetal; y, finalmente, producción de briquetas y pellets de carbón vegetal.

Setter et al. (2020) estudiaron la ruta de compactación de la biomasa residual de la caficultura y, posteriormente, la pirólisis lenta de los pellets producidos. Los autores tuvieron como objetivos producir pellets a partir de residuos de café, evaluar su potencial energético, pirolizar los pellets mediante pirólisis lenta y caracterizar los productos finales del proceso (bioaceite y biocarbón). La carbonización (o pirólisis) se realizó a tres temperaturas finales: 400, 450 y 500 °C, con un tiempo de residencia final de 1 h. En promedio, la densificación energética, entendida como la relación entre el poder calorífico de la biomasa en estado natural y el del biochar, fue de 1,45.

Los investigadores constataron que los rendimientos de los productos de pirólisis estuvieron influenciados por la temperatura final del proceso. En los rangos investigados, el rendimiento de biochar disminuyó de 30,17 a 29,11% al incrementarse la temperatura de 400 a 500 °C. Por su parte, el rendimiento de bioaceite aumentó ligeramente de 22,93 a 27,54% al pasar de 400 a 450 °C, alcanzando su valor máximo a 450 °C, mientras que los rendimientos de gas fueron más altos a 500 °C. Los bioaceites obtenidos a temperaturas de pirólisis más elevadas presentaron mayores proporciones de compuestos fenólicos y nitrogenados, mientras que a temperaturas más bajas se produjo una mayor formación de ésteres. Se concluye que el proceso de peletización de la cáscara de café seguido de pirólisis representa una alternativa conveniente para lograr una mayor eficiencia energética y diversificar los productos obtenidos.

De manera similar, Protásio et al. (2012) evaluaron briquetas de cáscara de café sometidas a los procesos de carbonización y torrefacción. Las briquetas se carbonizaron utilizando una tasa de calentamiento de 1,67 °C min^{-1}, con temperatura inicial de 50 y final de 450 °C, la cual se mantuvo durante 30 min. La torrefacción de las briquetas se realizó en un horno mufla, con dos tasas de calentamiento: 1,5 y 3,0 °C min^{-1}, hasta alcanzar 250 °C, temperatura que se mantuvo durante 60 min. En general, las briquetas carbonizadas presentaron mayor potencial energético debido a los elevados contenidos de carbono fijo (69%) y carbono elemental (70,4%), así como un poder calorífico superior (29 MJ kg^{-1}), aunque mostraron baja resistencia a la compresión diametral (0,39 MPa). Las briquetas torrefactadas, con ambas tasas de calentamiento consideradas, presentaron un poder calorífico similar (23,5 MJ kg^{-1}). La densificación energética proporcionada por la torrefacción fue de 1,3, mientras que la pirólisis resultó en 1,6.

Los autores constataron que las briquetas torrefactadas y carbonizadas presentan un alto potencial para aplicaciones energéticas en calentadores residenciales y sistemas industriales. No obstante, la disminución de la resistencia mecánica provocada por el proceso de degradación térmica puede inviabilizar el transporte de estos biocombustibles sólidos. Como alternativa, se sugiere el uso de aglutinantes en la producción de briquetas, con el fin de minimizar los efectos de la descomposición térmica inherente a los procesos de torrefacción y pirólisis, según lo constatado por Sykorova et al. (2024).

Con respecto a la peletización y la torrefacción, la literatura reporta dos posibilidades. **Opción 1:** peletización después de la torrefacción (PAT, *Pelletization after Torrefaction*) y

Opción 2: torrefacción después de la peletización (TAP, *Torrefaction after Pelletization*), según lo indicado por Sykorova et al. (2024). Los autores señalaron que las ventajas de la opción 1 son la posibilidad de procesar biomasa torrefactada y no torrefactada en el mismo equipo, además de incrementar la densidad energética. Más allá de estas ventajas, la torrefacción previa de la biomasa para su posterior compactación presenta diversos desafíos, principalmente: i) menor capacidad de unión de la lignina, dificultando la peletización; y ii) mayor desgaste del equipo debido a la abrasividad. Para superar estos desafíos, las posibles soluciones son: aumentar la temperatura de la matriz, añadir ligantes y aumentar la presión de compresión. Garcia et al. (2018) estudiaron la torrefacción de pellets de madera de *Pinus* mediante la opción 1. Los autores observaron reducción de la humedad, del contenido de materiales volátiles, de la densidad aparente y de la durabilidad mecánica. Por otro lado, se registró un aumento del contenido de carbono fijo, del contenido de cenizas, así como un incremento del poder calorífico y de la densidad energética de los pellets. La densificación energética obtenida fue de 1,1.

La opción 2 (torrefacción después de la peletización) presenta las ventajas de aumentar el poder calorífico y mejorar la resistencia a la absorción de agua de los pellets. Sin embargo, reduce la densidad, la dureza y la durabilidad de los pellets debido a la degradación de la lignina, comprometiendo su estructura (Sykorova et al. 2024). Para resolver estos desafíos, las alternativas recomendadas son ajustar la temperatura y el tiempo de torrefacción y, también, utilizar aglutinantes durante el proceso de compactación. En general, la opción 2 es la más estudiada por los investigadores, como Sykorova et al. (2024) y Pereira (2014).

En el contexto latinoamericano se destaca el proyecto de investigación "Evaluación de pellets torrefactados producidos a partir de biomasa de especies nativas de interés comercial del tipo forestal siempreverde", coordinado por el Dr. Fernando Muñoz de la Universidad de Concepción (UDEC, Chile). La investigación tiene como objetivo evaluar la alternativa de producir pellets in natura y pellets torrefactados a base de madera nativa obtenida a partir de intervenciones silvícolas de bosques del Tipo Forestal Siempreverde ubicados en las regiones de Los Ríos y de Los Lagos en Chile, aumentando con ello la rentabilidad y las alternativas de uso del bosque nativo. La metodología considera la generación de protocolos de producción con la determinación de parámetros relevantes en el proceso de peletización a escala piloto, así como las condiciones más adecuadas para el proceso de torrefacción de la biomasa nativa, con el fin de generar pellets que cumplan las normativas de calidad. En promedio, el poder calorífico superior de las maderas estudiadas varió entre 18 y 19 MJ kg^{-1}, mientras que los pellets torrefactados a 270 °C presentaron valores entre 21 y 23 MJ kg^{-1}. Más detalles pueden encontrarse en Muñoz Sáez et al. (2024).

Garcia et al. (2019) estudiaron la incorporación de finos de carbón vegetal en proporciones del 5 al 15% en pellets de madera de *Pinus*. Esta es una opción para el aprovechamiento de los residuos generados en las unidades de producción de carbón vegetal y, asimismo, una alternativa para mejorar las propiedades energéticas de los pellets de biomasa. Sin embargo, no se observó mejora en las propiedades energéticas, pero sí una disminución en la durabilidad. Los pellets producidos con madera de *Pinus* presentaron una durabilidad mecánica del 97,90%. Por otro lado, los pellets producidos con 5, 10 y 15% de polvo de carbón vegetal mostraron durabilidades mecánicas de 92,63, 84,93 y 75,91%, respectivamente. Por lo tanto, la utilización de polvo de carbón en pellets de madera requiere el uso de aglutinantes para permitir el transporte y almacenamiento de los pellets sin la generación elevada de finos.

Con respecto a la densificación de carbón vegetal o biochar, existen diferentes tecnologías que pueden utilizarse, como peletizadoras, prensas de rodillos, prensa hidráulica, prensa de pistón y prensa de tornillo. Generalmente, los pellets se producen mediante el proceso de peletización, con un diámetro que varía de 6 a 8 mm y una longitud de 18 a 24 mm. Por otro lado, las briquetas se obtienen mediante el proceso de briquetado, presentando diámetros de 50–100 mm y longitudes de 60–200 mm (Ngene et al. 2024).

Para la compactación de este material, es fundamental emplear aglutinantes orgánicos o inorgánicos y agua. La dosis óptima de agua y aglutinante ha sido objeto de

numerosos estudios en la literatura. Ngene et al. (2024) afirmaron que la dosificación ideal del aglutinante varía entre 5 y 15%, dependiendo de la materia prima y de la temperatura de pirólisis. Los autores también observaron que las briquetas de biochar producidos bajo estas condiciones tienden a presentar valores de durabilidad en un rango aproximado del 70 al 90%.

Recientemente, Carvalho et al. (2024) evaluaron la producción de pellets de carbón vegetal con 7,5% de almidón y dos proporciones de agua (10 y 20% sobre la masa de carbón vegetal). En promedio, los pellets producidos con 20% de agua presentaron mejores propiedades físico-mecánicas. Por ejemplo, la densidad media de los pellets producidos con 10% de agua fue de 514 kg m^{-3} mientras que con 20% de agua, la densidad aumentó a 549 kg m^{-3}. Es importante destacar que la etapa de secado de los pellets de carbón vegetal es fundamental y debe estudiarse cuidadosamente para optimizar el uso de energía a lo largo de la cadena productiva de estos biocombustibles sólidos.

Finalmente, los estudios deben centrarse en la búsqueda de aglutinantes que no sean considerados como alimentos. Existen vacíos en la literatura respecto a la combustibilidad de pellets y briquetas de carbón vegetal o biochar, considerando las diferentes tecnologías existentes y materias primas. Además, la literatura aún carece de información sobre investigaciones como el estudio de Pascoal et al. (2022), que analizó el comportamiento físico y la reducción carbotérmica de briquetas auto-reductoras desarrolladas con finos de mineral de hierro, carbón vegetal y residuos de sílice. Asimismo, se destaca la investigación de Xu et al. (2025) referente a la cinética de la reducción isotérmica de polvos de silicomanganeso que contienen carbono.

CONCLUSIONES

La biomasa agroforestal enfrenta desafíos como la baja densidad, la alta humedad, la estacionalidad de la producción y la degradación durante el almacenamiento. Para superar estas limitaciones, resulta esencial el mejoramiento de sus propiedades mediante rutas termoquímicas y mecánicas.

Los pretratamientos como la torrefacción y la carbonización hidrotermal se han mostrado estratégicos, posibilitando la posterior aplicación de la biomasa en sistemas de gasificación, pirólisis y otras rutas de conversión. Paralelamente, los procesos de densificación, como la peletización y la briquetación, amplían la viabilidad logística y energética.

Brasil, ya líder en la producción de biomasa, posee un gran potencial para expandir la producción de pellets y briquetas, utilizando no solo madera de *Pinus*, sino también residuos agrícolas abundantes, realidad semejante a la de otros países de América Latina y el Caribe. Esta disponibilidad refuerza el papel estratégico de la región en la transición energética global.

Además, la integración de rutas termoquímicas y mecánicas, como la pirólisis previa seguida de la compactación, permite desarrollar biocombustibles sólidos más estables, duraderos y adecuados para aplicaciones domésticas e industriales, incluyendo el sector metalúrgico. En este sentido, la literatura carece de información detallada sobre briquetas o pellets autorreductores destinados a aplicaciones en la industria de silicio metálico, arrabio o ferroaleaciones, lo que evidencia una laguna relevante para el desarrollo de procesos metalúrgicos sostenibles y eficientes.

Avanzar en esta dirección exigirá investigaciones sobre la relación entre materia prima (composición química, granulometría y humedad) y parámetros de densificación (tecnología empleada, presión, temperatura y aglutinantes). Esta integración representa una oportunidad concreta para fortalecer la bioenergía como pilar de la sostenibilidad y de la descarbonización en el sur global, en sinergia con lo establecido en el Acuerdo de París y en la Agenda 2030 de la ONU.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por la financiación del proyecto “APQ-05431 24 - Integración de Procesos Termoquímicos y Mecánicos para la Conversión Energética de Residuos Agroindustriales y Forestales para la Diversificación del Agronegocio de Minas Gerais”, conforme el Término de Concesión FAPEMIG/DPE No. 103658065/2024.
Al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) por el financiamiento de los proyectos 304165/2022-0 y 406053/2022-7.

A la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), Facultad de Ciencias Agrarias, Sede Medellín, por la invitación a participar en el XIII Congreso Colombiano de Ingeniería Agrícola y Áreas Afines, en el marco del acuerdo de cooperación internacional UNAL x UFLA.

REFERENCIAS

Carvalho FB, Martins CCN, Peres LC, Surdi PG, Lima LVL, Zanuncio AJV et al (2024) Quality of black pellets of charcoal fines produced with different moisture content and drying time. Revista Árvore 48: e4809.

Carvalho NTS, Silveira EA, Protásio TP, Mendoza-Martinez C, Bianchi ML and Trugilho PF (2025) Optimizing catalytic hydrothermal carbonization of *Eucalyptus grandis* Sawdust for enhanced biomass energy production: Statistical analysis and insights of sustainable carbon-neutral pathways. Energy 317: 134647.

Chen WH, Peng J and Bi XT (2015) A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 44: 847–866.

Costa JS, Silva MG, Scatolino MV, Lima MDR, Assis, MR et al (2023) Relating features and combustion behavior of biomasses from the Amazonian agroforestry chain. Biomass Conversion and Biorefinery 13: 321–341.

Faria WS, Protásio TP, Trugilho PF, Pereira BLC, Carneiro AC O, Andrade CR and Guimarães Junior JB (2016) Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. Coffee Science 11(1): 137–147.

Garcia DP, Caraschi JC, Ventorim G, Vieira FHA and Protásio TP (2019) Assessment of plant biomass for pellet production using multivariate statistics (PCA and HCA). Renewable Energy 139: 796–805.

Garcia D, Caraschi J, Ventorim G, Vieira F and Protásio T (2018) Comparative energy properties of torrefied pellets in relation to pine and elephant grass pellets. BioResources 13(2): 2898–2906.

Lu X and Gu X (2022) A review on lignin pyrolysis: Pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts 15: 106.

Martínez MG, Couce AA, Dupont C, Perez DS, Thiery S, Meyer X-M and Gourdon C (2022) Torrefaction of cellulose, hemicelluloses and lignin extracted from woody and agricultural biomass in TGA-GC/MS: Linking production profiles of volatile species to biomass type and macromolecular composition. Industrial Crops & Products 176: 114350.

Muñoz Sáez F, Mendonça RT, Fuentes RMCP, Protásio T P and Méndez AM (2024) Pellets in natura y torrefactados de 9 especies nativas del tipo forestal siempreverde. Concepción, Chile: Universidad de Concepción. Proyecto financiado por Fondo de Investigación del Bosque Nativo (FIBN 06/2021). 17 p.

Ngene GI, Bouesso B, Martínez MG and Nzihou A (2024) A review on biochar briquetting: Common practices and recommendations to enhance mechanical properties and environmental performances. Journal of Cleaner Production 469: 143193.

Pascoal AL, Rossoni HAV, Kaffash H, Tangstad M and Henriques AB (2022) Study of the physical behaviour and the carbothermal reduction of self-reducing briquettes developed with iron ore fines, charcoal and silica fume residues. Sustainability 14: 10963.

Pereira BLC (2014). Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico. Tese de Doctor Scientiae, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 64 p.

Protásio TP, Bufalino L, Mendes RF, Ribeiro MX, Trugilho PF, and Leite ERS (2012) Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 16(11): 1252–1258.

Protásio TP, Bufalino L, Tonoli GHD, Guimarães Júnior M, Trugilho PF and Mendes LM (2013) Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: Characterization and comparison with fossil fuels. BioResources 8(1): 1166–1185.

Rabier F, Temmerman M, Böhm T, Hartmann H, Jensen PD, Rathbauer J, Carrasco J and Fernández M (2006) Particle density determination of pellets and briquettes. Biomass and Bioenergy 30(11): 954–963.

Sá IA, Macedo LA, Chaves BSA, Galvão LGO, Vale AT, Ghesti GF et al (2024). Evaluating wood waste pellet quality and environmental impact mitigation for decentralized energy recovery in the Amazon. Renewable Energy 231: 120929.

Santana DAR, Scatolino MV, Lima MDR, Barros Junior UO, Garcia DP et al (2021) Pelletizing of lignocellulosic wastes as an environmentally friendly solution for the energy supply: Insights on the properties of pellets from Brazilian biomasses. Environmental Science and Pollution Research 28: 11598–11617.

Scatolino MV, Cabral Neto LF, Protásio TP, Carneiro ACO, Andrade CR, Guimarães Júnior JB and Mendes LM (2018) Options for generation of sustainable energy: Production of pellets based on combinations between lignocellulosic biomasses. Waste and Biomass Valorization 9: 479–489.

Setter C, Borges FA, Cardoso CR, Mendes RF and Oliveira TJ P (2020) Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. Industrial Crops & Products 154: 112731.

Silva SB, Arantes MDC, Andrade JKB, Andrade CR, Carneiro ACO and Protásio TP (2020). Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. Renewable Energy 147(1): 1870–1879.

Silveira EA, Chaves BS, Macedo L, Ghesti GF, Evaristo RBW et al (2023). A hybrid optimization approach towards energy recovery from torrefied waste blends. Renewable Energy 212: 151–165.

Souza HJPL, Arantes MDA, Vidaurre GB, Andrade CR, Carneiro AOC, Souza DPL and Protásio T P (2020) Pelletization of *Eucalyptus* wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. Renewable Energy 149: 128–140.

Stelte W, Sanadi AR, Shang L, Holm JK, Ahrenfeldt J and Henriksen U B (2012) Recent developments in biomass pelletization – A review. BioResources 7(3): 4451–4490.

Sykorova V, Jezerska L, Sassmanova V, Honus S, Peikertov P, Kielar J and Zidek M (2024) Biomass pellets with organic binders - before and after torrefaction. Renewable Energy 221: 119771.

Xu J, Ma G, Xu J, Liu M, Zhang X, Zheng D and Li J (2025) Kinetics of isothermal reduction of carbon-containing silicomanganese dust. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 32: 869–878.

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Uso de drones e agricultura digital aplicada no cultivo de cafeeiros no Brasil

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Use of drones and digital agriculture applied to coffee cultivation in Brazil

Gabriel Araújo e Silva Ferraz[1]*

Palabras clave:
Cafeicultura de precisão e digital
Sensoriamento remoto
Aeronaves remotamente pilotadas

RESUMO

O café possui grande relevância econômica e social, com o Brasil liderando a produção e exportação mundial. A cafeicultura enfrenta desafios relacionados à heterogeneidade da cultura e à mecanização limitada, o que reforça a necessidade de inovações tecnológicas. Nesse contexto, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) surgem como ferramentas promissoras na Cafeicultura de Precisão e Digital, permitindo aplicações diversas e de alto impacto. Entre suas utilizações destacam-se: monitoramento de lavouras, análises topográficas, avaliação de parâmetros biofísicos, contagem de plantas, detecção de falhas de plantio, identificação de pragas, doenças e deficiências nutricionais, bem como estimativas de produtividade e análise hídrica. Estudos científicos conduzidos pela Universidade Federal de Lavras comprovaram a eficiência das RPAs na mensuração de altura, diâmetro de copa, índices de vegetação e no mapeamento da variabilidade espacial em lavouras cafeeiras. Os resultados obtidos indicam correlações elevadas com dados de campo, evidenciando a confiabilidade dessa tecnologia. Conclui-se que as RPAs oferecem ampla aplicabilidade, fornecendo dados precisos e confiáveis que podem subsidiar decisões estratégicas e aprimorar o manejo, desde o plantio até a pós-colheita, consolidando-se como importante aliada para uma cafeicultura mais sustentável, eficiente e digitalizada.

Keywords:
Precision and digital coffee farming
Remote sensing
Remote piloted aircraft

ABSTRACT

Coffee has great economic and social relevance, with Brazil leading global production and exports. Coffee cultivation faces challenges related to crop heterogeneity and limited mechanization, highlighting the need for technological innovations. In this context, Remotely Piloted Aircrafts (RPAs) emerge as promising tools in Precision and Digital Coffee Farming, enabling diverse and high-impact applications. Their uses include crop monitoring, topographic analysis, evaluation of biophysical parameters, plant counting, detection of planting failures, identification of pests, diseases, and nutritional deficiencies, as well as yield estimation and water status assessment. Scientific studies conducted by the Federal University of Lavras have demonstrated the efficiency of RPAs in measuring plant height, canopy diameter, vegetation indices, and mapping spatial variability in coffee fields. The results revealed strong correlations with field data, evidencing the reliability of this technology. It can be concluded that RPAs provide broad applicability, delivering accurate and reliable data to support strategic decision-making and improve management practices, from planting to post-harvest. Thus, RPAs consolidate themselves as key allies for a more sustainable, efficient, and digitalized coffee production.

[1]Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras. ORCID: 0000-0001-6403-2210
*Corresponding autor: Gabriel.ferraz@ufla.br

CC BY NC SA

O cafeeiro é cultivado em diversas regiões do mundo, com o Brasil se destacando como principal produtor e exportador global, além de ser um dos maiores consumidores. O café ocupa a terceira posição entre as bebidas mais consumidas no planeta, ficando atrás apenas da água e do chá, o que evidencia sua relevância como commodity devido à alta demanda global. Assim sendo, esta cultura exerce papel fundamental na economia nacional, representando uma fonte significativa de geração de emprego e renda.

Diante dessa importância, torna-se essencial investir em inovações que possibilitem maior eficiência e sustentabilidade na produção. Nesse contexto, a Cafeicultura de Precisão (CP), alinhada às tendências da Cafeicultura Digital (CD), surge como uma alternativa estratégica, com grande potencial para otimizar o manejo e promover ganhos de competitividade. Apesar da existência de técnicas e tecnologias já aplicadas à cultura, a Cafeicultura de Precisão e Digital (CPD) ainda carece de maior incorporação no campo, sobretudo quando comparada a culturas anuais como soja, milho e trigo, nas quais essas práticas estão mais consolidadas. Essa defasagem pode estar associada a características peculiares do cafeeiro, como diversidade de variedades, sistemas de plantio diferenciados, maturação desuniforme, heterogeneidade de idades dos talhões, topografia das áreas e limitações relacionadas ao grau de mecanização.

Para compreender melhor esse cenário, é importante situar a cafeicultura dentro da trajetória histórica da evolução agrícola. A agricultura passou por quatro grandes marcos tecnológicos: a Agricultura 1.0, caracterizada pela transição dos caçadores-coletores para agricultores, com domesticação de animais, estocagem de alimentos e surgimento das primeiras civilizações; a Agricultura 2.0, impulsionada pela Revolução Industrial, marcada pelo desenvolvimento dos combustíveis, criação dos motores e avanço das máquinas agrícolas; a Agricultura 3.0, consolidada pela Revolução Verde e pelo advento da Agricultura de Precisão, com uso de GPS, Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica; e, mais recentemente, a Agricultura 4.0, que inaugura um patamar de integração tecnológica com Inteligência Artificial, Big Data, Internet das Coisas, telemetria, computação em nuvem e tecnologias de informação e comunicação. Nesse último estágio, a cafeicultura encontra a oportunidade de superar seus desafios estruturais e avançar rumo a uma produção mais eficiente, sustentável e digitalizada.

DRONES NA CAFEICULTURA

Atualmente, na agricultura um novo sistema tem emergido e tendo sucesso em sua utilização, são os chamados Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS - Remotely Piloted Aircraft Systems). Os RPAS são compostos por aeronaves com elementos associados e empregadas sem piloto a bordo, podendo ser Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) ou Aeronaves totalmente autônoma. No Brasil ainda não são permitidos voos totalmente autônomos, exigindo a presença de um piloto para conduzir a aeronave de forma remota. As RPAs podem ser do tipo asa fixa (aviões), asa rotativa (quadricópteros, hexacópteros, etc) e até mesmo híbridos. Elas são plataformas versáteis, capazes de acoplar diversos sensores e equipamentos, a depender principalmente da capacidade de carga dela e da necessidade de trabalho que a mesma irá realizar.

Por serem versáteis, sua utilização vem ganhando mais adeptos a cada ano que passa, e sua tecnologia envolvida vem se aprimorando para que possa suprir as reais necessidades dos produtores agrícolas das mais diversas culturas. Na cafeicultura também não é diferente. Os produtores e o mercado como um todo, vem procurando soluções para entregar para os cafeicultores. Várias pesquisas científicas vêm sendo realizadas por universidades e centros de pesquisa na busca por fornecer protocolos de utilização desta tecnologia aos cafeicultores e alguns casos de sucesso serão apresentados neste texto.

As principais aplicações das RPAs na agricultura referem-se a coleta de imagens, portanto existem diversas cameras disponiveis no mercado, sendo elas as cameras convencionais, as multiespectrais, as hiperespectrais e as termais. As cameras convencionais são bastante versateis, tem a capacidade de obter imagens no espectro do visível nas bandas Vermelho (Red – R), Verde (Green -G) e Azul (Blue – B), sendo comumente chamadas de cameras RGB. As cameras multiespectrais são cameras que trabalham com mais bandas do espectro, incluindo além das bandas RGB, bandas não visíveis, tais como infravermelho proximo (near infrared NIR), borda do vermelho (Red Edge), entre outras. As cameras hiperespectrais são equipamentos que produzem imagens captadas com

milhares ou centenas de milhares de informações de todo o espectro eletromagnético, ao invés de trabalhar um único espctro. As cameras termais são equipamentos que capturam imagens no comprimento de onda do espectro eletromagnético do Infravermelho, estando relacionado com a radiação térmica e com o calor emitido pela matéria.

Assim sendo, dentro das operações de imageamento, pode-se destacar, na cafeicultura, o uso da RPA para o monitoramento das lavouras, medições topográficas, análises dos aspectos biofísicos das plantas, definição de linhas de plantio, contagem de plantas e de falhas de plantio, detecção de pragas e doenças, observação e detecção de deficiências nutricionais, danos causados por geada, análises de aspectos hídricos, pós-colheita, entre outros (Abreu 2025; Ferraz et al. 2018; Santos et al. 2023; Valente et al. 2024). Diversas pesquisas realizadas pela Universidade Federal de Lavras, vem apontando para a grande aplicabilidade das RPAs nestes tópicos citados.

Baseados nas pesquisas desenvolvidas visando a análise da altura de plantas e do diâmetro de copa de cafeeiros, utilizando-se técnica de fotogrametria a partir de imagens aéreas obtidas por RPA com um sensor visível RGB (Red, Green, Blue) e comparando-se com coletas de campo realizando estas medidas por 12 meses, foi possível observar que havia correlação de 87% entre os valores de altura e de 95% entre os valores diâmetro (Bento et al. 2022b). Isto demonstra o sucesso da aplicação de imagens obtidas por RPA para medidas de altura e diâmetro de copa de cafeeiros. Além disso, em se tratando de parâmetros biofísicos da cultura, foi possível extrair das imagens aéreas informações para calcular o índice de área foliar (IAF), área foliar (IA), porcentagem de cobertura da terra e Kc com bastante confiabilidade dos resultados, demonstrando a aplicabilidade da metodologia desenvolvida para a estimativa destes parâmetros (Santos et al. 2020a; Santos et al. 2020b). Outros estudos foram realizados com o objetivo de correlacionar a clorofila medida na folha com os índices de vegetação, inclusive levando em consideração as estações do ano, encontrando relação entre as variáveis e os índices de vegetação (Silva et al. 2024; Santos et al. 2022a). A coleta de imagens por RPA ainda podem ser importantes para identificação de áreas mais ou menos compactadas de uma lavoura cafeeira. Outra interessante aplicação relacionada ao manejo está na diferenciação de cultivares por meio de imagens obtidas por RPA (Bento et al. 2022a).

No que diz respeito ao plantio de cafeeiros, as aeronaves remotamente pilotadas podem auxiliar em vários aspectos. O primeiro deles está relacionado com a definição das linhas de plantio de cafeeiros, que a partir de imagens obtidas da área por meio de câmeras embarcadas em RPA, pode-se realizar a definição mais precisa destas linhas, por meio de análises topográficas (Santana et al. 2021). Assim, estas linhas de plantio, após ajustadas, podem ser enviadas para a controladora do sistema de piloto automático do trator, e este conseguirá realizar um plantio muito mais preciso. Estes dados já foram constatados por meio de pesquisas científicas. Além disto as imagens de RPA podem ser utilizadas para constatar se os plantios foram ou não bem realizados, observando se as linhas foram bem executadas e também se houveram falhas de plantio (Santana et al. 2021). Em se tratando de falhas de plantio, as imagens obtidas por RPA podem ser utilizadas para identificar os locais onde não são observadas plantas e que deveriam estar plantadas. Estas imagens tem o poder de identificar com uma precisão de até 92% os locais das falhas, sendo muito importantes para a etapa de replantio (Santana et al. 2021).

Na detecção de pragas, doenças e plantas daninhas em lavouras cafeeiras, as imagens obtidas por RPA podem se destacar. Como casos de sucesso pode-se apresentar um trabalho desenvolvido que observou a infestação da ferrugem em cafeeiros com índices de vegetação extraídos de imagens de RPA e inteligência artificial, sendo possível observar a infestação da ferrugem na área total, mesmo em locais não amostrados em campo, demonstrando uma abordagem válida para modelagem de tal variável (Santos et al. 2019; Marin et al. 2021b). Outros estudos demonstraram a potencialidade das imagens de RPA na análise da infestação de cercosporiose em cafeeiros. Trabalhos realizados em cafeeiros jovens infestados com bicho mineiro indicam que este possui uma resposta espectral diferente das folhas sadias, e para estes casos as imagens de RPA poderiam ser utilizadas para se identificar uma infestação por esta praga (Santos et al. 2022).

O uso de câmeras hiperespectrais tem se destacado como uma abordagem inovadora na cafeicultura, especialmente

na detecção precoce de doenças como cercosporiose e ferrugem. Em análises conduzidas em laboratório, essa tecnologia demonstrou alta eficiência na diferenciação espectral entre tecidos sadios e infectados, permitindo identificar assinaturas espectrais específicas associadas a cada patógeno (Zavala et al. 2024). Essa capacidade de caracterização detalhada fornece subsídios para o desenvolvimento de algoritmos de classificação robustos, que podem futuramente ser aplicados em campo com drones ou sensores embarcados, favorecendo um monitoramento mais rápido e preciso da sanidade dos cafeeiros.

Um caso de sucesso que pode ser destacado também é o estudo do nitrogênio foliar de lavouras cafeeiras, correlacionando a amostragem de folhas em campo e análises laboratoriais com os índices de vegetação aplicados em imagens obtidas por RPA (Marin et al. 2021b). Este estudo demonstrou a distribuição espacial da deficiência por nitrogênio bem como a quantificação da deficiência para toda a área de estudo, permitindo auxiliar na adubação diferenciada deste nutriente (Marin et al. 2021b). Estudos relacionados ao mapeamento das plantas daninhas utilizando-se imagens e inteligência artificial demonstraram ser factíveis e importantes para o manejo da cultura cafeeira (Bento et al. 2023).

O uso de drones na avaliação dos efeitos da geada em lavouras de cafeeiro tem se mostrado uma ferramenta eficiente para monitoramento rápido e preciso (Marin et al. 2021; Abreu 2025; Valente et al. 2025). Equipados com sensores RGB, multiespectrais e termográficos, os drones permitem identificar áreas mais ou menos afetadas, quantificar danos nas plantas e gerar mapas espaciais que auxiliam na tomada de decisão sobre manejo emergencial. Essa abordagem proporciona uma visão detalhada da variabilidade da geada dentro do talhão, superando limitações de coletas manuais e permitindo intervenções mais direcionadas e oportunas.

Imagens RGB obtidas por uma RPA e analisadas por meio do auxílio de inteligência artificial também podem ser utilizadas para estimar a produtividade de uma lavoura cafeeira. Um estudo realizado, demonstrou que com imagens obtidas por câmeras RGB e algoritmos de visão computacional analisando-se também as variáveis de altura, diâmetro da copa do cafeeiro, IAF e índices de vegetação, constatou-se que estas poderiam ser utilizadas para estimar a produtividade dos cafeeiros.

Além disto, análises de imagens de alta resolução obtidas por câmeras embarcadas em RPA podem ser utilizadas para avaliar as condições hídricas de uma lavoura cafeeira, inclusive associando a isto as condições climáticas e as estações do ano (Santos et al. 2024). Além das câmeras convencionais, câmeras termográficas podem ser utilizadas para analisar os aspectos hídricos das plantas, já tendo sido testada com sucesso (Santos et al. 2024).

As RPAs podem ser utilizadas até mesmo na pós-colheita dos frutos de cafeeiros, em específico na secagem em terreiros (Santana et al. 2023). As imagens podem ser utilizadas para se identificar a maturação dos frutos, a redução de área durante a secagem no terreiro e bem como o ponto de retirada dos frutos já secos do terreiro (Santana et al. 2023).

O uso de sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) embarcados em drones tem se mostrado uma ferramenta promissora para a cafeicultura de precisão (Abreu 2025). Essa tecnologia permite gerar nuvens de pontos tridimensionais de alta resolução, possibilitando a quantificação de características estruturais dos cafeeiros, como altura, volume da copa, densidade foliar e uniformidade do plantio (Abreu 2025). Essas informações são fundamentais para análises relacionadas ao manejo da lavoura, o monitoramento da desfolha após a colheita mecanizada e a identificação de variações espaciais no desenvolvimento das plantas. Dessa forma, o LiDAR contribui para a criação de protocolos de manejo mais eficientes, apoiando a tomada de decisão com base em dados detalhados e espacializados.

Além do monitoramento, a utilização de drones pulverizadores representa um avanço significativo na operacionalização das práticas agrícolas na cafeicultura. Essas aeronaves permitem a aplicação localizada e precisa de defensivos fitossanitários e bioinsumos, reduzindo o desperdício de produtos e os impactos ambientais. O uso de rotas planejadas e algoritmos de controle garante maior uniformidade na deposição da calda, mesmo em áreas de difícil acesso ou em terrenos inclinados, comuns nas regiões cafeeiras. Essa tecnologia também possibilita ajustes rápidos nas doses aplicadas,

conforme a variabilidade espacial da lavoura identificada por sensores e análises prévias, promovendo maior eficiência agronômica e sustentabilidade no manejo fitossanitário dos cafeeiros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os casos apresentados aqui já foram cientificamente comprovados pelos estudos realizados pelo Núcleo de Engenharia de Sistemas Agrícolas (NESA) da Universidade Federal de Lavras, coordenado pelo professor Gabriel Araújo e Silva Ferraz. Outros trabalhos também vêm sendo realizados por esta equipe no intuito de garantir a maior aplicabilidade das aeronaves remotamente pilotadas na cafeicultura. Como pode ser visto, as aeronaves remotamente pilotadas apresentam uma infinidade de possibilidades de serem aplicadas na cafeicultura e muitos outros exemplos nem foram abordados aqui, mas que também apresentam grandes potencialidades. O fato é que esta tecnologia veio para auxiliar o cafeicultor no manejo de sua lavoura fornecendo bem mais que um novo olhar para a sua área, mas sim, dados concretos e confiáveis para gestão de sua propriedade.

REFERENCIAS

Abreu ALV (2025) Análise de áreas após ocorrência de geada utilizando dados do sensor LiDAR embarcado em RPA. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Barata RAP, Ferraz GAS, Bento NL, Soares DV, Santana LS, Marin DB et al (2023) Evaluation of coffee plants transplanted to an area with surface and deep liming based on multispectral indices acquired using unmanned aerial vehicles. Agronomy-Basel 13: 2623.

Barbosa BDS, Ferraz GAS, Costa L, Ampatzidis Y, Vijayakumar V and Santos LM (2021) UAV-based coffee yield prediction utilizing feature selection and deep learning. Smart Agricultural Technology 1: 1–9.

Bento NL, Ferraz GAS, Barata RAP, Soares DV, Santos LM, Santana LS, Ferraz PFP, Conti L and Palchetti E. (2022a) Characterization of recently planted coffee cultivars from vegetation indices obtained by a remotely piloted aircraft system. Sustainability 14: 13118.

Bento NL, Ferraz GAS, Barata RAP, Soares DV, Santana LS and Barbosa BDS (2022b) Estimate and temporal monitoring of height and diameter of the canopy of recently transplanted coffee by a remotely piloted aircraft system. AgriEngineering 4, 207–215.

Bento NL, Ferraz GAS, Amorim JS, Santana LS, Barata RAP, Soares DV and Ferraz PFP (2023) Weed detection and mapping of a coffee farm by a remotely piloted aircraft system. Agronomy 13: 830.

Bezerra DB, Silva JPJF, Zanella MA, Santos LM, Brum D and Ferraz GAS (2024) Correlação entre ovos e juvenis de Meloidogyne exigua e índices de vegetação obtidos por ARP. En: Anais do LIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2024, Natal.

Ferraz GAS, Gonçalves LM, Maciel DA, Barbosa BDS and Maciel DT(2018) Separação da cobertura vegetal de cafeeiros utilizando índices de vegetação através de aeronave remotamente pilotada. En: Anais do XIII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola – CLIA 2018, San José.

Gonçalves LM, Ferraz GAS, Maciel DA, Barbosa BDS and Maciel DT (2018) Segmentação e classificação de imagem de uma lavoura cafeeira obtida por câmera convencional a bordo de uma aeronave remotamente pilotada. En: Anais do XIII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola – CLIA 2018, San José.

Lopes Bento N, Ferraz GAS, Oliveira ML, Campos AAV, Carvalho MAF et al (2025) Remotely piloted aircraft system and machine learning for detection of coffee plants subjected to foliar application of chitosan. European Journal of Remote Sensing 58: 1–11.

Marin DB, Ferraz GAS, Schwerz F, et al. (2021a) Unmanned aerial vehicle to evaluate frost damage in coffee plants. Precision Agriculture.

Marin DB, Ferraz GAS, Guimarães PHS, Schwerz F, Santana S, et al (2021b). Remotely piloted aircraft and random forest in the evaluation of the spatial variability of foliar nitrogen in coffee crop. Remote Sensing 13: 1471. https://doi.org/10.3390/rs13081471

Marin, D.B., Ferraz, G.A.S., Santana, L.S., Barbosa, B.D.S., Barata, R.A.P., Osco, L.P., Ramos, A.P.M. & Guimarães, P.H.S. 2021c. Detecting coffee leaf rust with UAV-based vegetation indices and decision tree machine learning models. Computers and Electronics in Agriculture 190, 106476.

Santana LS, Ferraz GAS, Cunha JPB, Santana MS, Faria RO, Marin DB, Rossi G, Conti L, Vieri M and Sarri D (2021) Monitoring errors of semi-mechanized coffee planting by remotely piloted aircraft. Agronomy-Basel 11.

Santana LS, Ferraz GAS, Santos GHR, Bento NL and Faria RO (2023) Identification and counting of coffee trees based on convolutional neural network applied to RGB images obtained by RPA. Sustainability 15: 820.

Santana LS, Ferraz GAS, Santana MS, Bento NL, Silva JM, Faria RO (2024) Residual ash mapping and coffee plant development based on multispectral RPA images. Remote Sensing 16: 1917.

Santana LS, Ferraz GAS, Faria RO, Silva JM, Santana MS and Marques Filho AC (2023) Níveis de secagem de frutos de cafeeiro no terreiro por imagens de ARP. En: Anais do LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2023, Ribeirão Preto.

Santos LM, Ferraz GAS, Barbosa BDS, Diotto AV and Maciel DT (2020a) Biophysical parameters of coffee crop estimated by UAV RGB images. Precision Agriculture 21: 1.

Santos LM, Ferraz GAS, Barbosa BDS, Diotto AV, Andrade MT, Conti L and Rossi G (2020b) Determining the leaf area index and percentage of area covered by coffee crops using UAV RGB images. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 1–1.

Santos LM, Ferraz GAS, Carvalho MAF, Vilela MS and Estima PHO (2023) Preliminary study on the potential use of RPA images to quantify the influence of defoliation after coffee harvesting to its yield. Agronomy Research 21: 1555–1566.

Santos LM, Ferraz GAS, Santana LS, Barbosa BDS, Xavier, LAG and Andrade MT (2019) Índice de vegetação (ExGR) aplicado

a imagens RGB obtidas por UAV para detecção de doença em cafeeiros. En: Anais do X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Vitória.

Santos LMD, Ferraz GAS, Carvalho MAF, Campos AAV, Neto PM, Xavier LAG, Mattia A, Becciolini V and Rossi G (2024) A spatial analysis of coffee plant temperature and its relationship with water potential and stomatal conductance using a thermal camera embedded in a remotely piloted aircraft. Agronomy 14: 2414.

Santos LMD, Ferraz GAS, Carvalho MAF, Teodoro SA, Campos AAV and Neto PM (2022a) Use of RPA images in the mapping of the chlorophyll index of coffee plants. Sustainability 14: 13118.

Santos LMD, Ferraz GAS, Marin DB, Carvalho MAF, Dias JEL and Silva MLO (2022b) Vegetation indices applied to suborbital multispectral images of healthy coffee and coffee infested with coffee leaf miner. AgriEngineering 4: 311–319.

Silva SAS (2025) Integração de tecnologias de agricultura de precisão e digital aplicadas na gestão da cafeicultura. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Silva SAS, Ferraz GAS, Figueiredo VC, Valente GF, Volpato MML and Machado ML (2025) Soil moisture spatial variability and water conditions of coffee plantation. AgriEngineering 7: 110.

Silva SAS, Ferraz GAS, Figueiredo VC, Volpato MML, Machado ML, Silva VA, Matos CSM, Conti L and Bambi G (2024) Spatial variability of chlorophyll and NDVI obtained by different sensors in an experimental coffee field. Agronomy Research 22: 554–570.

Valente GF, Ferraz GAS, Schwerz F, Faria RO, Fernandes FA and Marin DB (2024) Remotely piloted aircraft for evaluating the impact of frost in coffee plants: interactions between plant age and topography. Remote Sensing 16: 3467.

Zavala EH, Ferraz GAS, Silva MLO and Morais RMA (2024) Diferenças espectrais em folhas de café saudáveis e atingidas por cercosporiose: um estudo com câmera hiperespectral En: Anais do III Workshop Hyperspectral Imaging, Campinas.

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Intelligent dairies in the era of data revolution

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Industrias lácteas inteligentes en la era de la revolución de los datos.

Flávio Alves Damasceno[1]*

ABSTRACT

Keywords:
Animal facility
Sensors
Precision

The integration of precision livestock farming technologies into dairy production has transformed herd management by providing real-time monitoring of animal health, productivity, and welfare. Traditional observation-based methods, though valuable, are labor-intensive and prone to inaccuracies. Modern systems employ advanced sensors and automated data collection to track key parameters, including milk yield, composition, rumen and milk pH, animal behavior, reproductive status, and barn microclimate. These tools enable farmers to anticipate problems, optimize nutritional strategies, improve reproductive efficiency, and enhance overall animal comfort. Microclimate sensors measure air temperature, humidity, and wind speed, supporting ventilation control and energy efficiency, while accelerometers and pedometers detect heat behavior and lying activity, facilitating timely insemination and welfare assessment. Imaging technologies such as 3D cameras extend these capabilities by supporting body condition scoring, lameness detection, and robotic milking. Despite challenges like high implementation costs and technical requirements, the growing adoption of these tools underscores their potential to improve both productivity and sustainability. By integrating data processing, decision-making, and visualization, precision technologies not only strengthen farm profitability but also ensure better welfare outcomes, marking a crucial step toward sustainable and responsible dairy production.

RESUMEN

Palabras clave:
Instalaciones para animales
Sensores
Precisión

La integración de tecnologías de ganadería de precisión en la producción lechera ha transformado la gestión de los rebaños al proporcionar un monitoreo en tiempo real de la salud, la productividad y el bienestar animal. Los métodos tradicionales basados en la observación, si bien valiosos, requieren mucha mano de obra y son propensos a imprecisiones. Los sistemas modernos emplean sensores avanzados y la recopilación automatizada de datos para monitorear parámetros clave, como la producción y composición de la leche, el pH ruminal y de la leche, el comportamiento animal, el estado reproductivo y el microclima del establo. Estas herramientas permiten a los ganaderos anticipar problemas, optimizar las estrategias nutricionales, mejorar la eficiencia reproductiva y aumentar el bienestar general de los animales. Los sensores de microclima miden la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del viento, lo que favorece el control de la ventilación y la eficiencia energética, mientras que los acelerómetros y podómetros detectan el comportamiento relacionado con el celo y la actividad de reposo, lo que facilita la inseminación oportuna y la evaluación del bienestar. Las tecnologías de imagen, como las cámaras 3D, amplían estas capacidades al permitir la evaluación de la condición corporal, la detección de cojeras y el ordeño robótico. A pesar de los desafíos, como los altos costos de implementación y los requisitos técnicos, la creciente adopción de estas herramientas subraya su potencial para mejorar tanto la productividad como la sostenibilidad. Al integrar el procesamiento de datos, la toma de decisiones y la visualización, las tecnologías de precisión no solo mejoran la rentabilidad de las explotaciones ganaderas, sino que también garantizan mejores resultados en el bienestar animal, lo que supone un paso crucial hacia una producción lechera sostenible y responsable.

[1]Federal University of Lavras, Engineering Department, BR37200-000 Lavras, Minas Gerais, Brazil.
*Corresponding author: flavio.damasceno@ufla.br

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

The modernization of dairy farming has brought significant challenges and opportunities for improving efficiency, sustainability, and animal welfare. Traditional methods of monitoring herd health and productivity, while essential, are often labor-intensive, costly, and prone to human error. In response, precision livestock farming technologies have emerged as powerful tools to optimize herd management, enhance animal comfort, and increase milk production. By integrating advanced sensors, data analysis, and automation, these innovations allow producers to monitor environmental conditions, animal behavior, nutrition, and reproductive performance in real time. This shift represents a fundamental transformation in dairy production systems, aligning animal welfare with economic and environmental sustainability.

TECHNOLOGIES USED FOR GENERAL MONITORING IN THE DAIRY BARN

The main challenges in effectively monitoring animal welfare revolve around three key factors: cost, validity, and timeliness of findings. Most available methods are time-consuming, labor-intensive, and thus expensive. Dairy cattle farmers often rely on caretakers' observations to detect health and welfare issues.

To assist producers, precision technology has been implemented with the goal of improving herd management by measuring productive, behavioral, and physiological indicators to enhance animal health, productivity, and welfare (Steeneveld et al. 2015).

This technology uses process engineering principles to automate cattle farming, allowing farmers to monitor large populations and detect issues with individual animals in a timely manner—or even anticipate problems before they occur using historical data (Neethirajan and Kemp 2021).

Precision technology generally uses sensors to monitor production systems, which are described across four stages of development and usage:

Sensor: Measures an environmental (e.g., air temperature) or animal-related parameter (e.g., behavior), resulting in a data set.

Interpretation: The changes or records observed in the data set provide insights about current conditions (e.g., comfortable environment or heat stress; lying cow or standing cow).

Data Integration: Sensor data is combined with other variables (e.g., energy cost) to guide planning in the production system.

Data Transmission: Information collected and encoded by the system is transmitted to various facility components to improve animal conditions.

Decision-Making: The producer or system autonomously decides actions to be taken (e.g., turning a fan on/off or adjusting its speed).

Data Visualization: Information is displayed (on phone, computer, etc.) in simplified formats (charts, tables, images) to aid in milk production improvements.

The use of precision technologies is becoming increasingly common on dairy farms (Pereira et al. 2015). Key monitored parameters include milk production (volume, composition, temperature, conductivity, blood presence, and somatic cell count), animal behavior (resting time, rumination, feed and water intake, heat detection activity meters), hoof issues, and body weight. Many more parameters are being proposed or are under development.

Monitoring the Microclimate

Monitoring the microclimate in Dairy barnfacilities is a key innovation for decision-making, both in planning and daily dairy operations. Microclimate variables (air temperature, relative humidity, wind speed, etc.) change daily and must be constantly monitored.

Air temperature is the easiest variable to measure using a thermometer. Various commercial thermometers allow manual recording, though automatic sensors are available (at a higher cost) to monitor this variable at preset intervals. These must be well-calibrated to avoid inaccuracies in dairy barn facilities (Figure 1).



A B

Figure 1. Different types and models of thermometers.

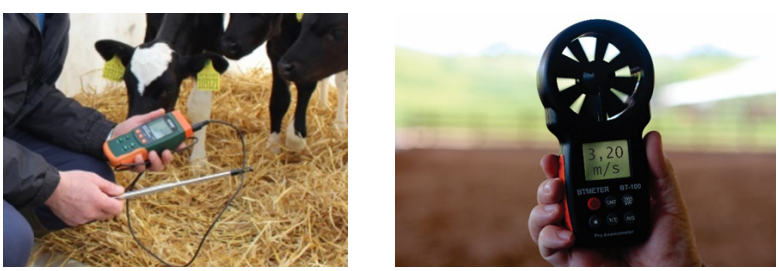
Relative humidity is measured using a **thermo-hygrometer** or **psychrometer**, which features two similar thermometers—one dry-bulb and one wet-bulb (Figure 2). Sensors should always be placed where animals are housed and at mid-body height to accurately represent the animal's exposed microclimate. Heights: 0.8 m for calves, 1.2 m for heifers, and 1.5 m for adult animals (Damasceno et al. 2020).



A B

Figure 2. Sensors used to measure relative air humidity: A. psychrometer and B. thermo-hygrometer.

Wind speed is measured with **anemometers**, which come in several models: cup, propeller, hot-wire, laser, and ultrasonic—each with distinct features suited to specific applications (Figure 3).



A B

Figure 3. Anemometers used to measure air velocity: a) hot-wire and b) propeller.

Some ventilation companies use air temperature and humidity sensors to control fan operations (Figure 4). Thermo-hygrometers are attached to fans, which adjust their speed or activation based on internal microclimate data. This can save over 40% in energy and allows remote monitoring via smartphone.

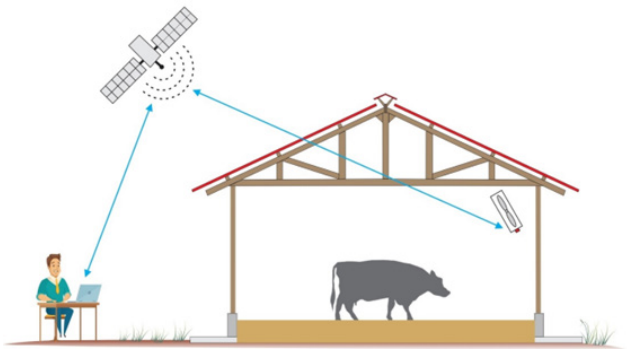


Figure 4. Operating diagram of the control, management, and data transmission system of the air temperature sensor attached to the fan.

Herd Monitoring Technologies in the dairy barn

Rumen pH plays a critical role in digestion and milk production. When rumen pH drops below 5.8, microbial growth is inhibited and milk yield can decrease. Low rumen pH can also lead to acidosis, illness, or death. Thus, electronic devices are used to monitor rumen and milk pH, aiding in dietary adjustments and improving milk quality (Figure 5).

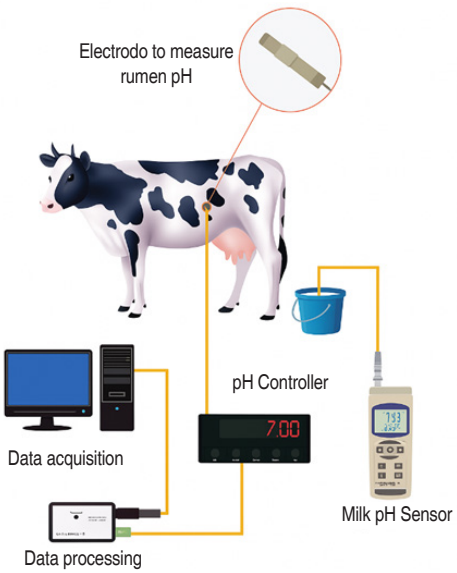


Figure 5. Device for measuring the pH of the rumen and milk of cows in real time.

Pedometers (accelerometer sensors) accurately measure when cows lie down or walk (Alsaaod et al. 2015). These sensors store daily behavioral data and transmit summaries to farm management software, especially for heat detection in dairy cows (Figure 6).

Lying behavior is also important for assessing comfort. More time lying down indicates better comfort. Accelerometers can be attached to a cow's leg and neck/head to measure rest quality (Halachmi et al. 2019).



Figure 6. Accelerometer sensor attached to the cow's neck.

Body condition scoring (BCS) is essential for evaluating nutrition, health, and reproductive status. Visual assessment is often imprecise due to limited observer training. Digital and surveillance cameras are commonly used to aid this evaluation, generating digital images from visible light. Other technologies—like infrared, ultrasound, ionizing radiation, and even **3D imaging** are also applied.

3D cameras are used in robotic milking to align the milking machine with teats, monitor BCS, detect heat, and feed intake, making them revolutionary in dairy production.



Figure 7. Robotic milking with a three-dimensional camera system.

Image technology for BCS and body weight measurement supports morphological analyses, helping standardize traits like body size, udder, and leg conformation.

Lameness is a major issue in dairy cows, second only to mastitis (Booth et al., 2004). Detecting severe cases is easy, but treatment is harder when hoof damage is advanced. **3D vision systems** are used for early detection of mild and subclinical lameness, aiding genetic selection for hoof health.

Technologies for managing productive and reproductive data in the dairy barn

Various devices have been developed to improve dairy production by enhancing animal management, environment, nutrition, health, genetics, and reproduction.

In **nutritional management**, strategies mainly focus on increasing productivity and economic return, with less emphasis on reducing nutrient excretion and gas emissions. Accurate data collection and conversion into actionable insights are essential for planning, executing, monitoring, and adjusting nutritional practices (Tomich & Pereira, 2015).

Although **reproductive efficiency** is essential, it remains one of the biggest challenges in dairy farming. Over the past decades, milk yield has increased, but fertility has decreased. Reproductive management issues hinder efficiency (Rodrigues & Rodrigues, 2009). Key reproductive factors include reducing endometritis, promoting early uterine involution, and preventing ovarian diseases - all increasing the chances of successful conception (Caetano & Caetano Júnior, 2015).

Detecting the exact time for **artificial insemination** is one of the main difficulties. Traditional signs of standing heat are harder to observe, often missed due to hoof issues,

human error, poor facilities, and shorter estrus periods caused by increased milk production (Scariot et al., 2020; Leira et al. 2018).

Electronic heat detection systems using **radio telemetry** are accurate but often cost-prohibitive on a large scale (Caetano & Caetano Júnior, 2015). However, **pedometers** offer an affordable solution, monitoring heat-related activity in specific cows, thus helping producers decide the right time for insemination (Scariot et al., 2020).

CONCLUSION

The adoption of precision livestock technologies in dairy barns provides farmers with unprecedented capabilities to monitor, predict, and manage herd productivity and welfare. From microclimate sensors and accelerometers to 3D imaging systems and reproductive monitoring devices, these tools enable data-driven decision-making that supports both animal health and farm profitability. While challenges such as high implementation costs and the need for technical expertise remain, the continued development and integration of precision farming solutions represent a vital pathway for sustainable dairy production. Ultimately, these innovations not only enhance productivity but also foster improved welfare standards, ensuring that the dairy industry can meet future demands responsibly.

ACKNOWLEDGMENTS

Author would like to thank the Brazilian Organizations (CNPq, FAPEMIG and CAPES).

REFERENCES

Alsaaod M, Niederhauser JJ, Beer G, Zehner N, Schuepbach-Regula G and Steiner A (2015) Development and validation of a novel pedometer algorithm to quantify extended characteristics of the locomotor behavior of dairy cows. Journal of Dairy Science 98: 6236–6242..

Booth CJ, Warnick LD, Gröhn YT, Maizon DO, Guard CL and Janssen D (2004) Effect of lameness on culling in dairy cows. Journal of Dairy Science 87: 4115-4122.

Firk R, Stamer E, Junge W and Krieter J (2002) Automation of oestrus detection in dairy cows: a review. Livest Prod Sci 75: 219–232.

Halachmi I, Guarino M, Bewley J and Pastell M (2019) Smart animal agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production. Annual Review of Animal Biosciences 7: 403-425.

Neethirajan S, Kemp B (2021) Digital livestock farming. Sensing and Bio-Sensing Research 32: 202.

Scariot J, Souza BF, Zanella EL, Zanella R (2020) Teste de eficiência de um novo dispositivo eletrônico de identificação de cio em fêmeas bovinas leiteiras mantidas em regime de compost barn. Rev Bras Reprod Anim 44(2): 64-70.

Schlageter-Tello A, Bokkers EA, Groot Koerkamp PW, Van Hertem T, Viazzi S (2014) Manual and automatic locomotion scoring systems in dairy cows: a review. Prev Vet Med 116: 12–25.

Song X, Bokkers EAM, Van der Tol PPJ, Groot Koerkamp PWG, Van Mourik S (2017) Automated body weight prediction of dairy cows using 3-dimensional vision. Journal Dairy Science 101: 4448-4459.

Tomich TR, Pereira LGR (2015) Nutrição de precisão na pecuária leiteira. Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia 79: 15.

CONFERENCIAS ESPECIALES

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Detección del estrés hídrico en frijol utilizando imágenes multiespectrales y sensores de humedad del suelo

Detection of water stress in beans using multispectral images and soil moisture sensors

Nestor Magdaleno Montoya Pineda[1]*, Marín Cadena Zapata[2], Alejando Zermeño González[2], Mario Alberto Méndez Dorado[2] and Andrés Cadena Diaz[2]

Palabras clave:
Detección del estrés hídrico
Estrés hídrico
Índices de vegetación
Sistemas aéreos no tripulados
Teledetección

RESUMEN

La detección del estrés hídrico es clave para mejorar la productividad y calidad de cultivos. Este estudio evalúa la teledetección con drones y sensores multiespectrales y de humedad para monitorear estrés hídrico en frijol "Flor de Mayo AN-05". Se analizaron la posición de la cinta de riego (superficial y enterrada) y tres niveles de tensión de humedad (20, 30 y 50 kPa), evaluando índices NDRE, TGI, NDWI y reflectancia en bandas Red Edge y Red. Los resultados muestran que ambos factores afectan significativamente los índices, con 20 kPa favoreciendo NDWI y 30 kPa aumentando reflectancia en Red Edge y Red. Estos hallazgos resaltan la importancia de la cinta de riego y la tensión de humedad para optimizar el riego y rendimiento del frijol.

Keywords:
Water stress sensing
Water stress
Vegetation indices
Unmanned aerial systems
Remote sensing

ABSTRACT

Detecting water stress is key to improving crop productivity and quality. This study evaluates remote sensing using drones equipped with multispectral and soil moisture sensors to monitor water stress in the bean variety "Flor de Mayo AN-05." Two factors were analyzed: irrigation tape position (surface and buried) and three soil moisture tension levels (20, 30, and 50 kPa), assessing NDRE, TGI, NDWI indices, and reflectance in the Red Edge and Red bands. Results show both factors significantly affect the indices, with 20 kPa favoring NDWI and 30 kPa increasing reflectance in Red Edge and Red bands. These findings highlight the importance of irrigation tape position and soil moisture tension to optimize irrigation efficiency and bean crop yield.

[1]Universidad Autónoma de Tamaulipas, Mexico. ORCID: 0009-0005-1877-5968
[2]Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, Mexico. ORCID: 0000-0003-2401-942X; ORCID: 0000-0003-4137-9638; ORCID: 0000-0002-8704-3817; ORCID: 0000-0002-4330-7112
*Corresponding author: <nmontoya@uat.edu.mx>

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

El sector agrícola en México, clave para la economía y la seguridad alimentaria, enfrenta grandes retos en la gestión del agua. El cambio climático agrava esta situación al provocar aumento de temperaturas, alteraciones en lluvias y eventos extremos que reducen los rendimientos (Dalin et al. 2017; Kumari & Bains 2023). El monitoreo de humedad del suelo es vital para estudiar sequías, inundaciones y estimar rendimientos (Lin et al. 2024). Las imágenes multiespectrales captadas por drones han probado ser eficaces para detectar estrés hídrico y predecir rendimiento en frijol (Lipovac et al. 2022). Además, el uso de dispositivos IoT, como drones y sensores, fortalece la seguridad alimentaria (Singh et al. 2024). Bajo la hipótesis de que los índices espectrales y la tensión de humedad permiten identificar el estrés hídrico, este estudio evaluó los índices NDRE, TGI y NDWI, y la reflectancia en bandas roja y Red Edge, bajo tres tensiones de humedad y dos posiciones de cinta de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el Jardín Hidráulico de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila (1743 msnm), con clima templado semiárido (16.9 °C y 435 mm anuales). El lote experimental de 420 m² contó con riego por goteo en secciones independientes para aplicar tratamientos diferenciados (Figura 1).

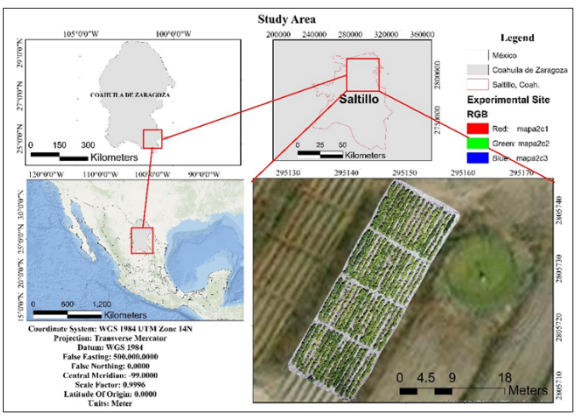


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

Diseño experimental

Se usó un diseño de parcelas divididas al azar con dos factores: posición de la cinta de riego (superficial y enterrada a 20 cm) y tres niveles de tensión de humedad (20, 30 y 50 kPa), con seis tratamientos y cuatro repeticiones (Tabla 1). Se sembró la variedad de frijol "Flor de Mayo AN-05" el 15 de agosto de 2023, con 80 cm entre surcos y 10 cm entre plantas.

Captura y procesamiento de imágenes

Las imágenes multiespectrales se capturaron con un dron DJI Phantom 4 Pro y cámara RedEdge-MX™, calibrada con sensor solar DLS 2 y GPS. Los vuelos a 20 m, con 80% de solapamiento y resolución de 2 cm/píxel, aseguraron precisión. El procesamiento en Pix4Dmapper generó ortomosaicos y extrajo índices NDRE, TGI, NDWI y reflectancia en bandas roja y Red Edge.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron en R Studio, realizando pruebas de normalidad y homogeneidad, seguidas de ANOVA para evaluar diferencias significativas entre factores e interacción. Las comparaciones de medias se efectuaron con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índice NDRE

El análisis de varianza reveló diferencias significativas en NDRE según la posición de la cinta (P=0,0223) y la tensión del suelo (P=0,00482). La cinta enterrada mostró valores mayores, apoyando a Griffin-LaHue et al. (2023), que indican que enterrarla a 0.15 m mejora la distribución de humedad. Adrian Card & Troy Bauder (2019) señalan que el riego subterráneo reduce la evaporación superficial y aumenta la eficiencia del agua en la raíz.

Índice TGI

El índice de verdor TGI no se vio afectado por la posición de la cinta (*P*=0,464), pero sí por la tensión de humedad (*P*=3,33e-07). La interacción entre ambos factores fue significativa (*P*=0,0396), mostrando que las condiciones combinadas influyen en el verdor. Esto coincide con Cui et al. (2022), quienes reportaron que la humedad afecta índices de vegetación según estación y altitud. Zhang et al. (2023) también encontraron una relación casi lineal entre NDVI y contenido de agua, confirmando la sensibilidad a cambios hídricos.

Índice NDWI

El NDWI disminuyó al aumentar la tensión de humedad, con valores altos en 20 kPa y descensos claros en 50 kPa. Esto refleja la relación entre reflectancia foliar y contenido de agua en hojas, según Quemada et al. (2021). Valores negativos de NDWI en vegetación leñosa, reportados por Pereira et al. (2018), respaldan su uso como indicador sensible del estado hídrico.

Reflectancia Red Edge

La reflectancia en Red Edge mostró una interacción significativa entre la posición de la cinta y la tensión del suelo, con valores máximos en 30 kPa y cinta enterrada. Esta banda, sensible a la concentración de clorofila (Lin et al. 2019), se relaciona con la actividad fotosintética y la salud del cultivo. Shi et al. (2023) indican que mayor clorofila indica mejor rendimiento, reforzando su valor como herramienta de diagnóstico.

Reflectancia Roja

La reflectancia en la banda roja fue mayor con cinta superficial a 30 kPa, indicando menor absorción de luz por clorofila y posible estrés hídrico. Esto coincide con Xue y Su (2017), quienes relacionaron la reflectancia en rojo con deficiencias nutricionales, enfermedades o estrés por sequía.

Tabla 1. Factores principales de estudio y tratamientos correspondientes.

Factor A Posición de la cinta de riego	Factor B Tensión de humedad del suelo (kPa)	Tratamiento
Superficie	20	T1
Superficie	30	T2
Superficie	50	T3
Enterrada	20	T4
Enterrada	30	T5
Enterrada	50	T6

CONCLUSION

La posición de la cinta de riego y la tensión de humedad afectan la respuesta espectral del frijol. NDWI fue el índice más sensible al estrés hídrico, mientras que NDRE y Red Edge se relacionaron con la eficiencia fotosintética bajo riego enterrado. Los resultados indican que combinar drones, sensores multiespectrales y tensiómetros es una herramienta eficaz para monitorear agua en cultivos, mejorando la eficiencia del riego y la sostenibilidad agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CONAHCYT por el apoyo mediante el proyecto 2022-000018-02NACF-12359 y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por su respaldo en este estudio. También agradecemos a la Universidad Autónoma de Tamaulipas por facilitar el equipo de teledetección agrícola usado en la recolección de datos en el cultivo de frijol.

REFERENCIAS

Adrian Card, Troy Bauder (2019) Determining Irrigation run times with drip tape on specialty crops. Colorado State University. 296 p.

Cui X, Xu G, He X, Luo D (2022) Influences of seasonal soil moisture and temperature on vegetation phenology in the qilian mountains. Remote Sens (Basel) 14: https://doi.org/10.3390/rs14153645

Dalin C, Wada Y, Kastner T, Puma MJ (2017) Groundwater depletion embedded in international food trade. Nature 543:. https://doi.org/10.1038/nature21403

Griffin-LaHue D, Wang D, Gaudin ACM, et al (2023) Extended soil surface drying triggered by subsurface drip irrigation decouples carbon and nitrogen cycles and alters microbiome composition. Frontiers in Soil Science 3. https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1267685

Kumari S, Bains G (2023) Agrifood and climate change. In: Ansari MW (ed.) Global Climate Change and Plant Stress Management. Wiley. 496 p.

Lin R, Wei Z, Hu R, et al (2024) Construction and validation of surface soil moisture inversion model based on remote sensing and neural network. Atmosphere (Basel) 15: 647. https://doi.org/10.3390/atmos15060647

Lin S, Li J, Liu Q, et al (2019) Evaluating the effectiveness of using vegetation indices based on red-edge reflectance from Sentinel-2 to estimate gross primary productivity. Remote Sens (Basel) 11. https://doi.org/10.3390/rs11111303

Lipovac A, Bezdan A, Moravćević D, et al (2022) Correlation between ground measurements and uav sensed vegetation indices for yield prediction of common bean grown under different irrigation Treatments and Sowing Periods. SSRN Electronic Journal. https://doi.org/10.2139/ssrn.4162287

Pereira LE, Amorim G, Grigio AM, Filho ACP (2018) Comparative analysis of normalized difference water index (NDWI) methods in continental wetland. Anuario do Instituto de Geociencias 41. https://doi.org/10.11137/2018_2_654_662

Quemada C, Pérez-Escudero JM, Gonzalo R, et al (2021) Remote sensing for plant water content monitoring: A review. Remote Sens (Basel) 13.

Shi H, Guo J, An J, et al (2023) Estimation of chlorophyll content in soybean crop at different growth stages based on optimal spectral index. Agronomy 13. https://doi.org/10.3390/agronomy13030663

Singh E, Pratap A, Mehta U, Azid SI (2024) Smart agriculture drone for crop spraying using image-processing and machine learning techniques: experimental validation. IoT 5: 250–270. https://doi.org/10.3390/iot5020013

Xue J, Su B (2017) Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. J Sens 2017.

Zhang Y, Zhang Y, Lian X, et al (2023) Enhanced dominance of soil moisture stress on vegetation growth in Eurasian drylands. Natl Sci Rev 10. https://doi.org/10.1093/nsr/nwad108

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

¿Subsistencia o agronegocio? El futuro incierto de la yuca en Colombia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Eduardo Rodriguez-Sandoval[1] and Víctor Hernández[2]

En Colombia, la yuca es un cultivo ancestral, parte fundamental de la dieta en muchas regiones y uno de los productos agrícolas más importantes del país. Se cultiva en casi todos los departamentos, ocupa más de 180.000 hectáreas y genera más de dos millones de toneladas al año. Sin embargo, a pesar de su relevancia y de la creciente demanda por sus derivados industriales, sigue siendo un cultivo con bajo rendimiento, poco competitivo y atrapado en prácticas tradicionales que limitan su potencial.

Un reciente artículo publicado en la revista *Agronomía Colombiana* sobre los desafíos de la industrialización de la yuca advierte que el país está desaprovechando una enorme oportunidad económica. Mientras Colombia apenas alcanza un rendimiento promedio de 11 ton/ha, países como Tailandia y Paraguay logran entre 18 y 22 ton/ha gracias a la mecanización y sistemas de riego, el uso de semillas certificadas, y contratos estables con la industria. La experiencia de otros países demuestra que la yuca puede ser un motor económico si se moderniza su producción. Tailandia, por ejemplo, es el mayor exportador de almidón de yuca del mundo, gracias a un enfoque agroindustrial apoyado en biorefinerías, mecanización y sistemas de riego modernos. En Colombia, por el contrario, la producción se concentra en pequeñas parcelas, con mano de obra manual, material de siembra de baja calidad y mínima adopción tecnológica.

El 94% de la yuca en el país se destina a consumo humano directo, y solo el 6% se industrializa. La transformación de la yuca en almidones, harinas, bioplásticos o biocombustibles es aún marginal, pese a que existe una creciente demanda interna e incluso se importa almidón para suplir las necesidades de la industria alimentaria, papelera y textil. Las oportunidades están sobre la mesa, pero no se están aprovechando.

La falta de mecanización es una de las principales barreras. La siembra, el manejo del cultivo y la cosecha siguen siendo labores manuales, lo que las hace lentas, costosas y poco eficientes. En Colombia, el 85% de los productores de yuca son pequeños agricultores con parcelas menores a 10 ha. Estos dependen del trabajo manual para labores como la siembra, cosecha y transporte, lo que incrementa los costos y reduce la eficiencia. La calidad del material de siembra también es deficiente: muchas veces los productores usan estacas no certificadas, con bajo rendimiento y susceptibles a plagas. La carencia de sistemas de riego agrava la situación, aunque la yuca tolera sequías mejor que otros cultivos, su productividad y calidad aumentan significativamente con agua suficiente. Todo esto ocurre en un contexto donde la producción está dispersa, los productores trabajan aislados, con poca organización y una cultura empresarial limitada, lo que dificulta negociar mejores precios o acceder a créditos y tecnología. La perecibilidad de la yuca fresca (debe procesarse en menos

[1]Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
[2]CEO de POLTEC SAS. La Estrella, Colombia. victor.hernandez@poltecsas.com
*Corresponding author: edrodriguezs@unal.edu.co

CC BY NC SA

de 48 horas después de la cosecha) exige una logística eficiente y plantas de procesamiento cercanas a las zonas de cultivo. Sin embargo, en Colombia faltan infraestructuras adecuadas, lo que genera altas pérdidas poscosecha.

Otro obstáculo es la producción estacional: muchos agricultores siembran y cosechan en las mismas épocas, generando picos de oferta y períodos de escasez que desestabilizan el mercado y los precios. Además, la población dedicada al cultivo está envejeciendo, con poco relevo generacional, lo que amenaza la sostenibilidad de esta actividad.

El artículo en *Agronomía Colombiana* destaca que superar estos problemas requiere una estrategia integral. Entre las soluciones propuestas están los contratos de venta anticipada, que dan seguridad tanto al productor como a la industria; el acceso a maquinaria, semillas certificadas y sistemas de riego; la consolidación de cultivos más extensos y organizados, ya sea por asociaciones de pequeños productores o mediante la reconversión de tierras ganaderas; y el fortalecimiento de la cultura empresarial para que los agricultores conozcan mejor la cadena de valor, lleven registros y se organicen colectivamente.

Sin embargo, ningún esfuerzo de modernización será suficiente sin el apoyo del Estado. Para transformar la yuca en un motor económico se necesitan políticas públicas que incentiven la tecnificación: subsidios para maquinaria y semillas, seguros agrícolas, créditos accesibles, programas de capacitación y estímulos para la organización de los productores. La experiencia internacional muestra que, sin intervención pública, la industrialización de los productos agrícolas recae sobre los más vulnerables, poniendo en riesgo su éxito.

Colombia tiene todo para convertirse en un líder regional en la producción e industrialización de la yuca. Sin embargo, la falta de tecnificación, la escasa inversión en infraestructura y la desorganización de la cadena productiva han limitado su potencial. Si el país logra superar estos obstáculos, la yuca no solo podría generar empleo y desarrollo rural, sino también posicionarse como un producto estratégico en mercados globales. El camino no es fácil, pero los ejemplos de Tailandia, Brasil y Paraguay demuestran que, con tecnología, planificación y políticas claras, la yuca puede ser mucho más que un cultivo de subsistencia: puede ser una apuesta por el futuro agroindustrial de Colombia.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Automatización inteligente en la agricultura: una integración de conocimientos para la sostenibilidad y productividad

Intelligent automation in agriculture: An integration of knowledge for sustainability and productivity

Andrés Felipe Higuera Villalba[1]*, Jesús Camacho Tamayo[2] and Oscar García Navarrete[2]

Palabras clave:
Agricultura digital .
Automatización inteligente
Inteligencia artificial
Robótica agrícola
Sostenibilidad agrícola

RESUMEN

La agricultura contemporánea enfrenta retos de sostenibilidad, baja disponibilidad de mano de obra, creciente demanda alimentaria y variabilidad climática. En este escenario, la automatización inteligente se perfila como un paradigma que combina sensores, robótica, Internet de las Cosas (IoT), ciencia de datos e inteligencia artificial para percibir, interpretar y decidir en tiempo real. Actualmente se presentan avances en seis áreas estratégicas: fitosanidad, riego, producción animal, maquinaria, cosecha-poscosecha y gestión-modelado. Dichos avances muestran una reducción de consumo hídrico del 20–40%, menor uso de agroquímicos de hasta el 70% y pérdidas poscosecha menores al 40%. Sin embargo, la falta de interoperabilidad, la concentración de datos y las brechas de conectividad limitan su escalabilidad. Se observa que el potencial transformador de estas tecnologías solo se materializará cuando las dimensiones cognitivas y operativas avancen de manera articulada con la sistémica, respaldadas por marcos regulatorios y políticas inclusivas que aseguren acceso equitativo y sostenible.

Keywords
Digital agriculture
Intelligent automation
Artificial intelligence
Agricultural robotics
Agricultural sustainability

ABSTRACT

Contemporary agriculture faces sustainability challenges, limited labor availability, growing food demand, and climate variability. In this context, intelligent automation is emerging as a paradigm that integrates sensors, robotics, the Internet of Things (IoT), data science, and artificial intelligence to perceive, interpret, and make decisions in real time. Advances are currently being made in six strategic areas: plant health, irrigation, animal production, machinery, harvest-postharvest, and management-modeling. These advances show a 20–40% reduction in water consumption, up to a 70% reduction in agrochemical use, and post-harvest losses of less than 40%. However, lack of interoperability, data concentration, and connectivity gaps limit their scalability. It is noted that the transformative potential of these technologies will only be realized when the cognitive and operational dimensions advance in coordination with the systemic dimensions, supported by inclusive regulatory frameworks and policies that ensure equitable and sustainable access.

[1]Maestría en Ingeniería. Ingeniería de Biosistemas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. afhiguerav@unal.edu.co – ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8959-2407
[2]Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. jhcamachot@unal.edu.co – ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7066-369X; olgarcian@unal.edu.co – ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5075-460X
*Correponding author: afhiguerav@unal.edu.co

Históricamente, la agricultura está ligada a procesos de mecanización orientados a mejorar el uso de la fuerza humana y animal, desde las herramientas rudimentarias hasta la maquinaria pesada del siglo XX. Esta denominada "automatización básica", centrada en la repetición rígida de tareas físicas, permitió aumentar la productividad, pero hoy resulta insuficiente frente a los desafíos contemporáneos del sector agroalimentario y a una población mundial creciente.

En el contexto actual, la producción agrícola enfrenta presiones convergentes: la necesidad de reducir la huella ambiental asociada a la emisión de gases de efecto invernadero, la degradación de suelos y la pérdida de biodiversidad, la creciente escasez de mano de obra calificada y no calificada, así como un entorno climático caracterizado por eventos extremos e impredecibles que alteran los ciclos productivos y aumentan los riesgos de plagas y enfermedades. Paralelamente, el crecimiento demográfico y los cambios en los patrones de consumo aumentan la demanda de alimentos e insumos agroindustriales, lo cual obliga a desarrollar la producción sin expandir la frontera agrícola, preservando ecosistemas naturales.

Ante este escenario, surge la automatización inteligente como un paradigma transformador que integra sensores de alta precisión, visión artificial, Internet de las Cosas (IoT), ciencia de datos e inteligencia artificial en plataformas tecnológicas agrícolas avanzadas. A diferencia de la mecanización tradicional, estos sistemas no solo ejecutan tareas, sino que perciben, procesan e interpretan información compleja en tiempo real, toman decisiones prescriptivas y ejecutan acciones adaptativas mediante robots, drones o maquinaria autónoma (Aarif et al. 2025; Tyagi et al. 2024).

Trabajos realizados en la última década destacan su aplicación en áreas estratégicas como la fitosanida (Tyagi et al. 2024; Vijayakumar et al. 2023), el riego inteligente (Ahmed et al. 2024; Liang et al. 2020), la producción animal de precisión (Ramil Brick et al. 2022; Wang et al. 2023), la maquinaria agrícola inteligente (Khan et al. 2018; Mazuryk et al. 2023), y la gestión poscosecha (Adli et al. 2023; Wang et al. 2024), presentando reducciones de hasta un 70% en uso de agroquímicos, mejoras entre el 20 y 40% en eficiencia hídrica y disminución del 40% en pérdidas poscosecha. Sin embargo, persisten limitaciones asociadas a la interoperabilidad tecnológica, la escalabilidad de las soluciones, la conectividad en territorios rurales y la gobernanza de datos (Amiri-Zarandi et al. 2022; Hosny et al. 2025; Muhammed et al. 2024).

En este marco, la tesis central sostiene que la automatización inteligente en agricultura debe concebirse como un fenómeno cognitivo, sistémico y operativo. Cognitivo, porque implica percepción avanzada, razonamiento contextual y aprendizaje continuo; sistémico, porque su escalabilidad depende de la integración sinérgica de tecnologías convergentes y de su alineación con los procesos biológicos, económicos, sociales y ambientales que configuran el agro contemporáneo; y operativo, porque su valor real se concreta en la viabilidad de aplicación práctica en campo, lo que exige adaptabilidad a condiciones locales, robustez frente a variabilidad ambiental, eficiencia en costos y aceptación sociocultural de las innovaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se concibió como una revisión sistemática y crítica de trabajos científicos realizados en los últimos 5 años, centrada en la automatización inteligente en la agricultura. Para garantizar transparencia y rigor, se siguió la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que estructuró el proceso en cuatro fases: identificación, depuración, selección e inclusión. La búsqueda se realizó exclusivamente en la base de *Scopus*, considerando filtros para limitar los resultados a artículos de revisión publicados en revistas indexadas, en estado final de publicación, en inglés y en acceso abierto, lo que aseguró pertinencia, actualidad y calidad científica.

El diseño de las ecuaciones de búsqueda fue un componente esencial, pues permitió recuperar literatura diversa sin sesgos hacia una sola tecnología. Se combinaron términos generales como *automation*, *smart agriculture* e *intelligent systems* con descriptores específicos de cada área temática. En detección y diagnóstico se incluyeron expresiones como *diagnosis*, *detection*, *classification* y *early warning*; en riego y gestión del agua, *smart irrigation*, *precision irrigation* y *soil moisture sensing*; en producción animal de precisión, *precision livestock farming*, *wearables*, *machine vision* y *real-*

time monitoring; en cosecha y poscosecha, *harvesting*, *postharvest handling* y *robotic harvesting*; en gestión, producción y modelado, *predictive modeling*, *forecasting* y *decision support systems*; y en maquinaria agrícola y robótica, descriptores como *agricultural robotics*, *autonomous machinery*, *robotic vehicles* y *AI-based farming equipment*, junto a tecnologías de percepción avanzada como *computer vision* y *hyperspectral sensing*. Para asegurar reproducibilidad, las ecuaciones y enlaces a *Scopus* se registraron en un anexo metodológico.

Durante la depuración se eliminaron duplicados y publicaciones irrelevantes, reduciendo el conjunto inicial de 225 reportes a 143 artículos potencialmente elegibles. En la etapa de selección se revisaron resúmenes y palabras clave, quedando 79 textos pertinentes. Finalmente, en la inclusión se consideraron 56 artículos que cumplían de forma estricta los criterios metodológicos. Todos fueron revisados íntegramente para extraer información sólida y comparable, lo que permitió pasar del registro individual a la construcción de un panorama global. Este enfoque facilitó la identificación de tendencias, patrones y tensiones en cada área temática, ofreciendo un escenario representativo que fortaleció la discusión comparativa.
La síntesis buscó reconocer convergencias e innovaciones, más allá de un inventario de resultados o de revisión bibliográfica, así como limitaciones recurrentes vinculadas con interoperabilidad, escalabilidad y gobernanza de datos. De este modo, fue posible comprender la automatización inteligente no como un conjunto fragmentado de soluciones, sino como un campo en transformación que articula promesas de sostenibilidad con riesgos de exclusión y dependencia tecnológica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión de los artículos seleccionados confirmó que la automatización inteligente en la agricultura se configura como un proceso en el que confluyen dimensiones cognitivas, operativas y sistémicas, trascendiendo la mecanización convencional para incorporar percepción avanzada, razonamiento contextual y aprendizaje continuo. Esta tríada permite comprender los hallazgos de manera integral y articular los beneficios y limitaciones reportados en cada área temática.

En detección y diagnóstico de plagas, enfermedades y malezas se identificaron avances en sensórica de alta precisión y visión computacional, como los biosensores y nanosensores descritos por Tyagi et al. (2024), capaces de anticipar síntomas con 48 - 72 horas de antelación. Complementariamente, Juárez y Kurouski (2024) validaron espectroscopía vibracional no destructiva con una precisión del 89% en diagnóstico temprano de estrés hídrico. Estos aportes reflejan la dimensión cognitiva, en la que las tecnologías no solo perciben, sino que interpretan señales fisiológicas. Sin embargo, en lo operativo, los estudios evidencian caídas de hasta un 30% en robustez bajo condiciones reales de campo, y en la dimensión sistémica, Basak et al. (2023) y Restrepo-Arias et al. (2024) mostraron que la falta de estandarización en protocolos genera tasas de fallo entre el 35 y el 70% en entornos heterogéneos.

En riego y gestión del agua, Ahmed et al. (2024) encontraron que redes de sensores edáficos reducen procesos de lixiviación en un 40%, mientras Hashim et al. (2024) alcanzaron ahorros de agua entre un 20 y 35% en arroz mediante riego intermitente automatizado. Cognitivamente, estas plataformas integran hasta 15 variables para generar recomendaciones prescriptivas (Jha et al. 2022)); operativamente, reducen tiempos de respuesta en un 70%, aunque Chamara et al. (2022) observaron que solo un 30% de los prototipos superan pruebas en suelos rurales desfavorables. Sistémicamente, Pang et al. (2023) y Hosny et al. (2025) destacan la necesidad de políticas de interoperabilidad y gobernanza para superar las limitaciones de conectividad y dependencia de plataformas privadas.

En producción animal de precisión, Wang et al. (2023) demostraron que la visión 3D logra precisiones superiores al 90% en la detección de lesiones, mientras Pesenti et al. (2024) establecieron índices holísticos de bienestar animal reduciendo falsos positivos en un 40%. Cognitivamente, los algoritmos permiten correlacionar variables fisiológicas y comportamentales, y en lo operativo, Tzanidakis et al. (2023) mostraron incrementos del 25% en eficiencia alimentaria. No obstante, Li et al. (2022) y Džermeikaitė et al. (2023) evidenciaron que hasta un 60% de pequeños productores carece de conectividad mínima, y Arshad et al. (2024) documentaron que el 75% de las plataformas comerciales concentran la propiedad de datos, lo que plantea un desafío sistémico de inequidad y dependencia.

En maquinaria agrícola y robótica, Khan et al. (2018) reportaron que sensores hiperespectrales identifican estrés vegetal con un 92% de precisión, mientras Centorame et al. (2024) demostraron reducciones de insumos del 30% en girasol gracias a maquinaria adaptativa. Operativamente, los tractores autónomos y robots cosechadores incrementan la eficiencia entre un 20 y 35%, aunque Zhang et al. (2021) subrayaron la brecha entre generación de datos y aplicación práctica en el 60% de los casos. Sistémicamente, Pandey y Mishra (2024) y Agrawal y Arafat (2024) coinciden en que la interoperabilidad limitada y los vacíos regulatorios sobre autonomía y responsabilidad, restringen la implementación masiva de estas tecnologías.

En cosecha y poscosecha, Soussi et al. (2024) documentaron reducciones del 25% en pérdidas mediante monitoreo con espectroscopía óptica e IA, mientras Adli et al. (2023) mostraron que redes AIoT anticipan deterioro con un 85% de precisión, reduciendo pérdidas en un 40%. Cognitivamente, los clasificadores permiten inferir calidad interna sin daños mecánicos. En lo operativo, robots y vehículos autónomos mejoran la logística en un 30% (Padhiary et al. 2024)), aunque Kaleem et al. (2023) señalan problemas de precisión (<80%) en ambientes complejos. Sistémicamente, Mabhaudhi et al. (2025) y Kapari et al. (2023) señalan que los requerimientos de conectividad y costos excluyen a pequeños agricultores en más del 65% de los casos.

En gestión, producción y modelamiento agrícola, Alahmad et al. (2023) lograron un 89% de precisión en predicción de rendimientos con big data, mientras Gamage et al. (2024) anticiparon estrés biótico con 72 horas de antelación. Cognitivamente, estas herramientas marcan un salto hacia la planificación predictiva. En lo operativo, Soussi et al. (2024) validaron sensores que optimizan bioquímica edáfica con un 92% de precisión. No obstante, Amiri-Zarandi et al. (2022) y Qazi et al. (2022) mostraron que un 40% de plataformas comerciales utiliza protocolos cerrados que limitan la integración. Lubag et al.(2023) indican que 60% de pequeños productores carecen de capacidad técnica para adoptar gemelos digitales, marcando una brecha sistémica. En síntesis, los resultados confirman que la automatización inteligente aporta beneficios tangibles en sostenibilidad, eficiencia hídrica, reducción de agroquímicos y disminución de pérdidas poscosecha, pero también revelan una paradoja estructural: la madurez técnica cognitiva y operativa contrasta con barreras sistémicas de interoperabilidad, conectividad y gobernanza de datos. El potencial de estas tecnologías solo se materializará cuando estas tres dimensiones avancen sistemáticamente, a partir de estándares abiertos, políticas inclusivas y marcos regulatorios, para democratizar sus beneficios en el agro contemporáneo.

CONCLUSIÓN

La revisión sistemática permitió establecer que la automatización inteligente en la agricultura establece un eje valioso para resolver desafíos contemporáneos de sostenibilidad, productividad y resiliencia. Se evidenció que las soluciones actuales trascienden la mecanización básica para integrar dimensiones cognitivas, operativas y sistémicas. En lo cognitivo, las tecnologías avanzan hacia la percepción multimodal, el razonamiento contextual y el aprendizaje continuo, habilitando diagnósticos tempranos, recomendaciones prescriptivas y pronósticos fiables. En lo operativo, se observan beneficios claros como la reducción del consumo hídrico, la disminución del uso de agroquímicos, mejoras en la eficiencia alimentaria y una reducción de pérdidas poscosecha. Estos datos validan un claro impacto en la sostenibilidad y eficiencia de sistemas productivos, aunque también se verificó que el desempeño operativo tiende a decrecer en condiciones de campo respecto a los resultados de laboratorio.

En la dimensión sistémica se identificaron las principales dificultades cono la falta de interoperabilidad entre plataformas, concentración de datos en manos de actores privados, dependencia de infraestructura de conectividad y ausencia de marcos regulatorios sólidos. Estas limitaciones ponen en riesgo la democratización de los beneficios y acentúan brechas entre productores. En síntesis, la paradoja estructural observada radica en que, mientras las dimensiones cognitivas y operativas muestran niveles de madurez significativos, la dimensión sistémica avanza con mayor lentitud, condicionando la escalabilidad y equidad en la adopción. El verdadero potencial de la automatización inteligente solo se materializará si las tres dimensiones progresan de manera articulada y se respaldan con estándares abiertos, políticas inclusivas y estrategias de formación que garanticen acceso equitativo y sostenible.

REFERENCIAS

Aarif K. O., M., Alam, A., & Hotak, Y. (2025). Smart Sensor Technologies Shaping the Future of Precision Agriculture: Recent Advances and Future Outlooks. *Journal of Sensors*, *2025*(1). https://doi.org/10.1155/js/2460098

Adli, H. K., Remli, M. A., Wan Salihin Wong, K. N. S., Ismail, N. A., González-Briones, A., Corchado, J. M., & Mohamad, M. S. (2023). Recent Advancements and Challenges of AIoT Application in Smart Agriculture: A Review. *Sensors*, *23*(7). https://doi.org/10.3390/s23073752

Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). Transforming Farming: A Review of AI-Powered UAV Technologies in Precision Agriculture. *Drones*, *8*(11). https://doi.org/10.3390/drones8110664

Ahmed, N., Zhang, B., Deng, L., Bozdar, B., Li, J., Chachar, S., Chachar, Z., Jahan, I., Talpur, A., Gishkori, M. S., Hayat, F., & Tu, P. (2024). Advancing horizons in vegetable cultivation: a journey from ageold practices to high-tech greenhouse cultivation—a review. *Frontiers in Plant Science*, *15*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1357153

Alahmad, T., Neményi, M., & Nyéki, A. (2023). Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review. *Agronomy*, *13*(10). https://doi.org/10.3390/agronomy13102603

Amiri-Zarandi, M., Fard, M. H., Yousefinaghani, S., Kaviani, M., & Dara, R. (2022). A Platform Approach to Smart Farm Information Processing. *Agriculture (Switzerland)*, *12*(6). https://doi.org/10.3390/agriculture12060838

Arshad, M. F., Burrai, G. P., Varcasia, A., Sini, M. F., Ahmed, F., Lai, G., Polinas, M., Antuofermo, E., Tamponi, C., Cocco, R., Corda, A., & Parpaglia, M. L. P. (2024). The groundbreaking impact of digitalization and artificial intelligence in sheep farming. *Research in Veterinary Science*, *170*. https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2024.105197

Centorame, L., Ilari, A., Del Gatto, A., & Foppa Pedretti, E. (2024). A systematic review on precision agriculture applied to sunflowers, the role of hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, *222*, 109097. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109097

Chamara, N., Islam, M. D., Bai, G. F., Shi, Y., & Ge, Y. (2022). Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future. *Agricultural Systems*, *203*. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103497

Džermeikaitė, K., Bačėninaitė, D., & Antanaitis, R. (2023). Innovations in Cattle Farming: Application of Innovative Technologies and Sensors in the Diagnosis of Diseases. *Animals*, *13*(5). https://doi.org/10.3390/ani13050780

Gamage, A., Gangahagedara, R., Subasinghe, S., Gamage, J., Guruge, C., Senaratne, S., Randika, T., Rathnayake, C., Hameed, Z., Madhujith, T., & Merah, O. (2024). Advancing sustainability: The impact of emerging technologies in agriculture. *Current Plant Biology*, *40*. https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100420

Hashim, N., Ali, M. M., Mahadi, M. R., Abdullah, A. F., Wayayok, A., Mohd Kassim, M. S., & Jamaluddin, A. (2024). Smart Farming for Sustainable Rice Production: An Insight into Application, Challenge, and Future Prospect. *Rice Science*, *31*(1), 47–61. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.004

Hosny, K. M., El-Hady, W. M., & Samy, F. M. (2025). Technologies, Protocols, and applications of Internet of Things in greenhouse Farming: A survey of recent advances. *Information Processing in Agriculture*, *12*(1), 91–111. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2024.04.002

Jha, G., Nicolas, F., Schmidt, R., Suvočarev, K., Diaz, D., Kisekka, I., Scow, K., & Nocco, M. A. (2022). Irrigation Decision Support Systems (IDSS) for California's Water–Nutrient–Energy Nexus. *Agronomy*, *12*(8). https://doi.org/10.3390/agronomy12081962

Juárez, I. D., & Kurouski, D. (2024). Contemporary applications of vibrational spectroscopy in plant stresses and phenotyping. *Frontiers in Plant Science*, *15*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1411859

Kaleem, A., Hussain, S., Aqib, M., Cheema, M. J. M., Saleem, S. R., & Farooq, U. (2023). Development Challenges of Fruit-Harvesting Robotic Arms: A Critical Review. *AgriEngineering*, *5*(4), 2216–2237. https://doi.org/10.3390/agriengineering5040136

Kapari, M., Hlophe-Ginindza, S., Nhamo, L., & Mpandeli, S. (2023). Contribution of smallholder farmers to food security and opportunities for resilient farming systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1149854

Khan, M. J., Khan, H. S., Yousaf, A., Khurshid, K., & Abbas, A. (2018). Modern Trends in Hyperspectral Image Analysis: A Review. *IEEE Access*, *6*, 14118–14129. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2812999

Li, J., Green-Miller, A. R., Hu, X., Lucic, A., Mahesh Mohan, M. R., Dilger, R. N., Condotta, I. C. F. S., Aldridge, B., Hart, J. M., & Ahuja, N. (2022). Barriers to computer vision applications in pig production facilities. *Computers and Electronics in Agriculture*, *200*. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107227

Liang, Z., Liu, X., Xiong, J., & Xiao, J. (2020). Water allocation and integrative management of precision irrigation: A systematic review. *Water (Switzerland)*, *12*(11), 1–23. https://doi.org/10.3390/w12113135

Lubag, M., Bonifacio, J., Tan, J. M., Concepcion, R., Mababangloob, G. R., Galang, J. G., & Maniquiz-Redillas, M. (2023). Diversified Impacts of Enabling a Technology-Intensified Agricultural Supply Chain on the Quality of Life in Hinterland Communities. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(17). https://doi.org/10.3390/su151712809

Mabhaudhi, T., Dirwai, T. L., Taguta, C., Senzanje, A., Abera, W., Govid, A., Dossou-Yovo, E. R., Aynekulu, E., & Petrova Chimonyo, V. G. (2025). Linking weather and climate information services (WCIS) to Climate-Smart Agriculture (CSA) practices. *Climate Services*, *37*. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100529

Mazuryk, J., Klepacka, K., Kutner, W., & Sharma, P. S. (2023). Glyphosate Separating and Sensing for Precision Agriculture and Environmental Protection in the Era of Smart Materials. *Environmental Science and Technology*, *57*(27), 9898–9924. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01269

Muhammed, D., Ahvar, E., Ahvar, S., Trocan, M., Montpetit, M.-J., & Ehsani, R. (2024). Artificial Intelligence of Things (AIoT) for smart agriculture: A review of architectures, technologies and solutions. *Journal of Network and Computer Applications*, *228*. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103905

Padhiary, M., Saha, D., Kumar, R., Sethi, L. N., & Kumar, A. (2024). Enhancing precision agriculture: A comprehensive review of machine learning and AI vision applications in all-terrain vehicle for farm automation. *Smart Agricultural Technology*, *8*. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100483

Pandey, D. K., & Mishra, R. (2024). Towards sustainable agriculture: Harnessing AI for global food security. *Artificial Intelligence in Agriculture*, *12*, 72–84. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.04.003

Pang, Y., Marinello, F., Tang, P., Li, H., & Liang, Q. (2023). Bibliometric Analysis of Trends in Smart Irrigation for Smart

Agriculture. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(23). https://doi.org/10.3390/su152316420

Pesenti Rossi, G., Dalla Costa, E., Barbieri, S., Minero, M., & Canali, E. (2024). A systematic review on the application of precision livestock farming technologies to detect lying, rest and sleep behavior in dairy calves. *Frontiers in Veterinary Science*, *11*. https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1477731

Qazi, S., Khawaja, B. A., & Farooq, Q. U. (2022). IoT-Equipped and AI-Enabled Next Generation Smart Agriculture: A Critical Review, Current Challenges and Future Trends. *IEEE Access*, *10*, 21219–21235. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3152544

Ramil Brick, E. S., Holland, J., Anagnostou, D. E., Brown, K., & Desmulliez, M. P. Y. (2022). A review of agroforestry, precision agriculture, and precision livestock farming—The case for a data-driven agroforestry strategy. *Frontiers in Sensors*, *3*. https://doi.org/10.3389/fsens.2022.998928

Restrepo-Arias, J. F., Branch-Bedoya, J. W., & Awad, G. (2024). Image classification on smart agriculture platforms: Systematic literature review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, *13*, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.06.002

Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trinchero, D., & Fossa, M. (2024). Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, *24*(8). https://doi.org/10.3390/s24082647

Tyagi, A., Mir, Z. A., & Ali, S. (2024). Revisiting the Role of Sensors for Shaping Plant Research: Applications and Future Perspectives. *Sensors*, *24*(11). https://doi.org/10.3390/s24113261

Tzanidakis, C., Tzamaloukas, O., Simitzis, P., & Panagakis, P. (2023). Precision Livestock Farming Applications (PLF) for Grazing Animals. *Agriculture (Switzerland)*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/agriculture13020288

Vijayakumar, V., Ampatzidis, Y., Schueller, J. K., & Burks, T. (2023). Smart spraying technologies for precision weed management: A review. *Smart Agricultural Technology*, *6*. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100337

Wang, D., Zhang, M., Jiang, Q., & Mujumdar, A. S. (2024). Intelligent System/Equipment for Quality Deterioration Detection of Fresh Food: Recent Advances and Application. *Foods*, *13*(11). https://doi.org/10.3390/foods13111662

Wang, Y., Mücher, S., Wang, W., Guo, L., & Kooistra, L. (2023). A review of three-dimensional computer vision used in precision livestock farming for cattle growth management. *Computers and Electronics in Agriculture*, *206*. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107687

Zhang, C., Valente, J., Kooistra, L., Guo, L., & Wang, W. (2021). Orchard management with small unmanned aerial vehicles: a survey of sensing and analysis approaches. *Precision Agriculture*, *22*(6), 2007–2052. https://doi.org/10.1007/s11119-021-09813-y

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Desarrollo de productos agroindustriales a partir de la auyama (*Cucurbita maxima*) para fortalecer la competitividad de la cadena

Development of agro-industrial products from pumpkin (*Cucurbita maxima*) to strengthen the competitiveness of the chain

Carlos Julio Márquez Cardozo[1*] and Héctor José Ciro Velásquez[1]

Palabras clave:
Alimentos
Calabaza
Hortalizas postcosecha
Vegetales

RESUMEN

En la actualidad, se reconoce la importancia socioeconómica de los cultivos de auyama (*Cucurbita maxima*) para los productores a nivel nacional e internacional, debido a que está catalogado como un producto promisorio. Constituye una hortaliza de tipo no climatérica que posee un buen aporte nutricional y su cultivo es muy extendido dado que puede crecer en diferentes condiciones climáticas. Sin embargo, el aprovechamiento agroindustrial de este producto en Colombia no es muy amplio, por lo tanto, se convierte en una alternativa de gran importancia para potenciar el desarrollo de la cadena. La presente investigación presenta algunas de las principales transformaciones agroindustriales a partir del aprovechamiento integral de la auyama con la finalidad de generar valor agregado en la cadena productiva. Se recopila la evaluación en poscosecha de la especie Cucúrbita máxima cultivada en el departamento de Antioquia (Colombia), Municipio de Dabeiba, Se ralizó la caracterización fisicoquímica del fruto en poscosecha y la obtención de harina para ser adicionada en matrices alimentarias cárnicas, lácteas y de panificación. La aplicación de estos procesos permiten obtener productos que pueden ser escalados a nivel industrial, en pequeñas, medianas y grandes empresas, del sector público y privado.

Keywords:
Food chain
Pumpkin
Post-harvest
Vegetables

ABSTRACT

Currently, the socioeconomic importance of pumpkin (*Cucurbita maxima*) crops is recognized by producers at the national and international levels, as it is classified as a promising product. It is a non-climacteric vegetable with good nutritional value, and its cultivation is widespread because it can grow in different climatic conditions. However, the agro-industrial use of this product in Colombia is not very widespread, therefore, it becomes an alternative of great importance to enhance the development of the chain. This research presents some of the main agro-industrial transformations based on the comprehensive use of auyama with the aim of generating added value in the production chain. The post-harvest evaluation of the Cucurbita maxima species grown in the department of Antioquia (Colombia), Municipality of Dabeiba, was compiled. The physicochemical characterization of the fruit was carried out post-harvest and flour was obtained to be added to meat, dairy, and bakery food matrices. The application of these processes allows for the production of products that can be scaled up to an industrial level in small, medium, and large companies in the public and private sectors.

[1]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colomobia. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0106-6875;
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4398-0470
*Corresponding author: cjmarque@unal.edu.co

La auyama constituye desde la época de llegada de los españoles a América, una fuente de alimentación importante para la población colombiana, presentado una media de 46,3 gramos/día para el consumo por persona – año (Fao & MinSalud, 2013). En Colombia se reportan 10.172 ha de área cosechada, y una producción de 120.212 t, con un rendimiento promedio de 11,82 t por hectárea, se cultiva en la mayor parte del territorio nacional, y su producción es frecuente en cultivos de la economía campesina (Agronet, 2017).

La presencia de componentes bioactivos en la auyama y sus subproductos (cáscara y semillas) se ha estudiado recientemente, entre estos se encuentran compuestos con actividad antioxidante, como; carotenoides, compuestos fenólicos, además de proteínas, vitaminas, fibra dietaria y ácidos orgánicos. Se ha encontrado que esta hortaliza es rica en β-caroteno, que imparte color entre amarillo y naranja en su pulpa (Pazinato & Cardozo, 2019; Rezig *et al*., 2018, Durante *et al*., 2014; Shi *et al*., 2010; Kurz *et al*., 2008). En las semillas se reporta un alto valor nutricional en proteína (30 g/ 100 g), aceite (50 g/100 g), donde la mayor parte son componentes bioactivos como ácidos grasos poliinsaturados (78%) oleico y linoleico (Hernández *et al*., 2014). Además, los subproductos de la hortaliza son materias primas potenciales por las propiedades nutricionales y funcionales que poseen. El tejido del mesocarpio se ha utilizado como una matriz alimentaria para suplemento de hierro, y se considera como una materia prima prometedora para el desarrollo de productos de alimentos funcionales (De Escalada *et al*., 2013).

La transformación de la auyama en harina y la adición en otras matrices alimenticias permitiría agregar valor a esta hortaliza, fortaleciendo su potencial agroindustrial y generando un aporte en el desarrollo de productos con características sensoriales innovadoras que puedan ser escalados a nivel industrial para incursionar en el mercado de alimentos procesados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal: Auyamas cosechadas en huertos del municipio de Dabeiba, Antioquia, Colombia, localizado a una altitud media de 450 m.s.n.m. con temperatura promedio de 26°C, precipitación promedio anual de 3.161 mm y humedad relativa (HR) de 82%.

Obtención de la harina de pulpa de auyama: Láminas de pulpa de auyama de 5 mm ± 2, fueron sometidas a deshidratación forzada a 60°C por 9 horas con velocidad de aire a 3,7 m/s, luego a un proceso de molienda en un molino de martillos y tamizado con una malla 100 (0,149 mm). El equipo de secado fue un Memmert Universal Oven UF750 de 749 litros de capacidad. Proceso similar se realizó para la obtención de la harina de semillas de auyama.

Desarrollo de productos lácteos: Se construyeron los protocolos para la formulación y desarrollo de derivados lácteos con incorporación de auyama; leches saborizadas, yogures y postres.

Desarrollo de productos cárnicos: Se incorporó auyama como sustituto de grasa, en la formulación y desarrollo de salchichas tipo Frankfurt y chorizos tipo antioqueños.

Alimentos deshidratados, esterilizados y asados con incorporación de auyama: Se elaboraron laminas deshidratadas de auyama con incorporación de pulpa de mango con incorporación de pectina como agente hidrocoloide. También se elaboraron conservas esterilizadas con almibar como líquido de cobertura de 35 grados brix. Igualmente se asaron arepas de maíz adicionando 15% de harina de auyama como sustituto de la harina de maíz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

LaTabla 1 presenta los resultados de las características sensoriales, físicas y físicoquímicas del material vegetal utilizado en la investigación.

La Figura 1 presenta el flujograma del proceso para la obtención de harina de auyama por deshidratación por convección forzada. Producto que fue utilizado en el desarrollo de diversos de alimentos, tanto de origen lácteo, de panificación, asados y horneados. Ademas la pulpa como tal se utilizo en laminas estructuradas con hidrocoloides y con la participación de otras frutas.

Tabla 1. Características de las auyamas (*Cucurbita maxima*) utilizadas.

Apariencia	
Color	Cáscara verde oscura y pulpa anaranjada
Olor y Sabor	Característico a la hortalizas
Especificaciones físicas	
Peso promedio comercial (g)	2782 ± 0,03
Volumen (mL)	2250 ± 0,5
Densidad (g/mL)	1,237
Rendimiento pulpa %	90,665 ± 17,851
Dimensiones polar – ecuatorial (cm)	15,30 ± 0,1 - 21,10 ± 0,1
Número de semilla	278 ± 30
Tasa de respiración (mg*CO_2/kg*h)	11
Especificaciones fisicoquímicas	
humedad (%)	92,63 ± 2,19
aw	0,959 ± 0,004
pH	5,927 ± 0,292
°Brix	3,767 ± 0,728
% de acidez	0,038 ± 0,003
Firmeza con cáscara(N)	93,297 ± 5,854
Firmeza pulpa (N)	80,621 ± 6,527



Figura 1. Flujograma del proceso para la obtención de harina de auyama (*Cucurbita maxima*)

CONCLUSIÓN

La auyama es un fruto no climatérico, relativamente económico, de consumo masivo en Colombia y en el mundo, muy importante por su gran aporte nutricional y funcional, que permite ser transformado en harina por deshidratación forzada para ser incorporado en diversas matrices alimenticias de origen lácteo, cárnico, de panificación y alimentos asados, entre otros para potenciar su consumo y posibilitar el desarrollo agroindustrial de la cadena.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Frutas y Hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo de la presente investigación.

REFERENCIAS

Agronet. 2017. Área sembrada, área cosechada en el cultivo de ahuyama, 2007- 2017. Bogotá, Colombia.

De Escalada, M., Campos, C., Gerschenson, L., Rojas, A. 2009. Pumpkin (Cucurbita moschata, Duchesne ex poiret) mesocarp tissue as a food matrix for supporting iron in a food product. Journal of Food Engineering, 92, 361–369.

Durante, M., Lenucci, M. S., & Mita, G. 2014. Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Carotenoids from Pumpkin (Cucurbita spp .): A Review, (1), 6725–6740.

Fao, & MinSalud. 2013. Perfil nacional de consumo de frutas y verduras. Fao.

Hernandez, B., Martínez, E., Gordilllo, A., Castro, J., Gómez, C., Herman, E., & Rodríguez, J. 2014. Potencial nutricional de la semilla de calabaza (Cucurbita pepo). Los Alimentos En México y Su Relación Con La Salud, (November 2016).

Kurz, C., Carle, R., & Schieber, A. (2008). HPLC-DAD-MS n characterisation of carotenoids from apricots and pumpkins for the evaluation of fruit product authenticity, 110, 522–530.

Pazinato, R., & Cardozo-filho, L. 2019. Fluids Simultaneous extraction of seed oil and active compounds from peel of pumpkin (Cucurbita maxima) using pressurized carbon dioxide as solvent. The Journal of Supercritical Fluids, 143(July 2018), 8–15.

Rezig, L., Chouaibi, M., Ojeda-amador, R. M., Gomez-alonso, S., Salvador, M. D., Fregapane, G., & Hamdi, S. 2018. Cucurbita maxima Pumpkin Seed Oil : from the Chemical Properties to the Different Extracting Techniques, 46(2), 663–669.

Shi, J., Yi, C., Ye, X., Xue, S., Jiang, Y., Ma, Y., & Liu, D. 2010. Effects of supercritical CO_2 fluid parameters on chemical composition and yield of carotenoids extracted from pumpkin. LWT - Food Science and Technology, 43(1), 39–44.

RESÚMENES

EJE TEMÁTICO 1
Desarrollo rural y seguridad alimentaria



http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Calidad Nutricional y productividad del frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris*) bajo fertilización orgánica y química en el norte del Valle del Cauca

Nutritional quality and productivity of bush beans (*Phaseolus vulgaris*) under organic and chemical fertilization in northern Valle del Cauca

Alejandra Gutierrez Amaya[1]*, Diego Fernando Castro Vargas[1]*, Esteban Largo-Avila[2], Saul Ruiz-Cruz[2] and Yessica Tatiana Ojeda Valencia[1]

Palabras clave:
Compost de cáscara de café
Frijol arbustivo
Fertilización orgánica
Fertilización química
Humus de cáscara de café
Proteína
Sostenibilidad agrícola

RESUMEN

El presente estudio evaluó la influencia de diferentes fuentes de fertilización, tanto orgánicas como químicas, en la variedad de frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris*) conocida como Nima, con el objetivo de analizar sus efectos sobre la producción y el contenido de proteína del grano. El ensayo se desarrolló en campo bajo un diseño experimental completamente al azar, con cuatro tratamientos y tres repeticiones: control, fertilización quimica, compost de cáscara de café y humus de cáscara de café. Posteriormente, se realizaron análisis en laboratorio para determinar la productividad y el contenido proteico. Los resultados mostraron que, en términos de proteína, los tratamientos orgánicos superaron tanto al control como al fertilizante químico. El compost de cáscara de café registró 23,80% mientras que el humus de cáscara de café alcanzó 24,68%, frente al 22,77% del testigo y 22,76% del tratamiento químico. En cuanto a la producción, el compost de cáscara de café presentó el mayor rendimiento con 883,99 g, seguido del fertilizante químico con 819,17 g y finalmente el humus de cáscara de café con 729,7 y 371,43 correspondiente al control. Se concluye que el uso de fertilizantes orgánicos provenientes de subproductos agrícolas constituye una alternativa sostenible para mantener la productividad, mejorar la calidad del grano, reducir costos de producción y, a su vez, disminuir la dependencia de insumos químicos y el impacto ambiental.

Keywords:
Coffee husk compost
Bush beans
Organic fertilization
Chemical fertilization
Coffee husk humus
Protein
Agricultural sustainability

ABSTRACT

This study evaluated the influence of different sources of fertilization, both organic and chemical, on the bush bean variety (*Phaseolus vulgaris*) known as Nima, with the aim of analyzing their effects on grain production and protein content. The trial was conducted in the field under a completely randomized experimental design, with four treatments and three replicates: control, chemical fertilization, coffee husk compost, and coffee husk humus. Subsequently, laboratory analyses were performed to determine productivity and protein content.The results showed that, in terms of protein, the organic treatments outperformed both the control and the chemical fertilizer. Coffee husk compost registered 23.80%, while coffee husk humus reached 24.68%, compared to 22.77% for the control and 22.76% for the chemical treatment. In terms of production, coffee husk compost had the highest yield with 883.99 g, followed by chemical fertilizer with 819.17 g, and finally coffee husk humus with 729.7 g and 371.43 g for the control. It is concluded that the use of organic fertilizers from agricultural by-products is a sustainable alternative for maintaining productivity, improving bean quality, reducing production costs, and, in turn, decreasing dependence on chemical inputs and environmental impact.

[1]Universidad del Valle, Regional Eje Cafetero, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5729-666X; https://orcid.org/0009-0001-2229-9563; https://orcid.org/0000-0001-6047-1523.
[2]Universidad de Sonora: Hermosillo, Sonora, MX ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7125-8952
*Corresponding author: alejandra.gutierrez.amaya@correounivalle.edu.co; castro.diego@correounivalle.edu.co

CC BY NC SA

El frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris*) es un cultivo de gran importancia en Colombia, pero su producción depende en gran medida de fertilizantes químicos importados, lo que aumenta costos e impactos ambientales. Como alternativa, se plantea el uso de fertilizantes orgánicos derivados de subproductos agrícolas, como la cáscara de café, que pueden mejorar la fertilidad del suelo, reducir residuos y potenciar la calidad nutracéutica del grano. En este contexto, la investigación busca evaluar el efecto de fuentes de fertilización orgánicas y químicas sobre el rendimiento y la capacidad antioxidante del frijol arbustivo, bajo la hipótesis de que los abonos orgánicos son una opción sostenible que mantiene la productividad y mejora la calidad funcional del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en Caicedonia, Valle del Cauca, en las instalaciones de la Universidad del Valle, con apoyo de laboratorios de la Seccional Zarzal y Hermosillo (Sonora, México). El cultivo evaluado fue frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris*, variedad Nima).

Se empleó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos de fertilización y tres repeticiones: T0: Control (sin fertilización), T1: Fertilización química (Triple 15), T2: Fertilización orgánica sólida (compost de cáscara de café) y T3: Fertilización orgánica líquida (humus líquido de cáscara de café). El seguimiento se efectuó durante ocho semanas en 30 plantas seleccionadas al azar por tratamiento, registrando en una tabla de Excel el número de hojas, altura, diámetro del tallo y para la produción en cada tratamiento se tomaron 50 plantas en total al momento de cosechar. Para el análisis de proteína, se pesaron 100 mg de muestra y se utilizó la metodología de Kjeldahl con catalizador y solución digestora hasta obtener una mezcla clara. Posteriormente, la muestra se enfrió, se diluyó con agua destilada y se destiló en presencia de ácido bórico con indicador, tras alcalinizar con NaOH al 40%. La destilación se mantuvo hasta el viraje del indicador y finalmente se enjuagó el sistema con agua destilada para eliminar residuos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra que los tratamientos T1, T2 y T3 promovieron un mayor desarrollo foliar respecto al control (T0). T1 alcanzó el máximo número de hojas en la semana 5, T3 mantuvo un crecimiento sostenido hasta la semana 7 y T2 tuvo un desempeño intermedio. En cambio, T0 presentó el menor número de hojas. Este aumento en el área foliar sugiere una mayor capacidad fotosintética y potencial productivo. Estos hallazgos son consistentes con lo señalado por Ayala & Cabrales (2020). quienes en su investigación demostraron que los tratamientos de origen orgánico promovieron un incremento significativo en la producción de hojas, en comparación con otros manejos de fertilización.

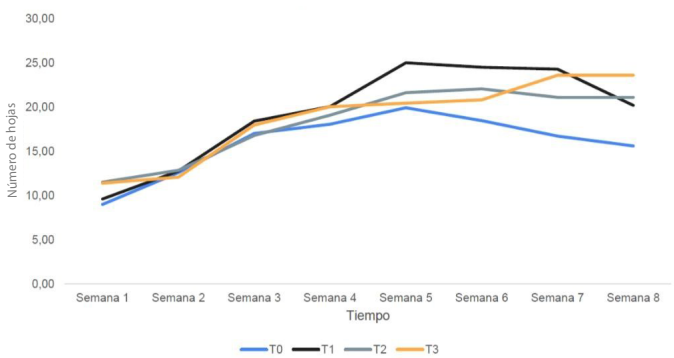


Figura 1. Número de hojas promedio / semana.

En la Figura 2 se observa que el T1 alcanzó la mayor altura (68 cm en la sexta semana), seguido de T3 con crecimiento sostenido hasta la octava semana. T2 mostró un desempeño intermedio, mientras que el control (T0) registró el menor crecimiento (61 cm). En términos generales, T1 y T3 fueron los más efectivos,

favoreciendo un mejor desarrollo estructural y mayor potencial fotosintético y productivo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Álvarez, De la Cruz y Riascos (2024) quienes encontraron diferencias significativas en la altura de las pantas según el tratamiento aplicado, destacando que el uso de insumos orgánicos contribuyen positivamente al rendimiento vegetal.

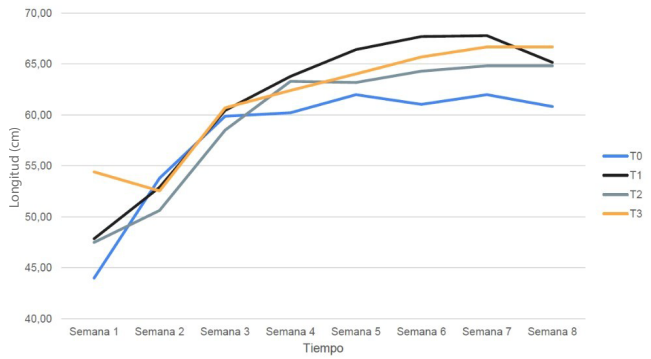


Figura 2. Crecimiento promedio (cm) / tratamiento.

La Figura 3 muestra que el mayor rendimiento se obtuvo con T2 (compost de café: 883,99 g), seguido de T1 (químico: 819,17 g) y T3 (humus de café: 729,7 g), mientras que el control (T0) presentó la menor producción (371,43 g). Destaca que T3 superó ampliamente al control y se aproximó al rendimiento del tratamiento químico, confirmando su potencial como alternativa orgánica. Estos resultados respaldan que la aplicación de compost tiene un efecto positivo sobre el rendimiento y número de granos, dado que aporta una mayor cantidad de nutrientes (Núñez Ramos et al. 2025).

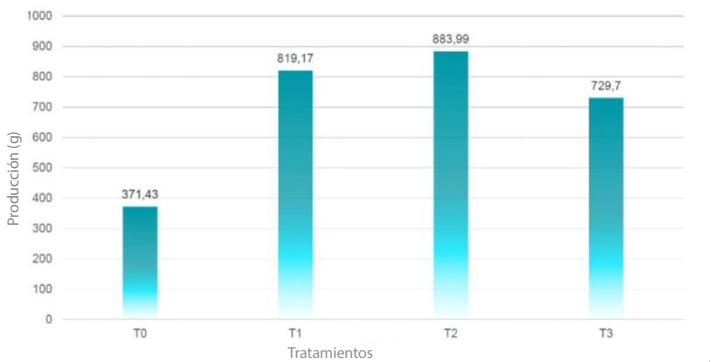


Figura 3. Producción (g) por cada tratamiento.

La Figura 4 muestra el resultado del análisis de humedad mostró diferencias significativas entre tratamientos, con valores desde 12,65% en T0 hasta 19,38% en T3. T2 y T3 presentaron los niveles más altos y consistentes, mientras que T1 alcanzó 18,51% con alta variabilidad y T0 el valor más bajo con gran dispersión. Estos resultados indican que los tratamientos, especialmente T2 y T3, favorecieron una mayor y más estable retención de agua en los tejidos vegetales. Estos resultados demuestran que son semillas óptimas para almacenar a mediano plazo ya que contiene ≤16% (Jian, Jayas, Fields and White).

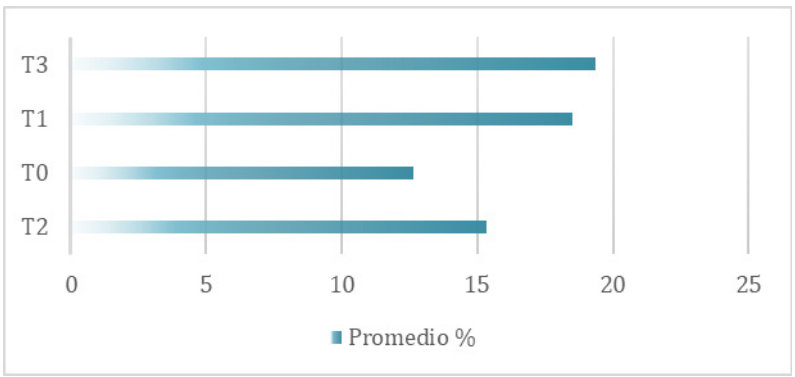


Figura 4. Porcentaje de humedad por cada tratamiento.

La Figura 5 muestra las diferencias significativas en el contenido de proteinas en cada uno de los tratamientos, con valores altos en T3 (24,68%) y T2 (23,80%) superando al T0 (22,77%) y T1 (22,76%), indicando que T3 muestra un mayor valor nutricional. Lo anterior coincide con los resultados encontrados por Janah et al. (2021) donde se obtuvieron resultados proteicos entre 13-24,5% en 35 semillas de frijol de razas locales de diferentes lugares de Pakistán.

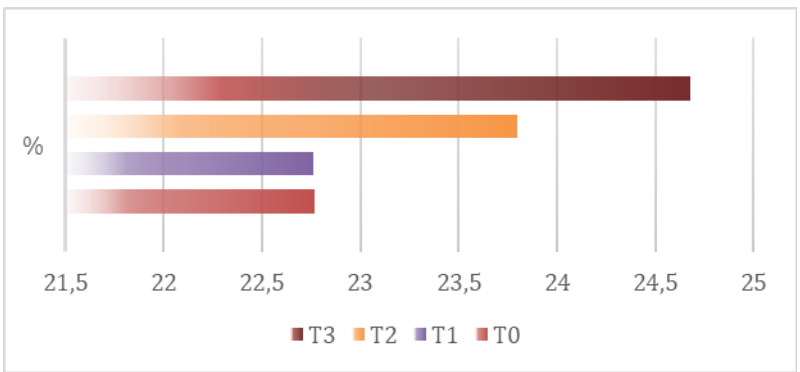


Figura 5. Porcentaje de proteína por tratamiento.

CONCLUSION

El estudio demostró que las fuentes de fertilización orgánica, especialmente el humus de café y el compost de cáscara de café, constituyen alternativas sostenibles y eficientes frente a los fertilizantes químicos en el cultivo de frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris*). Estos tratamientos no solo favorecieron el crecimiento y la producción, sino que también incrementaron significativamente el contenido de proteína, mejorando así el valor nutricional del grano. Además, el uso de abonos orgánicos contribuye a la reducción de costos, disminuye la dependencia de insumos químicos y mitiga el impacto ambiental, consolidándose como una estrategia viable para fortalecer la productividad agrícola con enfoque en sostenibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al docente Diego Fernando Castro Vargas por su orientación y apoyo en el desarrollo de esta investigación, así como a la Dra. Alba Mery Garzón García docente e investigadora de la Universidad del Valle y al Dr. Saúl Ruiz Cruz de la Universidad de Sonora por su colaboración en los análisis de proteínas. Igualmente, a la Universidad del Valle por facilitar sus instalaciones para el establecimiento del cultivo.

REFERENCIAS

Alvarez Y, De la Cruz E and Riascos A (2024) Efecto de la incorporación de abono orgánico en la recuperación de cultivo de Plátano (*Musa paradisiaca*). [archivo PDF].

Cabrales, EM and Ayala JA (2020) Respuesta del cilantro

(*Coriandrum sativum* L.) a distintas proporciones de compost en condiciones semicontroladas en Córdoba – Colombia. Suelos Ecuatoriales. [archivo PDF].

Fernández Valenciano AF and Sánchez Chávez E (2017) Estudio de las propiedades fisicoquímicas y calidad nutricional en distintas variedades de frijol consumidas en México. Nova Scientia, 9(18): 133–148. https://doi.org/10.21640/ns.v9i18.763

Jannat S, Shah AH and Sabir SM (2019) Caracterización nutracéutica del germoplasma de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) de Pakistán. Int Food Res J. 26(6): 1835–43.

Jian F, Jayas DS, Fields P, White NDG (2017) Sorción de agua y tiempo de cocción del frijol rojo (*Phaseolus vulgaris* L.): parte I: efecto de las condiciones de congelación y secado en la sorción de agua y el tiempo de cocción. International. J Food Sci Technol. 52(9): 2031–9.

Lenora SE, Romelle FD, Flore DTNE, Mbieji KCF, Alix MN and Bernard T (2025) Physical and nutritional properties of sixteen varieties of bean seeds (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in Cameroon. Discover Food *5*, Article 192. https://doi.org/10.1007/s44187-025-00459-7

Núñez Ramos PA, de la Cruz Contreras V, de la Cruz Rodríguez JF, Valerio Then I, Almonte I and Pulido-Blanco VC (2025).Efecto de la fertilización orgánica sobre variables agronómicas del frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) *en la zona* El Cercado, provincia Duarte, República Dominicana. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales 12(1): 47-56. https://doi.org/10.53287/uzjj5185jw82e

Ore LR and Rivera SM (2018) Aprovechamiento de la cáscara del fruto de café (*Coffea arábica*) de Cajamarca para la obtención de compost como abono orgánico. [Tesis de Profesional, Universidad César Vallejo]. ORE_HL.pdf (ucv.edu.pe)

Pérez LM, Del Toro CL, Sánchez E, González RI, Reyes A, et al (2020) Bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes de diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México, mediante un sistema gastrointestinal in vitro. Biotecnia 22(1): 117–125. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1159

Revista Facultad Nacional de Agronomía

De la tulpa a la milpa: Metodología de intercambio de conocimiento en los corregimientos de Medellín

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

De la tulpa a la milpa: knowledge exchange methodology in the rural districts of Medellín

Katherine López Arboleda[1], Ana María Arrollave Zuleta[2], Paulina Castro Gil[3], Jimmy Limans Cristancho Balaguera[4] and Itzamat Nataly Cuervo López[5]

RESUMEN

Palabras clave:
Cartilla
Expansión urbana
Investigación-acción
Metodología
Territorio

La expansión urbana y la migración de personas en las veredas han generado impactos en sus paisajes y cultura, afectando el relevo generacional, el uso del suelo, los ecosistemas naturales y las dinámicas de la población, provocando que la identidad y la conexión con el territorio y sus habitantes se pierdan en el tiempo. Considerando lo anterior, el Semillero de Investigación Chagra de la Universidad Nacional de Colombia, con el apoyo de instituciones educativas y organizaciones propias del territorio, diseñó una metodología colaborativa que promueve el intercambio de saberes y busca rescatar y visibilizar la riqueza material e inmaterial de los territorios. Este trabajo soportado en un ejercicio de investigación - acción, está plasmado en una cartilla llamada "De la Tulpa a la Milpa" donde niños y adolescentes son los principales protagonistas al convertirse en investigadores de su propia realidad. La cartilla recopila saberes locales, tradiciones y problemáticas, organiza y contrasta la información con fuentes diversas, y la devuelve en formato personalizado para cada territorio, aportando así a la construcción colectiva de conocimiento y al fortalecimiento del desarrollo rural. Actualmente cuenta con dos entregas: en la vereda La Aldea (San Sebastián de Palmitas) y en El Llano (San Cristóbal), Medellín.

ABSTRACT

Keywords:
Booklet
Urban expansion
Action-research
Methodology
Territory

Urban expansion and human migration in rural areas have had impacts on their landscapes and culture, affecting generational change, land use, natural ecosystems, and population dynamics. This has led to the loss of identity and connection to the territory and its inhabitants. Based on this, the Chagra Research group at the National University of Colombia, with the support of educational institutions and organizations in the area, designed a methodology that seeks to rescue and make visible the tangible and intangible wealth of the territories through an exchange of knowledge. This work, supported by an action-research exercise, consists of a collaborative methodology for the exchange of knowledge about the territory in the form of a booklet called "De la Tulpa a la Milpa, in which children and adolescents are the main protagonists, becoming researchers of their own reality. The booklet compiles local knowledge, traditions, and issues, organizes and compares the information with diverse sources, and delivers it in a customized format for each area, thus contributing to the collective construction of knowledge and strengthening rural development. Currently it has two deliveries: La Aldea Village (San Sebastián de Palmitas) El Llano village (San Cristóbal), Medellín.

[1]Ingeniera Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. katlopezarb@unal.edu.co
[2]Estudiante del pregrado Construcción. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. anarroyavez@unal.edu.co
[3]Maestra en Artes plásticas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. pcastrog@unal.edu.co
[4]Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Jlcristanchob@unal.edu.co
[5]Arquitecta Constructora. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. incuervol@unal.edu.co

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

Las comunidades rurales de la ciudad de Medellín actualmente enfrentan el problema de la migración de personas, tanto en sentido ciudad-campo como campo-ciudad. Esta situación obedece a diversas causas, entre ellas el hecho de que los corregimientos San Cristóbal y San Sebastián se han convertido en epicentro de importantes proyectos de infraestructura vial; como la construcción de la conexión vial Aburrá-Cauca. (Espinal y Rivera 2024). Estas transformaciones además de brindar oportunidades de conexión con otros municipios presentan una cicatriz visible en el territorio, implicando cambio en la riqueza cultural, desplazamiento de la actividad agrícola por otras actividades, reducción del relevo generacional, la afectación de la biodiversidad y de los recursos naturales y el debilitamiento de los lazos afectivos de los habitantes con sus territorios.

El Semillero de Investigación Chagra, adscrito a la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, mediante un proceso de investigación busca aportar acciones a estas problemáticas. En 2019 el semillero trabajaba de la mano con la Universidad de Antioquia, Corporación Cultural Penca de Sábila, entre otras instituciones en el marco de la Alianza por la Defensa del Territorio y de la Vida Campesina, iniciativa encaminada en acciones conjuntas de investigación y extensión académica para promover el desarrollo responsable de la región rural campesina en el Valle de Aburrá. Producto de estos encuentros el Semillero y Corporación Cultural Penca de Sábila deciden trabajar con la vereda La Aldea de San Sebastián de Palmitas.

Colectivamente se llegó a la idea de trabajar en una cartilla, la cual fue llamada “De la Tulpa a la Milpa”. El nombre de la cartilla se toma a partir de dos definiciones: La Tulpa, que es el momento en el que las comunidades se reúnen en torno al fuego con el objetivo de cocinar y compartir estos alimentos, allí se da el espacio para intercambiar historias y conocimientos y La Milpa que es el proceso del sembrado de las semillas. La cartilla se concibe no sólo como un instrumento pedagógico, sino también como un mecanismo de participación en la construcción colectiva de conocimiento. De esta manera se pretende “sembrar” el conocimiento recolectado en niños, niñas y jóvenes buscando que ellos perpetúen y divulguen todas estas tradiciones, fortaleciendo el arraigo e identidad cultural.

Gracias a la acogida del proyecto, el Semillero Chagra se vinculó con la Institución Educativa Presbítero Carlos Alberto Calderón, ubicada en la vereda El Llano del corregimiento de San Cristóbal del municipio de Medellín, Este corregimiento posee un contexto social y económico muy similar a San Sebastián de Palmitas, por lo que la posibilidad de replicar la estrategia era viable; proceso apoyado por el cuerpo docente y administrativo del colegio, quienes de manera colaborativa se vincularon al desarrollo de la cartilla como un recurso para potenciar los contenidos de su cátedra institucional Carlos Alberto Calderón. Así, desde el 2023 se ha estado trabajando en la formulación y aplicación de la segunda versión de la cartilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología usada se fundamenta en los principios de la Investigación Acción Participativa (IAP), perspectiva que promueve la participación activa de las personas involucradas en el proceso de generación de conocimiento y acción para el cambio social (Fals Borda, 2015). De esta forma se implementa un método de lectura integral del territorio, como lo propone la construcción social del hábitat, donde prima el reconocimiento de las relaciones cotidianas y las formas de apropiación del espacio doméstico y comunitario. Estas se entienden como indicadores clave de habitabilidad, tradición, bienestar y gestión tecnológica en el espacio habitado. Para la creación de las cartillas, también se tienen en cuenta metodologías como aprender haciendo de John Dewey, y el método ABP Aprendizaje Basado en Proyectos de William Kilpatrick, propiciando una recolección participativa de información a partir del territorio.

En este sentido, tanto en la vereda La Aldea y la vereda El Llano, el ejercicio parte de historias y tradiciones locales desde la mirada de sus pobladores, que luego se filtran y comparten a través de la cartilla. Esta estrategia ha facilitado que los saberes ancestrales se transmitan a nuevas generaciones. La cartilla se estructura en dos grandes etapas:

Primera etapa: la cartilla en blanco y negro: se realiza en diálogo con la comunidad y, especialmente, con los estudiantes. En esta fase se definen los enfoques pedagógicos de la actividad, y se presenta una historia central que acompaña todo el recorrido. En las primeras

versiones, los títulos fueron: "*La liga campesina y los conocimientos perdidos*", "*La liga campesina y los rivales misteriosos*", y más recientemente "*Mi territorio, mi identidad*".

La construcción de cartilla tiene una participación de los docentes en la co-creación de la propuesta, donde se busca ajustar al contexto asuntos como el lenguaje, la diagramación, la lúdica y los alcances conceptuales. En la figura 1 se observa una de las actividades de la última versión de la cartilla trabajada en la vereda El Llano realizada en articulación con la institución Presbítero Carlos Alberto Calderón para la cátedra del mismo nombre.
La cartilla en blanco y negro se trabaja en el aula. Los estudiantes cuentan con el acompañamiento constante de un docente, y luego completan la cartilla en casa con sus familias.

Segunda etapa: la cartilla a color: Una vez recolectada la información, el Semillero Chagra realiza una sistematización, identificando patrones comunes en las respuestas, cuantificando los datos recolectados y reconociendo los intereses y visiones compartidas por los niños y niñas y adolescentes sobre su territorio. A partir de ese análisis, se estructura una cartilla final a color, con secciones como: *Hazlo tú mismo; ¿Sabías que...?; Mitos y leyendas; Derechos de los campesinos y campesinas,* entre otras.

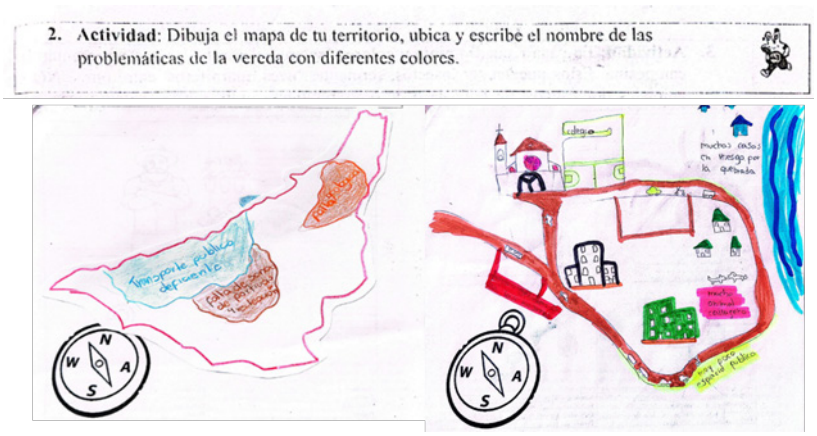


Figura 1. Actividad 2. Cartilla blanco y negro vereda El Llano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A pesar de que en los inicios era una metodología nueva en un contexto complejo como lo fue la pandemia del COVID 19 y había limitaciones en la comunicación con la comunidad, la aceptación de la cartilla en la organización escolar y familiar fue muy positiva. En el caso de San Sebastián de Palmitas se logró la divulgación de los mitos y leyendas de la vereda al igual que el reconocimiento de la importancia del cuidado con la flora y fauna local, reduciendo los mitos que se tenía frente a estas y divulgando su riqueza inmaterial. Se hicieron un total de dos versiones y dos entregas de la cartilla, alcanzando aproximadamente 300 niños de las siete escuelas que hacen parte de las veredas del corregimiento.

En la vereda El Llano del corregimiento de San Cristóbal, se implementó la primera etapa del proyecto, la cual consiste en la elaboración de la cartilla en blanco y negro dirigida a niños y niñas de los grados 4° de primaria hasta 7° de bachillerato de la Institución Educativa Presbítero Carlos Alberto Calderón. Posteriormente la información fue sistematizada, agrupando las respuestas con base en los elementos más recurrentes en cada actividad. Para la mayoría de las actividades se tomó el criterio de las cinco respuestas más frecuentes, con el fin de comprender adecuadamente las ideas expresadas, y la intención de cada participante.

Los resultados obtenidos en la sistematización de la cartilla fueron socializados con los profesores de la institución educativa Presbítero Carlos Alberto Calderón y con las alianzas estratégicas que hacen parte de la Cátedra Carlos Alberto. Esta socialización tiene como objetivo recolectar ideas y percepciones que puedan fortalecer la construcción de la cartilla a color, y la posibilidad de articulación a

los nodos temáticos de la institución. Se ha visto cómo la construcción conjunta de un material pedagógico puede convertirse en una estrategia de diagnóstico territorial para una institución educativa que busca impartir enseñanzas basadas en las necesidades de los contextos rurales en los que crecen las nuevas generaciones.

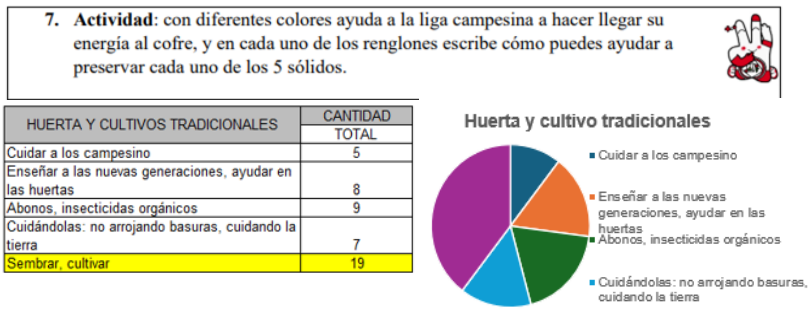


Figura 2. Proceso de sistematización Actividad 7 cartilla a blanco y negro vereda el Llano.

El estado de implementación en el que se encuentra actualmente esta versión de la cartilla es la maquetación y diseño de los contenidos a incluir en la etapa de versión a color para la institución educativa, planeando entregar un piloto para finales del año 2025. Por ejemplo, se ha pensado incluir en la versión final de la cartilla una sección donde se aborde temas como la hidroponía, alimentos, recetas del territorio, y producción de alimentos agroecológicos.

CONCLUSIONES

La cartilla *De la Tulpa a la Milpa* es una herramienta educativa que permite preservar y divulgar los conocimientos de las veredas y al mismo tiempo visibilizar la riqueza ambiental y cultural de las comunidades rurales. Esto se logra personalizando la cartilla con flora y fauna local, lugares emblemáticos, objetos y construcciones representativas, y gracias a la intervención y los aportes de los estudiantes y las familias participantes, se logra el reconocimiento de ciertas problemáticas percibidas por la comunidad en el territorio.

Para el Semillero Chagra se convirtió en una herramienta de diagnóstico de las problemáticas de un sector de la ruralidad de Medellín que sobrepasaba los alcances de las estrategias convencionales de diagnóstico como las encuestas, abriendo un nuevo panorama de acción para incidir en las comunidades rurales de la mano con las escuelas y con la población infantil como representación de una nueva generación de saberes en el territorio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Corporación Agroecológica Penca de Sábila, por su apoyo en la primera versión de la cartilla entregada en la vereda La Aldea, corregimiento de San Sebastián de Palmitas. A la Institución Educativo Presbítero Carlos Alberto Calderón, de la Vereda El Llano, en especial a los profesores Jhony Zapata y Nadia Patiño; por la acogida y el acompañamiento durante el desarrollo e implementacion de la cartilla a blanco y negro. Finalmente agradecemos a las alianzas estratégicas que hacen parte de la Cátedra Carlos Alberto, que incluye representantes de la Secretaría de Cultura de Medellín, la gestora cultural del Parque Biblioteca San Cristóbal y la Corporación Ilakir De Enkai; estas alianzas han fortalecido ideas y percepciones para la construcción de la futura cartilla a color.

REFERENCIAS

Espinal C, and Rivera LA (2024) Tensiones rurales en Medellín: San Sebastián de Palmitas y San Cristóbal (2000–2020) [Capítulo 6]. pp. 139–152. https://www.researchgate.net/publication/381279619_Tensiones_rurales_en_Medellin_San_Sebastian_de_Palmitas_y_San_Cristobal_2000-2020.

Fals Borda O (2015) Antología: Una sociología sentipensante para América Latina (V. Moncayo, Ed.). Buenos Aires, Argentina: Siglo XXI Editores.

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Implementación de manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE) en unidades productivas de Medellín: línea base para la extensión agropecuaria

Implementation of integrated pest and disease management (IPDM) in Medellin's production units: a baseline for agricultural extension

Luisa Fernanda Sánchez[1]* and Tomás Antonio Madrid Garcés[2]

RESUMEN

Este trabajo presenta la línea base del nivel de implementación de prácticas MIPE en unidades productivas de la ruralidad de Medellín, para orientar la extensión agropecuaria con enfoque territorial y diferencial. Se diseñó y parametrizó una herramienta digital en IN-OVA Colectiva (app/plataforma) que integró: (i) caracterización social (sexo, edad, condición de víctima del conflicto, y líneas productivas primaria/secundaria) y (ii) encuesta estandarizada MIPE con cuatro componentes (monitoreo y muestreo; control cultural; control biológico y mecánico/físico; bioseguridad y residuos—EPP, lectura de etiqueta/bandas, triple lavado y posconsumo). Cada práctica se valoró con evidencias y se clasificó en bajo, medio o superior. Equipos extensionistas realizaron diagnóstico predial y devolución inmediata. Los resultados muestran diversidad social y productiva, predominio de niveles medios de implementación, fortalezas en monitoreo/control cultural y brechas en biocontrol, uso de trampas, EPP y residuos. La gestión de datos mediante tableros dinámicos permite decisiones oportunas para diseñar itinerarios pedagógicos y acompañamientos técnicos ajustados al territorio.

Palabras clave:
Extensión agropecuaria
Implementación
IN-OVA
Línea base
Manejo Integrado de plagas y enfermedades
Ruralidad de Medellín

ABSTRACT

This study presents the baseline of IPM practice implementation in production units across Medellín's rural areas, to guide agricultural extension with a territorial and differential approach. A digital tool was designed and parameterized in IN-OVA Colectiva (app/platform) combining: (i) social profiling (sex, age, conflict-victim status, and primary/secondary production lines) and (ii) a standardized IPM survey with four components (monitoring and sampling; cultural control; biological and mechanical/physical control; biosafety and waste management—PPE, label/toxic band reading, triple rinse and post-consumer practices). Practices were evidence-based and classified as low, medium, or high. Extension teams conducted on-farm diagnosis with instant feedback. Results show social and productive diversity, a predominance of medium implementation, strengths in monitoring/cultural control, and gaps in biocontrol, trap use, PPE, and waste management. Data dashboards enable timely decisions to design learning pathways and technical support tailored to territory needs.

Keywords:
Agricultural extension
Implementation
IN-OVA
Baseline
Integrated pest and disease management (IPM)
Medellín rural areas

[1] Estudiante de Ingeniería Agropecuaria, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia. Luisa_sanchez86192@elpoli.edu.co
[2] Facultad de Ciencias Agrarias, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia. temadrid@elpoli.edu.co

El MIPE integra prevención, monitoreo y control con prioridad en alternativas culturales, biológicas y físicas. En las veredas de Medellín, disponer de una fotografía inicial del grado de implementación es clave para dirigir la asistencia técnica y sostener ciclos de mejora (diagnóstico → devolución → intervención → nueva medición).

METODOLOGÍA

Diseño y población. Estudio observacional, transversal y descriptivo en unidades productivas familiares de los corregimientos rurales; análisis restringido a familias con información completa.

Instrumento e IN-OVA. Captura 100% digital en IN-OVA con dos bloques: (1) caracterización social (sexo, edad, víctimas del conflicto, línea productiva primaria/secundaria); (2) encuesta MIPE (monitoreo y muestreo; control cultural; biológico y mecánico/físico; bioseguridad y residuos).

Evaluación. Clasificación del grado de implementación en bajo, medio, superior según evidencias y trazabilidad mínima.

Operación y calidad. Diagnóstico predial con retroalimentación inmediata; controles de deduplicación, coherencias y criterios estandarizados.

Análisis. Distribuciones por nivel y comparativos por vereda y rubro, con tableros dinámicos para identificar patrones, brechas y prioridades.

RESULTADOS

Caracterización social y productiva: Hogares diversos por sexo y edad, presencia de víctimas del conflicto y diversificación (líneas primaria/secundaria) orientada a seguridad alimentaria y circuitos cortos; variaciones veredales en ciclos de trabajo y disponibilidad de mano de obra.

Nivel de implementación MIPE. Predomina el nivel medio; fortalezas en monitoreo y control cultural (especialmente en horticultura) y brechas en biocontrol, uso de trampas, EPP y gestión de residuos. La intensidad de las brechas varía por rubro y condiciones del hogar.

DISCUSIÓN

Implicaciones para la extensión agropecuaria

Se propone una estrategia modular y escalonada: (i) monitoreo (signos/síntomas, puntos de control, bitácora); (ii) control cultural (asociaciones, coberturas); (iii) biocontrol y métodos mecánico/físicos (benéficos, trampas, barreras); y (iv) bioseguridad (EPP, etiquetas, triple lavado y posconsumo). La combinación de extensión personalizada, micro-formación digital, talleres/Escuelas de Campo y conversatorios—con devolución inmediata vía IN-OVA—favorece la adopción y convierte aprendizajes en rutinas verificables.

CONCLUSIONES

La línea base ofrece una plataforma de decisión para priorizar veredas y rubros, secuenciar contenidos y programar acompañamientos técnicos con eficiencia. El predominio del nivel medio y las brechas detectadas orientan el foco en biocontrol, métodos físicos y bioseguridad. Los tableros dinámicos soportan ajustes continuos y medición de avances en el territorio.

AGRADECIMIENTOS

A las familias participantes y al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por su disposición y soporte metodológico.

REFERENCIAS

Alcaldía de Medellín (2023) Plan de Desarrollo Distrital "Medellín Te Quiere" 2024 - 2027. https://www.medellin.gov.co/es/plan-de-desarrollo/

Congreso de la República de Colombia (2017) *Ley 1876 de 2017.* Por medio de la cual se crea el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria y se dictan otras disposiciones. https://faolex.fao.org/docs/pdf/col181812.pdf

FAO (2024) Guía de transición a la para extensionistas y promotores rurales en Colombia | FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/agroecology/database/detail/es/c/1711004/

Garcia SN, Osburn BI and Jay-Russell MT (2020) One health for food safety, food security, and sustainable food production. Frontiers in Sustainable Food Systems 4*:* 481782. https://doi.org/10.3389/FSUFS.2020.00001/BIBTEX

Herrera-Ramírez D, Buelvas-Gutierrez L and Boom-Cárcamo E (2025) Análisis de la producción, características demográficas y socioeconómicas de los productores y campesinos en la zona rural de Medellín. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica 28(1). https://doi.org/10.31910/RUDCA.V28.N1.2025.2418

Madrid Garcés TA, Herrera Franco VH, Valencia Alzate MP, Madrid Garcés PJ et al (2025). Extensión rural y agropecuaria 4.0: Experiencia de implementación en Girardota, Antioquia, Colombia. Extensión Rural y Agropecuaria 4.0: Experiencia de Implementación en Girardota, Antioquia, Colombia. https://doi.org/10.37811/CLI_W1205

Wezel A, Herren BG, Kerr RB, Barrios E, Gonçalves ALR and Sinclair F (2020) Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. Agronomy for Sustainable Development, 40(6): 1–13. https://doi.org/10.1007/S13593-020-00646-Z/FIGURES/5

EJE TEMÁTICO 2
Ingeniería de los recursos agua y suelo



http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Efecto del déficit hídrico sobre la intensidad respiratoria y la producción de etileno del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero

Effect of deficit irrigation on respiratory intensity and ethylene production in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions

Juan Diego Neira Castañeda[1], Cristian Camilo Guerrero Guio[1], Luis Alberto Salgado Murillo[1], Ana Gabriela Plazas Ballen[1], Rodrigo Gil Castañeda[1], Miguel Ángel Valenzuela Mahecha[1] and Nicolás Duarte Cano[1]

Palabras clave:
Almacenamiento refrigerado
Calidad
Déficit hídrico
Fisiología del tomate
Postcosecha

RESUMEN

El manejo hídrico previo a la cosecha puede modificar la fisiología poscosecha de los frutos, particularmente en procesos clave como la respiración y la producción de etileno, que determinan la maduración, la senescencia y la vida útil. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dos niveles de riego (100 y 50% de la evapotranspiración del cultivo, ETc) sobre la intensidad respiratoria y la producción de etileno en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tipo Roma bajo condiciones de invernadero. La cosecha fue de 60 frutos en estado de madurez pintón y se almacenaron en refrigeración a 4 °C durante 22 días, con evaluaciones cada dos días. La respiración se midió mediante cámaras herméticas y sensores de CO_2, mientras que la producción de etileno se determinó con un analizador portátil F-900. Los frutos control presentaron un pico respiratorio climatérico más definido, mientras que los frutos con déficit hídrico mostraron una tasa respiratoria más estable y atenuada. En contraste, la producción de etileno fue significativamente mayor en los frutos sometidos a déficit hídrico, con un incremento sostenido durante el almacenamiento, lo que podría acelerar la senescencia. Estos resultados evidencian que el riego deficitario regula de manera diferenciada la fisiología poscosecha del tomate.

Keywords:
Cold storage
Quality
Deficit irrigation
Tomatoe physiology
Postharvest

ABSTRACT

Preharvest water management can alter postharvest fruit physiology, particularly in key processes such as respiration and ethylene production, which determine ripening, senescence, and shelf life. The objective of this study was to evaluate the effect of two irrigation levels (100 and 50% of crop evapotranspiration, ETc) on respiration rate and ethylene production in Roma-type tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions. A total of 60 fruits at breaker stage were harvested and stored under refrigeration at 4 °C for 22 days, with evaluations carried out every two days. Respiration was measured using hermetic chambers with CO_2 sensors, while ethylene production was quantified with a portable F-900 analyzer. Control fruits exhibited a more defined climacteric respiratory peak, whereas deficit-irrigated fruits maintained a more stable and attenuated respiration rate. In contrast, deficit fruits showed significantly higher and sustained ethylene production throughout storage, which could accelerate senescence. These findings demonstrate that deficit irrigation differentially regulates postharvest tomato physiology, providing valuable insights for sustainable water management in protected cropping systems.

[1]Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. jneirac@unal.edu.co; cguerrerog@unal.edu.co; lsalgadom@unal.edu.co; aplazasb@unal.edu.co; rgilc@unal.edu.co; mavalenzuelam@unal.edu.co; nduartec@unal.edu.co

CC BY NC SA

El cambio climático ha incrementado la frecuencia de sequías, lluvias intensas y heladas, afectando la disponibilidad hídrica y, con ello, la sostenibilidad de la producción hortícola (Lipan et al. 2021; MADR 2021). En Colombia, el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) representa cerca del 25% de la producción hortícola nacional y se cultiva de forma creciente bajo condiciones de invernadero, lo que ha mejorado la productividad, pero también ha aumentado el consumo de agua (MADR 2024; Gil et al, 2019).

El riego deficitario se ha consolidado como una estrategia para optimizar el uso del agua en hortalizas, al aplicar volúmenes inferiores a la evapotranspiración del cultivo (ETc), reduciendo la extracción sin afectar de manera significativa el rendimiento (Willett et al, 2019; Vélez-Sánchez et al, 2021). Más allá del rendimiento, este manejo hídrico puede modular la fisiología del fruto, particularmente en procesos poscosecha como la respiración y la producción de etileno, los cuales determinan la maduración, senescencia y vida útil.

A pesar de que estudios previos han abordado los consumos de agua en tomate bajo invernadero en Colombia (Gil et al. 2017; Gil et al. 2019), aún existe un vacío respecto a cómo el déficit hídrico incide en la calidad poscosecha, específicamente en variables bioquímicas. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de dos niveles de riego (100 y 50% de la ETc) sobre la intensidad respiratoria y la producción de etileno en frutos de tomate almacenados en refrigeración, aportando criterios para un manejo hídrico sostenible en sistemas protegidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló en el Invernadero 1 de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá 4°38′10.55″ N, 74° 5′20.50″W.

El material vegetal correspondió al híbrido GEM 604 F1, un tomate tipo Roma ampliamente cultivado en Colombia. El cultivo se estableció en un sustrato compuesto por una proporción volumétrica de 70:30 de suelo y cascarilla de arroz tostada, dispuesto en canales de polietileno de 40 cm de ancho y 30 cm de alto. Las plantas se sembraron a una distancia de 0,3 m dentro de la hilera y 1,2 m entre camas. El riego se efectuó mediante un sistema de fertirriego por goteo, con dos emisores de 4 L h^{-1} por planta; la aplicación consistió en tres pulsos de cinco minutos cada uno, suministrando en promedio 1,0 L $planta^{-1}$ $día^{-1}$, valor consistente con los reportados para tomate cultivado en invernadero en Colombia.

Se recolectaron 60 frutos en grado dos de maduración (González, 2013), seleccionados de acuerdo con uniformidad de tamaño y ausencia de daños mecánicos o fisiológicos. Estos se tomaron de los dos tratamientos: 30 frutos provenientes de plantas bajo riego normal (control) y 30 de plantas sometidas a déficit hídrico. Posteriormente, los frutos fueron almacenados bajo condiciones de refrigeración a 4 °C durante un periodo de 22 días.

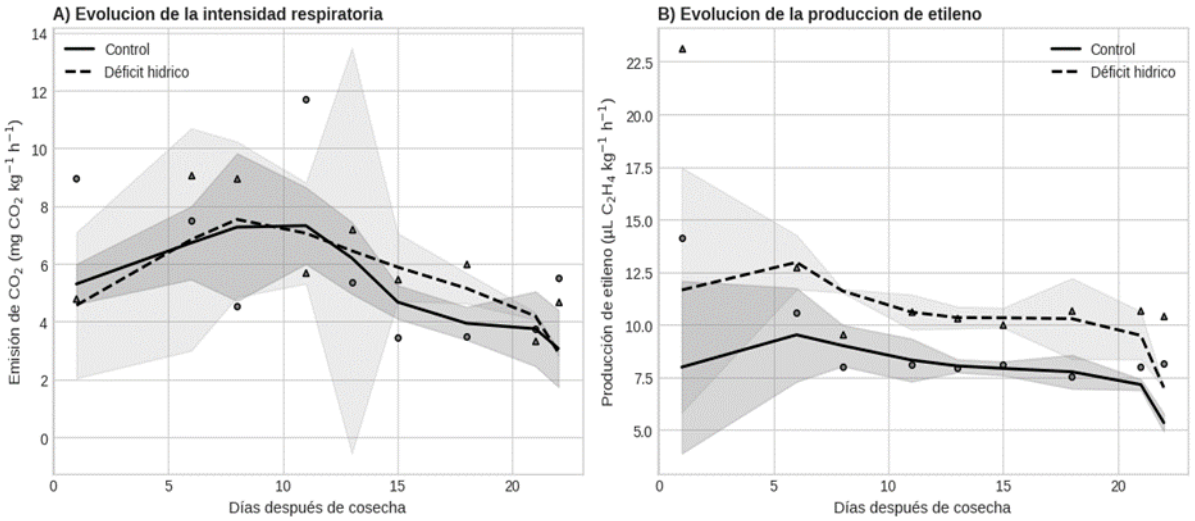
Las variables de análisis fueron la intensidad respiratoria y la producción de etileno. Para el caso de la intensidad respiratoria, la medición de CO_2 se realizó utilizando cámaras de respiración modelo Biochamber 2000 Vernier, en las que se introdujeron tres frutos por cada tratamiento durante un tiempo de 300 segundos (s). La concentración de CO_2 se determinó mediante un sensor CO2-BTA Vernier conectado a un equipo Labquest modelo LQ2-LE Vernier (Vernier Software and Technology, Beaverton, OR, USA), y los resultados se expresaron en mg de CO_2 kg^{-1} h^{-1}.

La emisión de etileno se determinó mediante un analizador portátil F-900 (Felix Instruments, Camas, WA, USA). En cada tratamiento se analizaron tres frutos por separado, colocados individualmente en cámaras modelo Biochamber 2000 Vernier, con un tiempo de incubación de 20 minutos. El equipo cuenta con un sistema de muestreo de aire a 80 mL min^{-1} y sensores electroquímicos con un límite de detección de 0,025 ppm. La concentración de etileno acumulada en la cámara se midió al finalizar el periodo de incubación y se expresó como tasa de producción en µL C_2H_4 kg^{-1} h^{-1}.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1A muestra que los frutos sin déficit hídrico (SD) presentaron mayor tasa respiratoria inicial (14.20 mg CO_2 kg^{-1} h^{-1}) que los con déficit (CD, 7.34 mg CO_2 kg^{-1} h^{-1}). SD mostró un pico climatérico marcado

el 7 de julio (18.48 mg CO_2 kg^{-1} h^{-1}), mientras que CD presentó una evolución más irregular. La Figura 1B revela una producción de etileno inicialmente alta, mayor en CD (~ 23.1 µL kg^{-1} h^{-1}) comparado con SD (~12,74 µL kg^{-1} h^{-1}). Tras estabilizarse, CD mantuvo consistentemente mayor producción de etileno (~ 10,40 µL kg^{-1} h^{-1}) que SD (~8,13 µL kg^{-1} h^{-1}) durante todo el almacenamiento.



Los símbolos representan los valores promedio ± desviación estándar; las líneas corresponden a la curva suavizada mediante filtro gaussiano (σ = 1.2).
Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

Figura 1. Efecto del déficit hídrico en la respiración y la producción de etileno.

El patrón respiratorio observado revela diferencias en el proceso de maduración. El pico climatérico más marcado y definido en SD sugiere una maduración más típica y sincronizada, característica de frutos climatéricos con adecuada disponibilidad hídrica (Alexander and Grierson, 2002). La respuesta irregular en CD, con un pico menos definido y mayor variabilidad, indica que el déficit hídrico desincroniza el proceso climatérico, posiblemente afectando la expresión genética relacionada con la maduración (Habibi et al. 2025).

Los frutos sin déficit hídrico (SD) presentaron una tasa respiratoria inicial más alta que aquellos con déficit (CD). Este resultado concuerda con lo reportado por Ribas-Carbó et al. (2005), quienes observaron que el estrés hídrico tiende a reducir la respiración debido a la limitación en la disponibilidad de sustratos y a la alteración de la actividad enzimática. No obstante, el pico climatérico claramente definido en SD y la evolución irregular observada en CD sugieren que la falta de agua altera la sincronización de la maduración, modificando los patrones metabólicos típicos de la respiración climatérica.

En contraste, la producción de etileno mostró una dinámica opuesta: los frutos CD revelaron una producción inicial extremadamente alta y, tras estabilizarse, mantuvieron niveles más elevados de forma sostenida en comparación con SD. Este hallazgo puede relacionarse con lo descrito por Basiouny et al. (1992), quienes señalaron que el déficit hídrico incrementa la biosíntesis de etileno como parte de la respuesta fisiológica al estrés. En este contexto, el etileno funcionaría no solo como regulador de la maduración, sino también como señal defensiva que desencadena procesos de senescencia acelerados.

La producción consistentemente mayor de etileno en frutas CD durante la mayor parte del almacenamiento es un hallazgo crucial. Esto sugiere que el estrés hídrico precosecha potencia la biosíntesis de etileno poscosecha, posiblemente como mecanismo de respuesta al estrés (Fatma et al. 2022). Esta producción elevada y sostenida de etileno en CD podría acelerar los procesos de senescencia y reducir la vida útil comercial del fruto, impactando negativamente en la calidad poscosecha. La mayor variabilidad observada en el

tratamiento CD sugiere además que el déficit hídrico resulta en una maduración menos uniforme entre frutos, lo que afecta la homogeneidad y calidad comercial del lote (López-Valencia et al. 2018).

CONCLUSIÓN

El manejo hídrico aplicado durante todo el ciclo de cultivo modificó de manera significativa la fisiología poscosecha del tomate tipo Roma, en especial en los procesos de respiración y producción de etileno. Los frutos con tratamiento de la lámina constante de agua presentaron un pico respiratorio climatérico definido, lo que refleja un patrón de maduración más típico y sincronizado. En contraste, los frutos sometidos a déficit hídrico mostraron una tasa respiratoria inicial más baja y un comportamiento menos uniforme, lo que indica una alteración en la sincronización del proceso climatérico. Asimismo, la producción de etileno fue mayor y sostenida en los frutos con déficit hídrico, lo que sugiere una aceleración de la senescencia y, por ende, una menor vida útil comercial bajo las condiciones de este ensayo. Estos resultados permiten inferir que el esquema de déficit hídrico aplicado no favoreció la conservación poscosecha; sin embargo, es posible que otros niveles o estrategias de riego deficitario conduzcan a respuestas diferentes. En este sentido, no se puede descartar la viabilidad del déficit hídrico como herramienta de manejo en tomate, puesto que, tal como señalan Ripoll et al. (2016), los efectos del estrés hídrico sobre la calidad del fruto dependen en gran medida de la etapa de desarrollo en la que este sea aplicado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al programa de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ingeniería y al Departamento de Agronomía de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, por facilitar las instalaciones y los recursos necesarios para la realización de los ensayos experimentales que sustentan este estudio. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al Semillero de Investigación en Ingeniería del Agua y del Clima en la Agricultura del programa de Ingeniería Agrícola por su valioso apoyo y colaboración en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

Basiouny FM, Basiouny K, Maloney M (1994). Influence of water stress on abscisic acid and ethylene production in tomato under different PAR levels. J. Hort. Sci. Biotech.; 69: 535–541. https://doi.org/10.1080/14620316.1994.11516485

Gil R, Bojacá CR and Schrevens E (2017) Uncertainty of the agricultural grey water footprint based on high resolution primary data. Water Resources Management 31: 5091–5107. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1674-x

Gil R, Guerrero A, Casas-Díaz AV, Bojacá CR and Schrevens E (2019) Availability of water resources for tomato production in Colombia: A basin modeling approach. Acta Horticulturae 1253: 429–436. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1253.56

González A (2013) Introducción al cultivo de tomate en invernadero. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. 1-35 p. Formato digital (e-book)

Lipan L, Issa-Issa H, Moriana A, Zurita NM, Galindo A, Martín-Palomo MJ, Andreu L, Carbonell-Barrachina ÁA, Hernández F and Corell M (2021) Scheduling regulated deficit irrigation with leaf water potential of cherry tomato in greenhouse and its effect on fruit quality. Agriculture 11(7), 669.

López-Valencia D, Sánchez-Gómez M, Acuña-Caita JF and Fischer G (2018) Propiedades fisicoquímicas de siete variedades destacadas de fresa (*Fragaria* x *ananassa* Duch) cultivadas en Cundinamarca (Colombia), durante su maduración Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria 19(1): 147-162. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num1_art:528

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2021) Plan Integral de Gestión del Cambio Climático para el Sector Agropecuario (PIGCCS). Resolución 000355 de 2021. Bogotá, Colombia.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2024) Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA*)*. https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge

Ribas-Carbo M, Taylor NL, Giles L, Busquets S, Finnegan PM, Day DA et al (2005) Effects of water stress on respiration in soybean leaves. Plant Physiol. 139: 466–473. https://doi.org/10.1104/pp.105.065565 PMID: 16126857

Ripoll J, Urban L, Staudt M, Brunel B, and Bertin N (2016) Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype. Journal of Plant Physiology 190: 26–35. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.10.006

Vélez-Sánchez J, Balaguera H and Álvarez J (2021) Effect of regulated deficit irrigation (RDI) on the production and quality of pear Triunfo de Viena variety under tropical conditions. Scientia Horticulturae 278. Doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109880.

Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F and Wood A (2019) Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet 393(10170): 447–492.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Aplicación de la dinámica de fluidos computacional al análisis de la velocidad del flujo vascular en hojas de arroz (*Oryza sativa* L.)

Application of computational fluid dynamics to analyze vascular flow velocity in rice leaves (*Oryza sativa* L.)

Marcio Mesquita[1]*, Diogo Henrique Morato de Moraes[1], Alexson Pantaleão Machado de Carvalho[1] and Rafaela Resende Andrade[2]

Palabras clave:
Agricultura de regadío
Agricultura sostenible
Eficiencia hídrica
Seguridad alimentaria

RESUMEN

El objetivo de este estudio era analizar el movimiento del agua en hojas de arroz (*Oryza sativa* L.) regadas y no regadas desde el xilema hasta los estomas mediante simulaciones numéricas. Utilizando modelos tridimensionales, fue posible determinar cómo el espaciado de las células del parénquima y la permeabilidad de estas células influyen en el flujo apoplástico y en la apertura de los estomas. El grosor de la cutícula y el número de haces vasculares son mayores en las plantas sometidas a estrés hídrico. Además, las simulaciones numéricas revelaron que la apertura de los estomas, la permeabilidad de las células del parénquima y el espaciado entre células tienen un impacto significativo en la pérdida de energía y en la velocidad de movimiento del agua. Se observó que unos estomas más abiertos facilitan el flujo de agua, reduciendo la resistencia y la energía necesaria para el transporte, mientras que unos niveles más altos de permeabilidad reducen la pérdida de energía, lo que indica que un tejido más permeable permite un transporte de agua más eficiente. Además, se observó que la apertura estomática, la permeabilidad del parénquima y el espaciado entre células son factores cruciales en la gestión eficiente del agua por las plantas, especialmente en condiciones de estrés hídrico. Estos conocimientos son esenciales para desarrollar estrategias de gestión agrícola más eficaces y para obtener variedades vegetales más resistentes a las condiciones de cultivo adversas.

Keywords:
Irrigated agriculture
Sustainable agriculture
Water efficiency
Food security

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the movement of water in irrigated and non-irrigated rice (*Oryza sativa* L.) leaves from the xylem to the stomata by means of numerical simulations. Using three-dimensional models, it was possible to determine how parenchyma cell spacing and permeability of these cells influence apoplastic flow and stomata opening. Cuticle thickness and the number of vascular bundles is greater in water-stressed plants. In addition, numerical simulations revealed that stomata opening, parenchyma cell permeability and cell spacing have a significant impact on energy loss and water movement velocity. It was observed that more open stomata facilitate water flow, reducing resistance and energy required for transport, while higher levels of permeability reduce energy loss, indicating that more permeable tissue allows more efficient water transport. Furthermore, stomatal aperture, parenchyma permeability and cell spacing were found to be crucial factors in efficient water management by plants, especially under water stress conditions. This knowledge is essential for developing more effective farm management strategies and for breeding plant varieties that are more resistant to adverse growing conditions.

[1]Graduate Program in Agronomy, Federal University of Goiás, Goiânia, Goiás, Brazil. ORCID: 0000–0001-9399–4478; ORCID: 0000–0002-8916–9034; ORCID: 0000-0003-0305-1447
[2]School of Agronomy, Federal University of Goiás, Goiânia, Goiás, Brazil . ORCID: 0000-0003-3182-0741
*Corresponding author: marcio.mesquita@ufg.br

El movimiento del agua en las plantas se produce a través del xilema, desde las raíces hasta las hojas, donde el agua se pierde en forma de vapor a la atmósfera a través de los estomas en un proceso conocido como transpiración (Gessler 2021). Entender este movimiento a un nivel detallado es un reto debido a la complejidad estructural del sistema vascular de las plantas y a la naturaleza microscópica de los procesos implicados (de Araujo et al. 2021; de Moraes et al. 2022). La complejidad estructural de las hojas dificulta la comprensión del transporte de agua. Actualmente, la teoría aceptada es que el agua, en su estado líquido, se mueve predominantemente desde los conductos del xilema a través del pecíolo, luego a través de la vaina del haz, el parénquima, el mesófilo y/o las células epidérmicas antes de evaporarse en el espacio de aire intercelular y finalmente difundirse a través de los estomas fuera de la hoja (Xiong and Nadal 2020).Los estudios sobre el movimiento del agua en las hojas de las plantas se han basado en modelos teóricos o experimentos que no logran captar plenamente la complejidad y heterogeneidad de los tejidos vegetales (Sakurai and Miklavcic 2021; Salomón et al. 2021; Scoffoni et al. 2023). Los estudios han dividido la resistencia de las vías apoplástica, simplástica y en fase gaseosa para el transporte de agua fuera de la vaina del haz y han concluido que la vía apoplástica es más activa en el movimiento en la mayoría de las condiciones, la vía simplástica tiene una contribución menor y la fase gaseosa gana importancia con el aumento de la temperatura de la hoja (Buckley et al. 2015). Sin embargo, la partición de la resistencia de las estructuras, la influencia hidrodinámica y la variabilidad que componen la hoja no está cuantificada (Buckley et al. 2015, 2017; Xiong and Nadal 2020). Earles et al. (2019) destacan cómo los recientes avances en tecnologías de imagen y computación están revolucionando la capacidad de modelar y simular la anatomía de las hojas en 3D, proporcionando una comprensión más profunda y detallada de los procesos biofísicos internos de las hojas. Junto con la modelización en 3D, el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para simular el comportamiento del fluido en el sistema vascular de las plantas ha ayudado a comprender las condiciones hidrodinámicas imperantes en las estructuras del sistema vascular (de Araujo et al. 2021; Schulte et al. 2015; Xu et al. 2023). Así, se objetivó simular numéricamente, aplicando la fluidodinámica computacional, el flujo de agua en las hojas de arroz, desde el xilema hasta los estomas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Plantas de [*Orysa sativa* L. (cv. IAC-164)] fueron colectadas en la plataforma de fenotipaje SITIS (Sistema Integrado de Tratamiento Inducido por Sequía). Había nueve plantas de regadío y nueve plantas de secano. Las plantas se cultivaron en condiciones nutricionales ideales para eliminar la influencia de estos factores en las características fisiológicas y anatómicas desde la plantación hasta el inicio de la maduración.

El análisis de las características anatómicas foliares de plantas para la caracterización microscópica se realizó en la región central del limbo. Seleccionó la tercera hoja contando a partir del ápice, se aseguró de que eran hojas maduras e intactas. Este procedimiento se repitió en tres plantas diferentes para garantizar la representatividad y exactitud de los datos. Se obtuvieron secciones transversales y longitudinales, de entre 10 y 14 micrómetros de grosor, utilizando un micrótomo rotatorio Leica 2035 BIOCUT. El registro y los análisis se realizaron utilizando el módulo de Fisiología del software Zeiss AxioVision Rel.4.8.2. Las descripciones anatómicas siguieron el guión y la terminología propuestos por Ellis (1976, 1979).

Los cálculos tridimensionales y la malla numérica se prepararon con el software ICEM-CFD (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, EE.UU.). El flujo depende de las ecuaciones de conservación en estado estacionario de la masa y el momento en un fluido. En el modelo, se consideró que el dominio del fluido era agua, con una intensidad turbulenta media del 5%, una temperatura de 25 °C, una densidad del fluido de 997 kg m^{-3} y una viscosidad del fluido de 0,9-10^{-3} Pa s^{-1}. Se adoptó el modelo de transporte por esfuerzo cortante (SST) para obtener una solución a las ecuaciones de gobierno. El número de interacciones en cada simulación osciló entre 50 y 100, lo que generó errores residuales inferiores a 10^{-6}. Como condiciones de contorno, se definió una presión cero en la salida del modelo y una velocidad de flujo de 0,5 mm s^{-1} para analizar los efectos resistivos de las estructuras anatómicas sobre el flujo.

Las análisis de varianza de los datos se realizaron mediante la prueba de distribución F (P<0,05); se aplicó la prueba de Chi cuadrado para evaluar la distribución de las características anatómicas de los vasos y la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la frecuencia de los valores. Las características anatómicas del análisis factorial de la varianza y las diferencias se determinó mediante la prueba de Tukey (P<0,05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra una comparación de las características anatómicas de las hojas entre las plantas sometidas a los dos tratamientos. Sólo dos variables mostraron diferencias significativas entre tratamientos: el grosor de la cutícula y el número de haces vasculares, siendo ambos mayores en las plantas estresadas. Las otras variables, incluyendo los espesores de la epidermis y del mesófilo, las áreas de los haces vasculares y del esclerénquima, y la distancia entre haces, no mostraron diferencias significativas, sugiriendo que estas características no se ven sustancialmente afectadas por el estrés hídrico en las condiciones estudiadas.

Tabla 1. Comparación de las características anatómicas foliares de plantas de arroz regadas y no regadas.

Variable	Tratamiento		Significación
	No Regado	Regado	
Espesor de la Cutícula ((µm)	0,19	0,12	**
Espesor de la epidermis en la cara abaxial (µm)	0,45	0,39	ns
Espesor de la epidermis en la cara adaxial (µm)	0,55	0,42	ns
Espesor del mesófilo (µm)	5,51	5,64	ns
Número de haces vasculares	5,78	4,67	**
Área del haz vascular (1er y 3er orden) (µm^2)	3.506,79	2.960,75	ns
Diámetro del elemento vascular en el metaxilema (µm)	64,40	56,10	ns
Elementos de los vasos del metaxilema (µm)	8,64	8,77	ns
Distancia entre haces vasculares (µm)	1303,56	1128,02	ns
Área del esclerénquima en los FV de 1er orden (µm^2)	197,29	232,84	ns
Área del esclerénquima en los FV de 3er orden (µm^2)	226,70	222,80	ns
Área del parénquima (µm^2)	67,30	69,28	ns
Distancia entre haces vasculares de 1er orden (µm)	0,19	0,12	**

Las plantas expuestas a entornos estresantes, como el déficit hídrico, suelen mostrar un aumento del grosor de la cutícula. Se trata de una respuesta protectora que ayuda a reducir la pérdida de agua a través de la transpiración. Kosma et al. (2009) estudiaron el impacto de la falta de agua en los lípidos de la cutícula de las hojas de Arabidopsis y descubrieron que las plantas sometidas a déficit hídrico experimentaban un aumento significativo de los lípidos cuticulares de las hojas, lo que daba lugar a una cutícula más gruesa. Akram et al. (2016) estudiaron plantas de rábano en condiciones de estrés hídrico y descubrieron que el estrés hídrico aumentaba el grosor de la epidermis de la hoja, un componente clave de la cutícula. Las condiciones de estrés también pueden afectar a la estructura y función de los haces vasculares de las plantas. Bajo estrés hídrico, las plantas pueden mostrar cambios en la anatomía de los tejidos vasculares para hacer frente a una menor disponibilidad de agua (de Araujo et al., 2021). Shehzadi et al. (2019) comprobaron los cambios en algunos atributos fisicoquímicos y características anatómicas de plantas de avena bajo estrés hídrico y observaron cambios significativos en el área del haz vascular del tallo. En arroz, Sabbour (2002) trató de determinar el efecto del estrés por salinidad en las características anatómicas de las hojas y encontró cambios similares en las características del haz vascular en condiciones de estrés. La falta de diferencias significativas en algunas características anatómicas bajo estrés puede atribuirse a estabilidad anatómica, adaptaciones específicas de la especie o limitaciones en la plasticidad anatómica y reordenamientos de los polisacáridos de la pared celular (Xiong and Nadal 2020).

Moreno-Sotomayor et al. (2002) encontraron que ciertas características anatómicas de las plantas, como el grosor de la epidermis y el mesófilo, pueden permanecer estables a pesar de las variaciones en las condiciones de estrés, lo que sugiere una resistencia inherente o la capacidad de mantener ciertas funciones fisiológicas a pesar de los cambios en las condiciones ambientales. A partir de ellas, fue posible definir las características anatómicas (Figura 1) para construir el modelo geométrico del estudio.

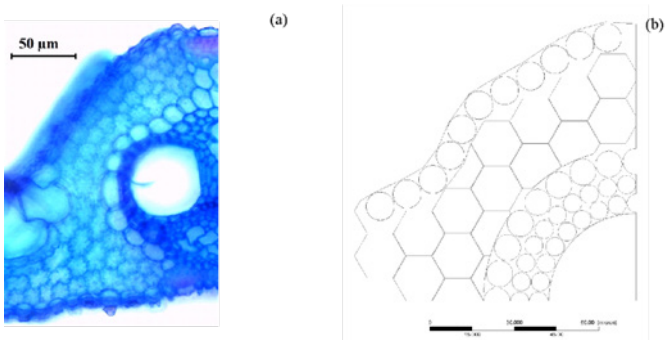


Figura 1. (a) Micrografía de la región central de la hoja de arroz de una planta de regadío. (b) Modelo geométrico de las estructuras anatómicas de la hoja de arroz.

La Figura 2 muestra los resultados numéricos de las simulaciones del movimiento del agua en las hojas de arroz, desde el xilema hasta los estomas, utilizando un modelo geométrico específico. Los datos mostrados reflejan el comportamiento de los fluidos dentro de la estructura de la hoja en condiciones definidas de espaciado celular, apertura estomática y permeabilidad celular.

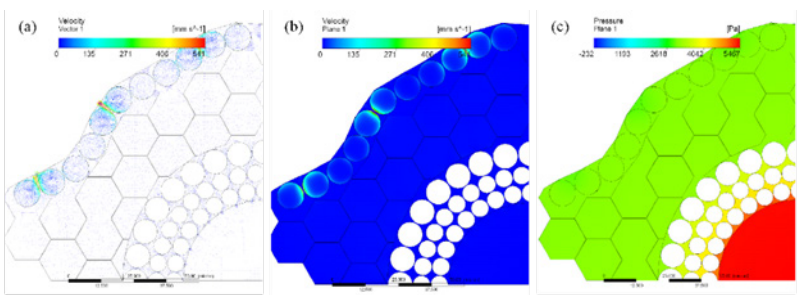


Figura 2. Predicciones numéricas de los campos y vectores de velocidad (a, b) y presión (c) generados en los modelos geométricos del movimiento del agua en las hojas de arroz desde el xilema hasta los estomas con un espaciado entre células de parénquima de 0,1 µm, una apertura de los estomas de 0,1 µm y una permeabilidad celular del 10%.

Las figuras 2a y 2b muestran los vectores de velocidad en la zona considerada. Cada flecha indica la dirección y la magnitud del movimiento del agua dentro del tejido foliar. Se observa un aumento de la velocidad del agua desde el xilema hasta los estomas. Esto sugiere que existe una aceleración del agua a medida que se acerca a la superficie de la hoja para transpirar. No existen estudios que registren este comportamiento hidrodinámico, sin embargo, Joshi et al. (2022) encontraron en otras estructuras que en sistemas de fluidos de alta velocidad, el aumento de la velocidad del líquido puede conducir a transiciones de régimen de flujo, afectando la formación de burbujas y la distribución del líquido.

CONCLUSIÓN

La simulación numérica demostró ser adecuada para el estudio del análisis del flujo en las hojas de arroz, de forma concurrente revelaron que la apertura de los estomas, la permeabilidad de las células del parénquima y el espaciado entre células tienen un impacto significativo en la pérdida de energía y la velocidad de movimiento del agua en las hojas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo del Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Brasil (Números de subvención: 312854/2023-4 y 420516/2023-9).

REFERENCIAS

Akram N, Shafiq S, Ashraf M, Aisha R and Sajid M (2016) Drought-induced anatomical changes in radish (*Raphanus sativus* L) leaves supplied with trehalose through different modes Arid Land Research and Management 30: 412–420.

Buckley TN, John GP, Scoffoni C and Sack L (2015) How does leaf anatomy influence water transport outside the xylem? Plant Physiology 168(4): Article 4.

Buckley TN, John GP, Scoffoni C and Sack L (2017) The sites of evaporation within leaves. Plant Physiology 173(3): 1763–1782.

de Araujo DS, de Moraes DHM, Mesquita M, Flores RA, Battisti R, Santos GG, de Deus F P and Ferrarezi RS (2021) Numerical modeling of microfluid dynamics in xylem vessels of *Khaya grandifoliola*. Water 13(19): Article 19.

de Moraes DHM, Mesquita M, Graciano-Ribeiro D, de Araújo DS, Battisti R, Flores RA, de Melo HC and Casaroli D (2022) The effect of xylem vessel diameter on potential hydraulic conductivity in different rice stem longitudinal positions. Flora 295: 152147.

Earles JM, Buckley TN, Brodersen CR, Busch FA, Cano FJ, Choat B, Evans JR, Farquhar GD, Harwood R, Huynh M, John GP, Miller ML, Rockwell FE, Sack L, Scoffoni C, Struik P C, Wu A, Yin X and Barbour MM (2019) Embracing 3D complexity in leaf carbon–water exchange. Trends in Plant Science 24(1): 15–24.

Ellis RP (1976) A procedure for standardizing comparative leaf anatomy in the Poaceae I. The leaf-blade as viewed in transverse section. Bothalia 12(1): Article 1.

Ellis RP (1979) A procedure for standardizing comparative leaf anatomy in the Poaceae II. The epidermis as seen in surface view. Bothalia 12(4): Article 4.

Gessler A (2021) Water transport in trees—The importance of radial and circumferential transport. Tree Physiology 41(12): 2245–2247.

Joshi J, Stocker BD, Hofhansl F, Zhou S, Dieckmann U and Prentice IC (2022) Towards a unified theory of plant photosynthesis and hydraulics. Nature Plants 8: 1304–1316.

Kosma D, Bourdenx B, Bernard A, Parsons EP, Lü S, Joubès J and Jenks M (2009) The impact of water deficiency on leaf cuticle lipids of arabidopsis1[W][OA]. Plant Physiology 151: 1918–1929.

Moreno-Sotomayor A, Weiss A, Paparozzi E and Arkebauer T (2002) Stability of leaf anatomy and light response curves of field grown maize as a function of age and nitrogen status. Journal of Plant Physiology 159: 819–826.

Paiva JGA de, Fank-de-Carvalho SM, Magalhães MP and Graciano-Ribeiro D (2006)

Sabbour A (2002) Anatomical studies on rice (*Oryza sativa* L) plants grown under different levels of salinity and treated with paclobutrazol and gibberllin. Journal of Plant Production

Sakurai G and Miklavcic SJ (2021) On the efficacy of water transport in leaves a coupled xylem-phloem model of water and solute. Transport Frontiers in Plant Science 12.

Salomón RL, De Roo L, Bodé S, Boeckx P and Steppe K (2021) Efflux and assimilation of xylem-transported CO_2 in stems and leaves of tree species with different wood anatomy. Plant, Cell and Environment 44(11): 3494–3508.

Schulte PJ, Hacke UG and Schoonmaker AL (2015) Pit membrane structure is highly variable and accounts for a major resistance to water flow through tracheid pits in stems and roots of two boreal conifer species. New Phytologist 208(1): 102–113.

Scoffoni C, Albuquerque C, Buckley TN and Sack L (2023) The dynamic multi-functionality of leaf water transport outside the xylem. New Phytologist 239(6): 2099–2107.

Shehzadi A, Akram N, Ali A and Ashraf M (2019) Exogenously applied glycinebetaine induced alteration in some key physio-biochemical attributes and plant anatomical features in water stressed oat (*Avena sativa* L) plants. Journal of Arid Land 11: 292–305.

Xiong D and Nadal M (2020) Linking water relations and hydraulics with photosynthesis. The Plant Journal 101(4): 800–815.

Xu, T, Li, Z, Bao, S, Su, Y, Su, Z, Zhi, S, and Zheng, E (2023) Xylem vessel type and structure influence the water transport characteristics of Panax notoginseng. Plos One 18(3): e0281080

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Evaluación de sistemas de cosecha de agua lluvia para riego agrícola en Colombia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluation of rainwater harvesting systems for agricultural irrigation in Colombia

Zaray Valentina Jimenez Hernandez[1] and Julio César Arango Tobón[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Cosecha de agua lluvia
Gestión hídrica
Riego agrícola
Seguridad alimentaria
Sostenibilidad

Este estudio evalúa la viabilidad de implementar sistemas de cosecha de agua lluvia con fines agrícolas en Colombia, considerando su potencial para enfrentar la presión sobre los recursos hídricos y mejorar la seguridad alimentaria rural. Se empleó un enfoque técnico y analítico, basado en información oficial, datos hidrometeorológicos y cartográficos, junto con criterios de vocación del suelo, disponibilidad hídrica, infraestructura de riego y políticas nacionales. Los resultados destacan que regiones como la Andina (especialmente Antioquia) presentan condiciones favorables por su régimen de lluvias y cultivos de alta demanda hídrica. En La Guajira, se configura como un imperativo humanitario frente a sequías y desertificación, y en zonas como el Pacífico y la cuenca del Atrato, es relevante para el consumo humano. La valoración ambiental muestra impactos mayoritariamente positivos y existen oportunidades de financiamiento público y comunitario. La cosecha de agua lluvia se presenta como una alternativa sostenible y complementaria al riego convencional, impulsable mediante políticas públicas.

ABSTRACT

Keywords:
Rainwater harvesting
Water management
Agricultural irrigation
Food security.
Sustainability

This study assesses the feasibility of implementing rainwater harvesting systems for agricultural purposes in Colombia, considering their potential to address pressure on water resources and improve rural food security. A technical and analytical approach was employed, based on official information, hydrometeorological and cartographic data, along with criteria such as land use suitability, water availability, irrigation infrastructure, and national policies. The results highlight that regions like the Andean zone (especially Antioquia) offer favorable conditions due to their rainfall patterns and the presence of high water-demand crops. In La Guajira, rainwater harvesting is framed as a humanitarian imperative in the face of droughts and desertification, while in areas such as the Pacific and the Atrato River basin, it is also relevant for human consumption. Environmental assessments show mostly positive impacts, and there are opportunities for public and community-based funding. Rainwater harvesting emerges as a sustainable and complementary alternative to conventional irrigation, which can be promoted through public policy.

[1]Estudiante. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín Colombia. zjimenez@unal.edu.co
[2]Docente. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jcarango@unal.edu.co

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

El agua es un recurso estratégico para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental en Colombia. Aunque el país posee abundantes recursos hídricos, la irregularidad espacial y temporal de las lluvias genera períodos de déficit y exceso. En este contexto, la cosecha de agua lluvia se presenta como una estrategia viable, sostenible y de bajo impacto ambiental para recolectar, almacenar y utilizar el agua proveniente de las precipitaciones. Esta técnica, que tiene sus raíces en principios ancestrales y ha sido revitalizada por los retos del cambio climático, puede suplir necesidades de riego, mejorar la eficiencia en el uso del agua y fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas.

En Colombia, solo el 6% de las tierras aptas para uso agropecuario están cubiertas por distritos de riego formales (MADR 2020), según el Informe de la Encuesta Nacional Agropecuaria, el 70% de los predios de la región andina no cuenta con ningún sistema formal de riego (DANE 2019), a pesar de presentar una alta concentración de tierras con vocación agrícola. Esto hace urgente la adopción de soluciones alternativas como la cosecha de agua lluvia. Este trabajo evalúa la viabilidad técnica, económica y ambiental de esta práctica, con un enfoque en las regiones de Antioquia y La Guajira, y analiza mecanismos de financiamiento y experiencias previas en el Pacífico y el Atrato. El objetivo es proponer un diseño ajustado a las condiciones locales para mejorar la productividad rural, la conservación ambiental y la equidad en el acceso al recurso hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en Colombia con un enfoque regional y un caso aplicado en el departamento de Antioquia. Para la evaluación de la viabilidad de los sistemas de cosecha de agua lluvia se emplearon diferentes fuentes de información: bases de datos hidrometeorológicas del IDEAM, información cartográfica oficial del IGAC y datos agroproductivos de la UPRA y el DANE. El análisis regional consideró las cinco principales regiones del país (Andina, Caribe, Orinoquía, Pacífica y Amazonía), tomando como criterios la vocación del suelo, la precipitación media anual, la cobertura de infraestructura de riego y la disponibilidad legal del recurso hídrico, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 1. Viabilidad de cosecha de agua para agricultura por región.

Región	Viabilidad	Justificación principal
Andina	Muy alta	Alta vocación, lluvias variables, cultivos intensivos, presión sobre el suelo.
Caribe	Alta	Vocación agrícola + sequías recurrentes, baja eficiencia hídrica.
Orinoquía	Media-alta	Expansión agrpécuaria, estacionalidad hídrica, baja infraestructura.
Pacífica	Media	Alta precipitación, uso limitado pero útil localmente.
Amazonía	Baja	Vocación forestal, intervenciones puntuales.

En el caso de Antioquia, se caracterizaron 42 distritos de riego de pequeña escala, mientras que para La Guajira se caracterizaron 20, analizando variables como distribución territorial, superficie beneficiada, estado de operación, disponibilidad legal de agua y diversidad de cultivos.

Paralelamente, se realizó el análisis a un diseño técnico de un sistema de cosecha de agua lluvia aplicado a un cultivo de flores bajo invernadero. Para ello se delimitó el área de estudio (12,7 ha), se calculó la superficie de captación (techos de invernaderos), se estimó la demanda hídrica del cultivo y del personal vinculado y costos para la inversión inicial.

Los cálculos incluyeron: (i) precipitación semanal con una probabilidad de excedencia del 75% a partir de series históricas de 47 años, (ii) precipitación efectiva considerando el 70% de aprovechamiento, (iii) pérdidas por evaporación estimadas con registros de 37 años, y (iv) balance hídrico semanal, comparando el volumen captado con la demanda agrícola y humana.

Se utilizaron metodologías de análisis estadístico en Excel y sistemas de información geográfica (Google Earth Pro) para delimitar áreas de captación y almacenamiento.

El impacto ambiental fue evaluado mediante la aplicación de la matriz de Conesa, identificando impactos positivos y negativos asociados a la implementación de los sistemas como se observa en la Tabla 2. Finalmente, se incluyó un

Tabla 2. Matriz conesa aplicada a la evaluación de impactos ambientales en sistema de cosecha de agua (elaboración propia).

MATRIZ CONESA PROYECTO COSECHA DE AGUA													
IMPACTO	NAT	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	IMPORTANCIA	IMPACTO
Reducción en la extracción de	Positivo (+)	8	1	4	4	2	2	1	4	4	4	51	Neutro
Disminución de la erosión	Positivo (+)	4	2	4	4	2	2	1	4	4	4	41	Neutro
Adaptación al cambio climático	Positivo (+)	8	4	2	4	2	2	1	4	4	4	55	Neutro
Mejora en calidad de vida y	Positivo (+)	4	4	2	4	2	2	1	4	4	4	43	Neutro
Fomento del uso sostenible del	Positivo (+)	8	4	2	4	2	2	1	4	4	4	55	Neutro
Protección indirecta de	Positivo (+)	2	2	2	4	2	2	1	4	4	4	33	Neutro
Reducción de transporte de	Positivo (+)	2	2	4	4	2	1	1	4	4	4	34	Neutro
Alteración del escurrimiento	Negativo (-)	2	2	2	4	2	2	1	4	4	2	19	Inferior
Contaminación del agua	Negativo (-)	4	2	4	4	4	2	1	4	4	2	17	Inferior
Riesgo de compactación o	Negativo (-)	4	2	4	4	2	1	1	4	2	4	14	Inferior
Generación de residuos sólidos	Negativo (-)	2	2	4	2	1	1	1	4	2	1	14	Inferior
Alteración de microhábitats por	Negativo (-)	4	2	4	2	2	2	1	4	1	2	10	Inferior
Uso de energía para bombeo	Negativo (-)	2	2	4	4	2	1	1	4	4	2	20	Inferior

análisis de posibles fuentes de financiamiento público del país, para la implementación de estos sistemas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis regional mostró que la viabilidad de la cosecha de agua lluvia en Colombia es diversa según las condiciones climáticas y productivas. En la Región Andina, especialmente en Antioquia, existe un alto potencial por la combinación de alta pluviosidad, vocación agrícola y baja cobertura de riego; en la Caribe, con énfasis en La Guajira, la captación es crucial no solo para la agricultura, sino también para el consumo humano ante sequías extremas; en la Orinoquía, la estacionalidad de las lluvias la convierte en una opción para sostener cadenas emergentes; mientras que en el Pacífico y el Atrato la cosecha es fundamental para la potabilización frente a la contaminación por mercurio. En la Amazonía, su rol es limitado y focalizado en comunidades indígenas.

El análisis del sistema de cosecha de agua lluvia en un cultivo de flores de 12,7 ha en el municipio de Rionegro (Antioquia) evidenció que la captación desde techos de 19 invernaderos constituye una fuente importante de abastecimiento. Se calcularon la precipitación con 75% de probabilidad de excedencia, la precipitación efectiva, pérdidas por evaporación y el volumen realmente captado. El balance hídrico mostró que el lago actual (7.250 m³) funciona la mayor parte del año, pero es insuficiente en las primeras 15 semanas, llegando a vaciarse en la semana 12, mientras que en temporada lluviosa genera excedentes de más de 11.000 m³ que no pueden almacenarse.

En lo económico, la inversión inicial se calculó con base en precios oficiales (INVÍAS 2025-1), incluyendo excavación, reservorio, limpieza y bombeo. El sistema se considera viable, pues disminuye costos por agua externa, aumenta la resiliencia frente a la variabilidad climática y aporta autonomía en el suministro hídrico.

La evaluación ambiental indicó impactos positivos predominantes, como reducción de presión sobre fuentes hídricas y adaptación al cambio climático, con

único impacto negativo moderado en el escurrimiento. En el plano económico, aunque la inversión inicial es significativa, el sistema resulta rentable al reducir costos de agua externa y aumentar la resiliencia productiva; sin embargo, persisten barreras de financiamiento y sostenibilidad.

CONCLUSIÓN

La cosecha de agua lluvia se confirma como una opción técnica, económica y ambientalmente viable para enfrentar la escasez hídrica y la variabilidad climática en Colombia. Su implementación puede reducir la presión sobre fuentes convencionales, aumentar la eficiencia en el uso del agua y fortalecer la resiliencia productiva en zonas rurales.

En Antioquia, esta práctica puede ampliar la cobertura de riego especialmente en zonas con déficit hídrico, mientras que en La Guajira, es un imperativo tanto humanitario como cultural. En las regiones del Pacífico y el Atrato, la cosecha se convierte en una solución sanitaria frente a la contaminación por mercurio.

Los estudios de caso han demostrado que un diseño adecuado de los sistemas de almacenamiento es clave para cubrir la demanda anual y reducir las pérdidas durante las temporadas lluviosas. Los impactos ambientales son mayormente positivos, y su consolidación depende del respaldo político, financiamiento rural y estandarización técnica. En este contexto, la cosecha de agua lluvia se proyecta como una herramienta clave para la justicia social, la adaptación climática y el desarrollo rural sostenible en Colombia.

REFERENCIAS

Arango JC & C Salazar (2008). Métodos de riego en cultivos bajo cobertizo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín 210 p.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE (2019) Encuesta Nacional Agropecuaria – II semestre 2019. hhtps://wwwdanegovco

Geoflora (2024) Reservorio de agua. Octubre 15 https://geofloraco/es/reservorio-de-agua/

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2014) Mapa de precipitación decadal promedio multianual. https://wwwideamgovco

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2022) Boletín climático anual. https://wwwideamgovco

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2022) Atlas climatológico de Colombia IDEAM, Bogotá. 380 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (2012) Mapa de vocación de uso de las tierras de Colombia. https://wwwigacgovco

Jaramillo A and Chaves B (2000) Regionalización climática de la precipitación en Colombia Cenicafé 51(2): 102–113.

Jofre R (2015) Calidad del agua de la niebla captada artificialmente en la microcuenca del río Pixquiac, Veracruz, México. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas 18(1): 24–32.

López-Hernández NA (2017) Captación y aprovechamiento de aguas lluvias. Editorial Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR (2018) Programa de Desarrollo Rural con Equidad (DRE).

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR (2020) Plan Nacional de Riego y Drenaje. Resolución 091 de 2020 MADR, Bogotá 65 p.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR (2025) Incentivo de Capitalización para la Gestión de Riesgos Agropecuarios.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS (2022) Lineamientos para el aprovechamiento de agua lluvia en Colombia.

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Evaluación de peligros asociados a la calidad del agua de riego en el distrito Roldanillo, La Unión y Toro - RUT, Colombia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Assessment of hazards associated with irrigation water quality in the RUT district, Colombia

Leonardo Castillo Sánchez[1], María del Mar Carreño Sánchez[2]*, Andrés Fernando Echeverri Sánchez[2]

Palabras clave:
Calidad del agua
Degradación química de suelos
Distrito de riego
Gestión de agua agrícola
Peligro microbiológico

RESUMEN

El Distrito de Riego RUT, con 10.250 ha agrícolas, enfrenta una reducción en la productividad y aumento en los costos operativos de riego, razón por la cual este estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua utilizada. Mediante tres campañas de muestreo puntuales en trece puntos distribuidos en cuatro zonas se analizaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los resultados revelaron peligro "Alto" microbiológico, por corrosión y taponamiento de emisores debido a altas concentraciones de Fe^{2+} y SST, así como degradación química de suelos por Na^{+}. Se concluye que la calidad del agua compromete la eficiencia del riego, recomendándose acciones correctivas y monitoreo constante.

Keywords:
Water quality
Chemical degradation of soils.
Irrigation district
Agricultural water management
Microbiological hazard

ABSTRACT

The RUT Irrigation District, comprising 10,250 hectares of agricultural land, is facing a decline in crop productivity and increased operational irrigation costs. This study aimed to assess the physicochemical and microbiological quality of the irrigation water through three sampling campaigns conducted at thirteen points across four zones. Physicochemical and microbiological parameters were analyzed. The results revealed a high microbiological hazard, as well as hazard of corrosion and emitter clogging due to elevated concentrations of Fe^{2+} and total suspended solids (TSS), along with soil chemical degradation associated with high sodium (Na^{+}) levels. It is concluded that water quality is compromising irrigation efficiency, and corrective actions along with continuous monitoring are recommended.

[1]Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de los Municipios de Roldanillo, La Unión y Toro, Valle del Cauca, Colombia.
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-6083-5639
[2]Escuela EIDENAR, Grupo de Investigación Gestión Integral del Recurso Agua para el Desarrollo Agrícola, Universidad del Valle, Colombia.
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3387-6891); ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8477-9773
*Corresponding author: maria.delmar.carreno@correounivalle.edu.co

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

En Colombia, persisten problemas relacionados con la escasez y calidad del agua, a pesar de contar con una normativa robusta. Factores como la deficiente administración y los problemas socioeconómicos dificultan su adecuada gestión (Cardona-Almeida and Suárez 2024). El Distrito de riego RUT, una de las zonas agrícolas más productivas del país, utiliza agua proveniente del río Cauca y de efluentes de sistemas de tratamiento municipales. Ambas fuentes presentan deficiencias: el río Cauca recibe contaminantes de diversos municipios (Galvis et al. 2018), mientras que los sistemas de tratamiento evidencian deterioro en su infraestructura. Esta situación compromete la calidad del agua usada para el riego de unas 2.951 ha de cultivos, generando mayores costos operativos y restricciones en la exportación.

La calidad del agua destinada al riego constituye un factor determinante para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, ya que su composición química y microbiológica puede generar impactos adversos en diversos componentes del sector agrícola. Altas concentraciones de sales solubles, elementos traza o sustancias que provocan incrustación y corrosión afectan negativamente los suelos, cultivos, infraestructura y salud humana. Para evaluar estos impactos se consideran generalmente parámetros microbiológicos (FAO and WHO, 2021) y fisicoquímicos (Shah et al. 2018; Rosa and Aguilar 2016). En respuesta a estos desafíos, este estudio tuvo como objetivo evaluar los peligros potenciales asociados al agua de riego en el Distrito RUT, considerando su variabilidad espacial y temporal. Además, de proporcionar información para orientar decisiones técnicas y de gestión hídrica en contextos similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Distrito RUT y puntos de muestreo

El Distrito RUT, ubicado al norte del Valle del Cauca entre la cordillera Occidental y el río Cauca, abarca 10.243 ha en los municipios de Roldanillo, La Unión y Toro. Administrado por ASORUT, beneficia a unos 1.200 agricultores y está delimitado por el Canal Interceptor Ambiental, el dique de protección marginal y el Canal Principal de Drenaje. Se establecieron trece puntos de muestreo a lo largo del Distrito RUT, definidos según la infraestructura hidráulica, los vertimientos y el uso del suelo. Los muestreos se realizaron en tres periodos (noviembre 2021, junio y octubre 2022) para representar distintas condiciones hidrológicas, y el área se dividió en las zonas a, b, c y d para su análisis, de manera que los resultaron se promediaron por cada zona.

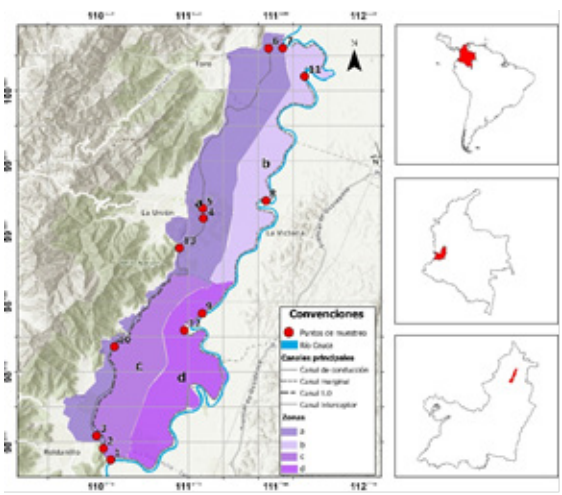


Figura 1. Localización del Distrito RUT y puntos de muestreo.

Parámetros seleccionados

La Tabla 1 presenta los tipos de peligro evaluados y sus parámetros asociados, definidos a partir de la literatura y criterios técnicos específicos. Los resultados de laboratorio fueron validados mediante balance iónico y comparación con valores de CEw, aceptando un margen de error del 15% (Mageshkumar & Vennila 2020).

Tabla 1. Parámetros en la estimación de peligros asociados a la calidad del agua usada en riego.

Tipo de peligro		Parámetro	Categoría	Nivel de peligro	Fuente
Suelo	Salinidad	Conductividad eléctrica del agua (CEw) (dS m^{-1}) / Solubilidad de sales ($mmol_c$ L^{-1})	0 - 0,25 / >5000 0 - 0,25 / 1000-5000 0 - 0,25 / <1000 0,25 - 0,7 / >5000 0,25 - 0,7 / 1000-5000 0,25 - 0,7 / <1000 0,7 – 3,0 / >5000 0,7 – 3,0 / 1000-5000 0,7 – 3,0 / <1000 >3,0 / >5000 >3,0 / 1000-5000 >3,0 / <1000	Muy bajo Bajo Bajo Bajo Medio Medio Medio Medio Alto Alto Alto Muy alto	(Echeverri Sánchez et al. 2016)
		CEw (dS m^{-1})	0 - 0,7 0,7 - 3 >3	Bajo Medio Alto	(Ayers & Westcot 1985)
	Sodicidad	Requerimiento de yeso (g m^{-3})	0 0 - 86 86 - 215 215 - 387 >387	Muy bajo Bajo Medio Alto Muy alto	(Villafañe 2011)
Cultivo	Toxicidad por iones específicos	Cloruros (mg L^{-1})	0 – 213 213 – 355 > 532.5	Bajo Medio Alto	KR Singh et al. (2019); Tartabull & Betancourt (2016)
		Relación de adsorción de sodio (RAS) (meq L^{-1})	RAS<3 3 - 9 RAS>9	Bajo Medio Alto	(Ayers & Westcot 1985)
		Hierro (Fe^{2+}) (mg L^{-1})	Fe < 5.0 5.0 ≤ Fe ≤ 20.0 Fe > 20.0	Bajo Medio Alto	(Department of Water Affairs and Forestry 1996; Simsek & Gunduz 2007)
		Manganeso (mg L^{-1})	Mn < 0,2 0,2 ≤ Mn ≤ 10,0 Mn > 10,0	Bajo Medio Alto	
Infraestructura de riego	Taponamiento de emisores	pH	<6,5 6,5– 8,4 >8,4	Bajo Medio Alto	Department of Water Affairs and Forestry (1996)
		Sólidos suspendidos totales (SST) (mg L^{-1})	<50 50 a 100 >100	Bajo Medio Alto	
		Sólidos Disueltos (SD) (mg L^{-1})	<500 500 a 2000 >2000	Bajo Medio Alto	
		Manganeso (Mn^{2+}) (mg L^{-1})	<0,1 0,1 a 1,5 >1,5	Bajo Medio Alto	
		Hierro (Fe^{2+}) (mg L^{-1})	<0,2 0,2 a 1,5 >1,5	Bajo Medio Alto	
	Incrustación o corrosión	Índice de langelier (LSI)	<-2 -2 <LSI<-0.5 -0.5 <LSI<0 LSI=0 0 <LSI< 0,5 0,5 <LSI< 2	Corrosión intolerable Corrosión severa No se forman incrustaciones, pero sí una ligera corrosión Neutral Corrosión marginal y formación de incrustaciones No corrosiva con formación de incrustaciones	(Anyango Bhowmick & Bhattacharya 2024)
Salud humana		Coliformes fecales (CF) (NMP 100 mL)	<100 100-1000 1000-10.000 10.000-100.000 >100.000	Muy bajo Bajo Medio Alto Muy alto	Adapado de (Ayers & Westcot 1985)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peligro de degradación de suelos

Los resultados del peligro de salinidad, evaluados mediante las metodologías de Ayers and Westcot (1985) y Echeverri (2016), coincidieron en clasificar el 95% de las muestras dentro del nivel de peligro "Bajo" o "Muy bajo" (Anexo 2). En particular, la Zona *c* presentó un peligro "Muy bajo", con un valor promedio de 0,24 dS m^{-1}. No obstante, a pesar de este peligro, se identificó la presencia de sales dominantes como bicarbonato de calcio y magnesio, cuya baja solubilidad (Villafañe 2011), puede generar precipitaciones en condiciones de pH alcalino reduciendo la disponibilidad de Ca^{2+} y Mg^{2+} frente al Na^{+} y elevando el índice RAS, lo cual afecta la disponibilidad de estos nutrientes esenciales para las plantas (Kundu et al. 2022). Asimismo, el cloruro de sodio, también frecuente, puede alterar la absorción hídrica y de nutrientes (Lu & Fricke 2023). En cuanto a la sodicidad, se registró un peligro "Medio" en las Zonas *a, b* y *d*, y un nivel "Alto" en la Zona *c*, con un requerimiento promedio de yeso de 257,12 g m^{-3}. El exceso de Sodio (Na^{+}) favorece la dispersión de arcillas, disminuyendo la infiltración, capacidad hidráulica y generando costras superficiales que interfieren con el desarrollo radicular (Birhane et al. 2021).

Peligro de toxicidad por iones específicos

Los resultados sobre la toxicidad por iones específicos indicaron que las concentraciones de Cloruro (Cl^{-}) y Sodio (Na^{+}) no alcanzan niveles significativos que puedan afectar los cultivos del Distrito RUT (Anexo 3). Los resultados de Manganeso (Mn^{2+}) muestran un peligro "Medio" en las Zonas *b* y *c*. Y en el caso del Hierro (Fe^{2+}) también predomina este peligro en las Zona *a, b* y *c.* Aunque el pH del suelo en el Distrito RUT varía entre ligeramente ácido (pH 6) y ligeramente alcalino (valores apenas superiores a 7), este factor por sí solo no limitaría de forma significativa la disponibilidad del Hierro (Fe^{2+}). Sin embargo, se identificó que las Zonas *a* y *b* presenta condiciones de drenaje deficientes, lo cual podría favorecer la acumulación de este ion en los cultivos (Lei et al. 2014). Y de manera similar el exceso de Hierro (Fe^{2+}) y Manganeso (Mn^{2+}) pueden inducir efectos tóxicos en las plantas, manifestándose como clorosis intervenal, necrosis en hojas jóvenes y deterioro del desarrollo radicular (Lee et al. 2011).

Peligro microbiológico

En las Zonas a y c, aproximadamente 50% del área del distrito, se presentó un peligro "Alto" (Anexo 4). En la segunda campaña de muestreo, se registraron concentraciones más elevadas siendo destacable el valor de 920.000 NMP 100 mL^{-1} (punto 6), posiblemente por haberse realizado durante un período de menor dilución. Este comportamiento podría explicarse porque, durante épocas de escasa precipitación, los caudales del Canal Interceptor Ambiental, ubicado en la Zona *a*, son más bajos y, en ocasiones, se restringe el bombeo del río Cauca, lo que incrementa la influencia de las plantas de tratamiento sobre el sistema. Sumado a lo anterior, estas concentraciones de CF también son atribuibles a que, a lo largo de este canal, se vierten aguas servidas sin tratamiento provenientes de aproximadamente 600 viviendas, cuyos desagües se dirigen directamente a la infraestructura de riego durante todo el año.

Peligro de daño a la infraestructura de riego y taponamiento

La Zona *a* presenta un pH en nivel de peligro "Medio", pero destaca por una concentración extremadamente alta de SST, lo que indica una turbidez crítica, así como un nivel "Alto" de Hierro (Anexo 5), factores que pueden afectar la infraestructura de riego y los cultivos. Esta condición es consistente con la elevada carga de sedimentos que arrastra el río Cauca, evidenciada en la acumulación dentro de la red de canales del Distrito. En contraste, la Zona *b* muestra bajos niveles de SST y SD, aunque concentra Hierro en nivel "Alto" y Manganeso en nivel "Moderado". La Zona *c* es la más comprometida, con pH ligeramente ácido, y valores críticos de hierro y manganeso, junto al IL más bajo, lo que sugiere una fuerte tendencia corrosiva. La Zona *d* presenta el perfil más favorable, con peligros "Bajos" por SST y SD, pero con hierro elevado y cierto potencial corrosivo. En general, el 64% de los puntos analizados se clasificaron en categoría de "Corrosión grave", especialmente en la Zona *c*, lo que podría deteriorar los componentes metálicos del sistema (Panday et al. 2021), reducir la eficiencia hidráulica y elevar los costos operativos. Además, los niveles de Fe^{2+} en el Distrito superan los límites aceptables, con la posibilidad de generar incrustaciones severas en sistemas RLAF (Muniz et al., 2023).

CONCLUSIÓN

La evaluación de la calidad del agua en el Distrito RUT evidenció la presencia de peligros significativos para la infraestructura de riego, especialmente relacionados con concentraciones elevadas de SST, Hierro (Fe^{2+}) y Manganeso (Mn^{2+}), los cuales superan los estándares establecidos y representan un peligro "Alto" de corrosión y obstrucción de emisores. Estos hallazgos resaltan la necesidad de implementar estrategias correctivas como la instalación de sistemas de filtración y el manejo químico del agua previo a su aplicación en campo. Asimismo, se identificó un peligro microbiológico "Alto" en al menos el 50% del área evaluada, lo cual implica riesgos sanitarios y agronómicos que deben ser atendidos mediante monitoreo y tratamiento del recurso. En contraste, el peligro por salinidad fue predominantemente "Bajo"; sin embargo, la sodicidad mostró un peligro "Medio" en la mayor parte del área, lo que podría comprometer la estructura del suelo a largo plazo. La *Zona c* concentró las condiciones más críticas, por lo que requiere acciones prioritarias. En conjunto, los resultados destacan la necesidad de una gestión integrada del recurso hídrico que garantice la sostenibilidad operativa y productiva del sistema de riego.

REFERENCIAS

Cardona-Almeida C, Suárez A (2024) Integrated Water Resources Management in Colombia: A Historical Perspective. Ambiente & Sociedade 27: e01187. https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0118r7vu27L1OA

Galvis A, Van der Steen P, Gijzen H (2018) Validation of the Three-Step Strategic Approach for Improving Urban Water Management and Water Resource Quality Improvement. Water 10(2): 188. https://doi.org/10.3390/w10020188

FAO – Food and Agriculture Organization and WHO – World Health Organization (2021) Safety and quality of water used with fresh fruits and vegetables. Microbiological Risk Assessment Series No. 37. Rome. https://doi.org/10.4060/cb7678en

Shah M, Sircar A, Varsada R, Vaishnani S, Savaliya U, Faldu M, Vaidya D, Bhattacharya P (2018) Assessment of geothermal water quality for industrial and irrigation purposes in the Unai geothermal field, Gujarat, India. Groundw Sustain Dev 8. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.08.006

Mageshkumar P, Vennila G (2020) Assessment of errors in water quality data using ion balancing methods: A case study from Cauvery River, South India. Indian J Geo-Mar Sci 49(1):57–62. https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/53540/1/IJMS%2049%281%29%2057-62.pdf

Echeverri-Sánchez A, Pérez CF, Angulo Rojas PA, Urrutia Cobo N (2016) Propuesta metodológica para la valoración y zonificación de la amenaza de salinización de suelos en distritos de riego de zonas semiáridas. Caso de estudio: Distrito de riego RUT, Valle del Cauca, Colombia. Revista Ingenierías Universidad de Medellín 15(29): Article 29. https://doi.org/10.22395/rium.v15n29a1

Ayers RS, Westcot DW (1985) Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/t0234e/t0234e00.htm

Villafañe R (2011) Sosalriego: Un procedimiento para diagnosticar los riesgos de sodificación y salinización del suelo con el agua de riego. Bioagro 23(1):57–64.

Singh KR, Goswami AP, Kalamdhad AS, & Kumar B (2020) Development of irrigation water quality index incorporating information entropy. Environment, Development and Sustainability 22: 3119–3132. https://doi.org/10.1007/s10668-019-00338-z

Tartabull T, Betancourt C (2016) La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. Rev Cient Agroecosist 4(1): 47–61. http://aes.ucf.edu.cu/index.php/ras

Department of Water Affairs and Forestry (1996) South African Water Quality Guidelines Agricultural Use: Irrigation. Department of Water Affairs and Forestry, Republic of South Africa 4.

Simsek C, Gunduz O (2007) IWQ Index: A GIS-Integrated Technique to Assess Water Quality Irrigation. Environ Monit Assess 128(1): 277–300. https://doi.org/10.1007/s10661-006-9312-8

Anyango GW, Bhowmick GD, Sahoo Bhattacharya N (2024) A critical review of irrigation water quality index and water quality management practices in micro-irrigation for efficient policy making. Desalination and Water Treatment 318: 100304. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100304

Kundu S, Perinjelil SJ, & Thakur N (2022) Soil salinization and bioremediation using halophiles and halotolerant microorganisms. pp. 231–256. En: Santoyo G, Kumar A, Aamir M, & Uthandi S (eds.). Mitigation of Plant Abiotic Stress by Microorganisms. First edition. Academic Press, Londres. 428 p.

Lu Y, Fricke W (2023) Salt Stress—Regulation of Root Water Uptake in a Whole-Plant and Diurnal Context. Int J Mol Sci 24(9): 8070. https://doi.org/10.3390/ijms24098070

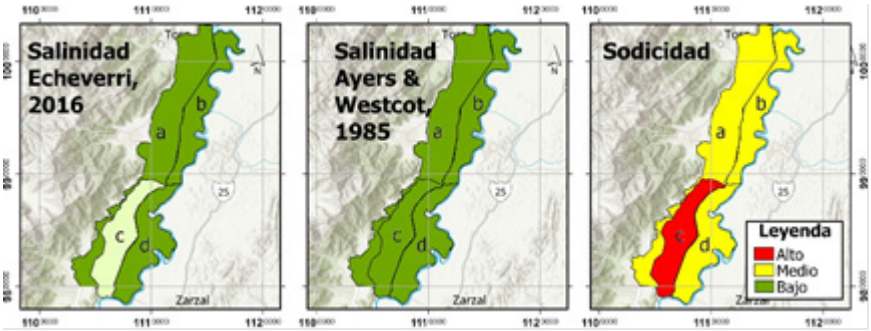
Lei GJ, Zhu XF, Wang ZW, Dong F, Dong NY, Zheng SJ (2014) Abscisic acid alleviates iron deficiency by promoting root iron reutilization and transport from root to shoot in Arabidopsis. Plant Cell Environ 37(4): 852–863. https://doi.org/10.1111/pce.12203

Lee TJ, Luitel BP, Kang WH (2011) Growth and physiological response to manganese toxicity in Chinese cabbage (Brassica rapa L. ssp. Campestris). Hortic Environ Biotechnol 52(3): 252–258. https://doi.org/10.1007/s13580-011-0224-3

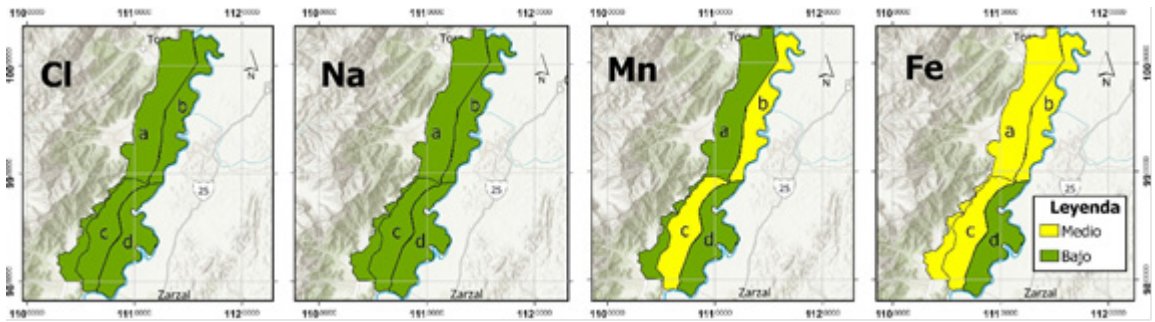
Panday H, Khanal S, Khatiwada N, & Adhikari B (2021) Water corrosion and scale formation problem and its solution in water supply schemes – A case study on Padampokhari and Mahendranagar scheme. Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology 15(1). https://doi.org/10.3126/kuset.v15i1.63443

Muniz GL, Oliveira ALG, Benedito MG, Cano ND, Camargo AP, Silva AJ (2023) Risk Evaluation of Chemical Clogging of Irrigation Emitters via Geostatistics and Multivariate Analysis in the Northern Region of Minas Gerais, Brazil. Water 15(4): Article 4. https://doi.org/10.3390/w15040790

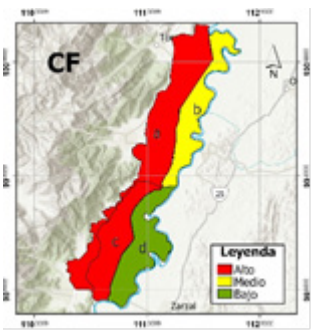
ANEXOS



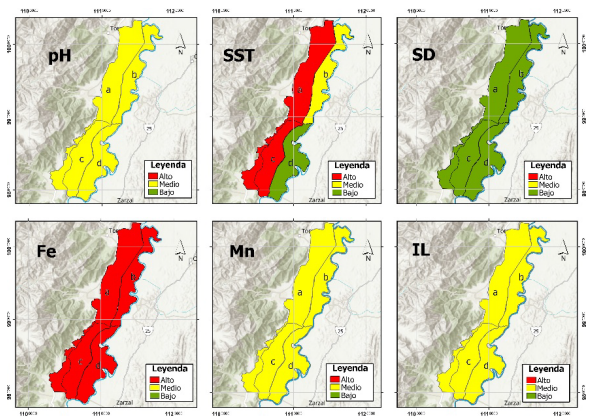
Anexo 1. Zonificación del peligro de degradación de suelos en el Distrito RUT.



Anexo 2. Zonificación del peligro de toxicidad por iones específicos en el Distrito RUT.



Anexo 3. Zonificación del peligro de microbiológico en el Distrito RUT.



Anexo 4. Zonificación del peligro de daño a la infraestructura de riego y taponamiento en el Distrito RUT.

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Análisis de estrategias de monitoreo y manejo de la calidad del agua almacenada para riego

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Analysis of strategies for monitoring and managing the quality of water stored for irrigation

Samanta Daza Castaño[1], Miguel angel Valenzuela Mahecha[2] and Nicolas Duarte Cano[3]

RESUMEN

Palabras clave:
Aguas residuales
Calidad del agua
Inocuidad
Reservorio
Riego agrícola
Tratamiento de agua

Este estudio evaluó la calidad del agua almacenada en reservorios destinada al riego, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos, contrastándolos con la normativa nacional (Decreto 1076 de 2015) y criterios de la FAO. Los resultados evidenciaron concentraciones elevadas de coliformes totales y fecales (>2400 NMP 100 mL^{-1}), así como niveles de demanda bioquímica de oxígeno DBO (34 mg L^{-1} O_2) y demanda química de oxígeno DQO (173 mg L^{-1} O_2) que exceden los límites permitidos. Aunque la conductividad eléctrica CE fue baja (<250 µS cm^{-1}), lo que clasifica el agua como excelente para riego (Clase 1), la combinación con una alta relación de absorción de sodio (RAS) indica un riesgo severo por sodicidad, afectando la infiltración del agua en el suelo. Como alternativa de tratamiento, se propone el uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial con Cyperus papyrus, planta capaz de remover hasta el 84% de la DBO y el 89% de los coliformes.

ABSTRACT

Keywords:
Wastewater
Water quality
Food safety
Reservoir
Agricultural irrigation
Water treatment

This study evaluated the quality of water stored in reservoirs for irrigation purposes by analyzing physicochemical and biological parameters and comparing them with national regulations (Decree 1076 of 2015) and FAO criteria. The results showed high concentrations of total and fecal coliforms (>2400 NMP 100 mL^{-1}), as well as levels of biochemical oxygen demand (BOD) (34 mg L^{-1} O_2) and chemical oxygen demand (COD) (173 mg L^{-1} O_2) that exceed the permitted limits. Although the electrical conductivity EC was low (<250 µS cm^{-1}), which classifies the water as excellent for irrigation (Class 1), the combination with a high sodium absorption ratio (RAS) indicates a severe risk of sodicity, affecting water infiltration into the soil. As an alternative treatment, the use of subsurface flow constructed wetlands with Cyperus papyrus is proposed, a plant capable of removing up to 84% of BOD and 89% of coliforms.

[1]Programa Ingeniería Química,– Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5666-8418
[2]Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9205-8722
[3]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1649-3060
*Corresponding author: sdazac@unal.edu.co

CC BY NC SA

La calidad del agua para riego agrícola es fundamental para garantizar la productividad de los cultivos y la inocuidad de los alimentos. El control de la calidad debe realizarse desde las fuentes de agua hasta el punto final de consumo, evaluando parámetros físicos, químicos y biológicos (Argüello Tovar 1996). En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del agua almacenada en reservorios, destinada a la producción de alimentos y a su vez analizar alternativas de manejo que garanticen su calidad e inocuidad, formulando recomendaciones para su adecuado uso en la producción agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diagnóstico de la calidad del agua se basó en un plan de monitoreo dividido en dos fases. (i) Medición semanal, muestreo in situ de pH de temperatura y conductividad eléctrica mediante una sonda multiparamétrica. (ii) Medición mensual, recolecctando muestras en puntos estratégicos del sistema para su análisis fisicoquímico y microbiológico en laboratorio. Usando esta información se identificaron las principales problemáticas del agua del reservorio. Luego, fue realizado un análisis de posibles alternativas de manejo, evaluando sus ventajas y limitaciones, lo que permitió seleccionar y diseñar la más adecuada según el contexto. Finalmente, fueron formuladas recomendaciones orientadas a mejorar la calidad del agua y la eficiencia del sistema de filtrado. Esta metodología fue desarrollada en el campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, en un reservorio con capacidad aproximada de 2500 m³.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El monitoreo semanal arrojó valores de pH, los cuales se mantuvieron generalmente dentro del rango permitido (4,5-9,0) en el Decreto 1594 de 1984. No obstante, se presentaron picos superiores a 9 que pueden afectar la absorción de nutrientes por las plantas. Por otro lado, la conductividad eléctrica mostró variaciones significativas, con valores iniciales elevados (>110 µS cm^{-1}) que se estabilizaron entre 40-60 µS cm^{-1}, manteniéndose siempre por debajo de 250 µS cm^{-1} y clasificando el agua como Clase 1 excelente para riego (De Pascale, Orsini and Pardossi 2013).

Con respecto al monitoreo mensual, se encontraron parámetros que excedieron los limites permisibles como se muestra en la Tabla 1. Se evidencian parámetros como la alcalinidad baja (<30 mg L^{-1} $CaCO_3$), indicando capacidad de amortiguación limitada (Swistock 2024), índice de Langelier con valores promedio de -1,88, indicando tendencia corrosiva del agua (Ahumada Barraza 2021) y coliformes totales y fecales que alcanzaron valores por encima de la normatividad encontrada en el Decreto 1594 de 1984 lo que indica contaminación microbiológica.

Tabla 1. Resultados análisis de calidad del agua del reservorio.

Parámetro	Unidades	Resultados						Rango aceptable
		(05/10/22)	(28/06/24)	(17/07/24)	(22/08/24)	(2/10/24)	(6/11/24)	
Alcalinidad total	Mg L^{-1} $CaCO_3$	38	22	24	22	22	16	30-150 (Swistock 2024)
CE	µS cm^{-1}	106,6	49,6	48,5	50,0	70,0	60,0	<750 (De Pascale, Orsini and Pardossi 2013)
RAS	Unidades	0,27	0,14	0,21	1,20	2,46	0,62	Según clasificación del riesgo (Olías, Cerón and Fernández 2005)
Solidos suspendidos	Mg L^{-1}	10	33	54	40	124	30	<50 (Guerrero Pacheco 2021)
DBO5	Mg L^{-1} O_2	--	--	--	--	34	--	<5 (Villarreal Rodríguez, Murillo Ortíz and Herrera 2013)
DQO	Mg L^{-1} O_2	--	--	--	--	173	--	
Coliformes Totales	NMP100 mL^{-1}	-	-	>2.400	--	260	--	<5.000 (Decreto 1594 de 1984)
Coliformes Fecales	NMP 100 mL^{-1}	-	-	>2.400	--	40	--	<1.000 (Decreto 1594 de 1984)
Índice de Langelier	Unidades	-1,94	-2,09	-2,52	-2,79	-0,77	-1,15	-0,5-0,5 (Ahumada Barraza 2021)

Por otro lado, los parametros de DBO y DQO se encuentran por encima de los valores máximos indicando que el agua está contaminada, a su vez esto indicaria que el oxigeno disuelto (OD) puede ser bajo, en donde los valores por debajo de 4 ppm no apropiados para la aplicación de fertirriego (Suarez and Carretero 2021). Otros análisis como el del RAS menor a 3 y CE inferior a 200 µS cm^{-1} representan una alta sodicidad según la clasificación de la FAO (Olías, Cerón and Fernández 2005), afectando propiedades físicas del suelo y limitando la infiltración del agua de riego. Ademas los cationes principales (Ca, Mg, K, Na), sulfatos, cloruros y metales pesados se encontraron dentro de límites aceptables. Por otro lado, se observó proliferación descontrolada de Azolla filiculoides, especie invasora que forma mantos sobre la superficie, limitando el intercambio gaseoso y favoreciendo condiciones anaerobias (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR 2022).

A partir del diagnóstico se evaluaron tres alternativas de manejo: cloración, ozonización y humedales artificiales. La cloración presenta ventajas como bajo costo y efecto residual, pero genera subproductos tóxicos y problemas de corrosión (Barrio de Vergara 2015). La ozonización ofrece mayor eficacia desinfectante sin residuos químicos, pero requiere altos costos de instalación y manejo técnico especializado (Barrio de Vergara 2015). Los humedales artificiales fueron seleccionados como la alternativa más viable por su alta eficiencia en remoción de contaminantes, bajos costos operativos, sostenibilidad ambiental y capacidad de tratamiento integral de parámetros microbiológicos y fisicoquímicos (Rodríguez Valencia, Quintero Yepes and Castañeda 2022).

CONCLUSIÓN

El monitoreo periodico ya sea semanal o mensual de la calidad del agua para riego permite determinar posibles problemáticas que pueden generar afectaciones en la producción y la inocuidad de los alimentos. En el caso de estudio, el agua del reservorio presenta contaminación microbiológica y carga orgánica elevada que la hace no apta para riego de cultivos de consumo directo sin tratamiento previo, ademas existe riesgo de sodicidad que puede afectar las propiedades físicas del suelo. La implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial representa una alternativa viable y sostenible para mejorar la calidad del agua, ofreciendo tratamiento eficaz con bajos costos operativos.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue posible gracias al apoyo de los Laboratorios de Suelos y Agua, y de los Laboratorios de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, así como a la Oficina de Gestión Ambiental por proporcionar los datos de análisis previos. De igual manera, se agradece al Semillero de Investigación en Ingeniería del Agua y del Clima en la Agricultura del programa de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por su acompañamiento y contribución al desarrollo de este trabajo. Finalmente, agradecemos al Ministerio de Relaciones Internacionales y de la Francofonía (MRIF) por su apoyo financiero en el marco de la cooperación Québec–Colombia 2024-2026, dentro del proyecto titulado *Réingénierie des systèmes de drainage de surface pour une gestion environnementale des eaux agricoles*.

REFERENCIAS

Ahumada Barraza AE (2021) Comparación de los índices de calidad y contaminación del agua, capacidad buffer e índice de Langelier en la Ciénaga de Mallorquín durante la época seca y húmeda del año. Obtenido de https://repositoriouniatlanticoeduco/handle/2050012834/1890

Barrio de Vergara M (2015) Cloración frente a ozonización en el tratamiento de agua potable Ventajas y desventajas de ambos procesos Universidad complutense. Obtenido de https://hdlhandlenet/2050014352/66209

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR (2022) Plan de Prevención, Control y Manejo de la especie Azolla filiculoides L (Helecho de agua) en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR Bogotá. Obtenido de https://wwwcargovco/uploads/files/64260164e4360pdf

De Pascale S, Orsini F and Pardossi A (2013) Irrigation water quality for greenhouse horticulture En: Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops (págs 169-205) Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations Plant Production and Protection Division. Obtenido de https://wwwresearchgatenet/publication/255723773_Irrigation_water_quality_for_greenhouse_horticulture

Decreto 1594 de 1984 (26 de Julio de 1984) Obtenido de https://wwwalcaldiabogotagovco/sisjur/normas/Norma1jsp?i=18617

Guerrero Pacheco J H (2021) Calidad del agua para sistemas de riego en Colombia. Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo 12(2): 10–20 Obtenido de https://ojsunipamplonaeduco/indexphp/aaas/article/view/2573

Olías M, Cerón J and Fernández I (2005) Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del US Laboratory Salinity (USLS). Geogaceta (37): 111-113 Obtenido de https://wwwresearchgatenet/publication/28164638_Sobre_la_utilizacion_de_la_clasificacion_de_las_aguas_de_riego_del_US_Laboratory_Salinity_USLS

Rodríguez Valencia N, Quintero Yepes L and Castañeda S A (2022) Construya y opere un humedal artificial para el postratamiento de aguas residuales de su finca cafetera. Cenicafé. doi:1038141

Suarez GF and Carretero RD (2021) Oscilación en las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) de acuerdo a diferentes frecuencias establecidas en sistemas NFT (Nutrient Film Technique) en el municipio de Chía, Cundinamarca. Tesis de maestría, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Chía Obtenido de https://expeditiorepositorioutadeoeduco/bitstream/handle/2050012010/31186/Oscilaci%C3%B3n%20en%20las%20concentraciones%20de%20ox%C3%ADgeno%20disuelto%20(OD)%20de%20acuerdo%20a%20diferentes%20frecuencias%20establecidas%20en%20sistemas%20NFT%20(Nutrien

Swistock B (20 de Mayo de 2024) Interpretación de los análisis del agua de riego PennState Extension. Obtenido de https://extensionpsuedu/interpretacion-de-los-analisis-del-agua-de-riego

Villarreal Rodríguez M, Murillo Ortíz M and HT (2013) Calidad de las aguas residuales y de pozo para uso agropecuario en establos lecheros. Abanico Veterinario. Obtenido de https://wwwmedigraphiccom/pdfs/abanico/av-2014/av143bpdf

Revista Facultad Nacional de Agronomía

La estimación de evapotranspiración potencial para el Valle del Cauca mediante imágenes de satelite

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimation of potential evapotranspiration applied to the Valle del Cauca by using satellite images

Alexander Bonilla Ramírez[1] and Carlos Alberto González Murillo[2]

Palabras clave:
ECOSTRESS
Evapotranspiración potencial (ETo)
Penman-Monteith

RESUMEN

La evapotranspiración potencial del cultivo de referencia se estima usando el modelo de Penman-Monteith (FAO 1986) proveniente de estaciones meteorológicas *in-situ*. Sin embargo, existe información satelital disponible que mediante el uso de algunos modelos: SEBAL (Bastiaanssen et al. 1998), METRIC (Allen et al. 2007) y el proyecto desarrollado por la NASA de ECOSTRESS (Fisher 2019), entre otros, que pueden acercar el cálculo de la ETo a nivel espacial. En este trabajo se realizará un proceso de escalamiento (downscaling) para comparar los resultados obtenidos de la misión ECOSTRESS, tal como se concibe en el procedimiento de Fisher (2018). Las estaciones meteorológicas seleccionadas fueron Mateguadua, Barragán y San Marcos del IDEAM. Ubicadas en el Valle del cauca, en el municipio de Tuluá (2) y Buga, a diferentes alturas sobre el nivel del mar (1119 msnm Mateguadua, 2902 msnm Barragán y 1011 msnam San Marcos). Los resultados mostraron una alta similitud entre las comparaciones en Barragan y San Marcos (R^2: 0,96 y 0,92) contra las imágenes satelitales. Para la misma comparación con la estación de Mateguadua se tiene una aceptación menor (R^2: 0,89).

Key words:
ECOSTRESS
Potential evapotranspiration (ETo)
Penman-Monteith

ABSTRACT

The potential evapotranspiration (ETo) is estimated using the Penman-Monteith model (FAO, 1986) with data from in-situ weather stations. However, satellite-based information is available, which, through the use of models such as SEBAL (Bastiaanssen et al.1998), METRIC (Allen et al. 2007), and NASA's ECOSTRESS project (Fisher 2019), among others, can provide spatially distributed ETo estimates. This study will perform a downscaling process to compare the results obtained from the ECOSTRESS mission, following the procedure outlined by Fisher (2018). The selected weather stations were Mateguadua, Barragán, and San Marcos, operated by IDEAM. They are located in the Cauca Valley, in the municipalities of Tuluá (2 stations) and Buga, at different elevations above sea level (1119 masl for Mateguadua, 2902 masl for Barragán, and 1011 masl for San Marcos). The results showed a high similarity between the comparisons at the Barragán and San Marcos stations and the satellite images (R^2: 0.96 and 0.92, respectively). In contrast, the same comparison for the Mateguadua station showed a lower agreement (R^2: 0.89).

[1]Estudiante maestría Ingeniería Biosistemas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. abonillar@unal.edu.co
[2]Docente, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. cagonzalezmu@unal.edu.co

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

La información satelital fue obtenida del NASA's ECOsystem and Spaceborne Thermal Radiometer Experi ment on Space Station (ECOSTRESS), NASA (2025). Este satélite provee información de diferentes niveles, particularmente la ET corresponde a L-3; con una resolución de 70x70 m. Este instrumento fue lanzado a la estación espacial internacional en el año 2018. Uno de sus focos de atención se centra en la estimación de ET, aunque también genera información relacionada con otras variables como la temperatura superficial, uso eficiente del agua e índice de estrés evaporativo; entre otros (Fisher et al. 2020). Los mismos autores señalan que la nubosidad afecta la estimación de ET.

Para la comparación de la información satelital se utilizó las estaciones del IDEAM de Barragán, Mateguadua y San Marcos (IDEAM 2025). La estimación de la ETo, se realizó utilizando el modelo de Penman-Monteith con la metodología propuesta por la FAO (FAO 1986). Con las estaciones meteorológicas se obtiene la ETo localizada, mientras la información satelital podría mejorar la estimación espacial mediante la inclusión de campos continuos de ETo (Allen et al. 2007).

Para contar con una mejor precisión al obtener el procesamiento de imágenes satelitales, el estudio se adelanta en la región del Valle del Cauca, sobre las zonas productivas agrícolas enfatizando en el cultivo de caña de azúcar. Este estudio tiene un alcance comparativo con la información entregada por 3 estaciones meteorológicas del IDEAM cercanas entre sí, y las imágenes del proyecto ECOSTRESS obtenidas entre el enero del años 2023 y agosto del año 2025.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto The ECOsystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station (ECOSTRESS), trabaja con sensores térmicos que aplican el modelo de Priestley-Taylor Jet (PT-JPL), the Atmosphere – Land Exchange Inverse (ALEXI), Penman-Monteith MOD16 (PM-MOD16) (Fisher, 2018). Para este estudio se trabajó con las imágenes de ECOSTRESS PR-JPL, desde el año 2023 hasta agosto del 2025. Imágenes que se pueden obtener cada 5 días. La clasificación de imágenes también se realiza descartando la nubosidad o información nula que se encuentra en las mismas.

Se obtiene la información de las estaciones Mataguadua, Barragán y San Marcos del IDEAM, del portal de datos meteorológicos de la entidad. (http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/ 2025). Se trabaja con los datos mínimos para obtener la ETo, procesados en hoja de electrónica de cálculo.

De los Raster de evapotranspiración potencial de ECOSTRESS, se extraerán los datos correspondientes a las coordenadas de las estaciones meteorológicas con Python. Para cada estación, se comparan por fechas la diferencia entre el dato de la ETo (FAO 1986) y el dato obtenido de la imagen satelital.

Se obtiene la diferencia acumulada, y se grafican los datos de cada estación, verificando la correlación entre los datos ordenados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los datos obtenidos para las 3 estaciones.

Tabla 1. Comparación Raster, estación Barragán.

Eto Barragan	Raster Barragan	Diferencia	Acumulada
2.46	1.68	0.78	0.78
2.54	1.7	0.84	1.62
2.60	0	2.60	4.22
2.67	2.22	0.45	4.67
2.80	0.52	2.28	6.95
2.82	2.88	-0.06	6.88
2.87	2.49	0.38	7.26
2.91	1.88	1.03	8.29
2.91	1.38	1.53	9.83
2.96	2.59	0.37	10.20
3.03	2.95	0.08	10.28
3.06	2.63	0.43	10.71
3.15	2.89	0.26	10.97
3.20	1.79	1.41	12.39
3.29	2.67	0.62	13.00
3.40	1.99	1.41	14.41
3.41	1.95	1.46	15.87
3.65	1.95	1.70	17.58
3.70	1.63	2.07	19.65
3.90	1.93	1.97	21.62
4.16	1.79	2.37	23.99
4.26	0.62	3.64	27.63

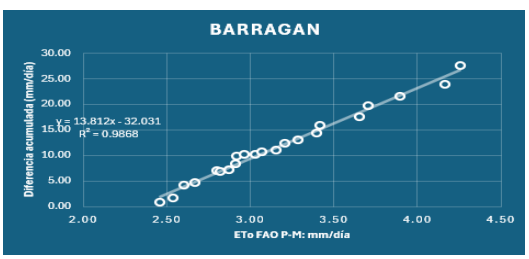


Figura 1. ETo FAO P-M contra Diferencia acumulada.

Un primer resultado a resaltar para la estación de Barragán (2902 msnm) es que en promedio la diferencia entre la ETo y el pixel de la imagen satelital (excluyendo los valores entre 0 y 1) es de 1,01 mm día^{-1}, y en la mayoría de los casos, la información de la imagen Raster, es menor a la información obtenida de la estación. Una vez evaluada la diferencia acumulada, se obtuvo una correlación R^2 de 0,9868.

Tabla 2. Comparación Raster. Estación Mateguadua.

Eto Mataguadua	Raster Mataguadua	Diferencia	Acumulada
4.63	3.13	1.50	1.50
4.65	2.05	2.60	4.10
4.88	3.54	1.34	5.44
4.99	0.52	4.47	9.91
5.08	1.45	3.63	13.54
5.09	3.62	1.47	15.01
5.10	3.52	1.58	16.58
5.12	2.14	2.98	19.56
5.28	2.93	2.35	21.90
5.28	2.42	2.86	24.76
5.46	1.73	3.73	28.49
5.62	3.48	2.14	30.62
5.84	5.31	0.53	31.16
5.92	2.62	3.30	34.46
6.47	2.54	3.93	38.38

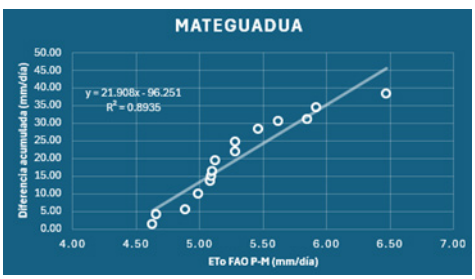


Figura 2. ETo FAO P-M contra Diferencia acumulada.

En el caso de la estación de Mateguada (1119 msnm), el promedio entre la diferencia de la ETo y el pixel de la imagen satelital (excluyendo los valores de diferencia entre 0 y 1) es de 2,42 mm/día. En todos los datos revisados, el dato del pixel era menor al dato de la ETo. Una vez evaluada la diferencia acumulada, se obtuvo una correlación R^2 de 0,8935.

Tabla 3. Comparación Raster. Estación San Marcos.

Eto San Marcos	Raster San Marcos	Diferencia	Acumulada
4.06	1.46	2.60	2.60
4.21	3	1.21	3.81
4.22	2.84	1.38	5.19
4.24	2.81	1.43	6.62
4.26	2.79	1.47	8.09
4.29	0	4.29	12.38
4.53	2.87	1.66	14.04
4.56	2.05	2.51	16.55
4.73	3.74	0.99	17.54
4.84	3.05	1.79	19.33
4.89	2.45	2.44	21.77
4.93	3.74	1.19	22.96
5.28	3.41	1.87	24.83

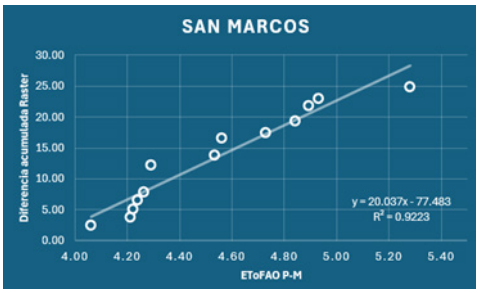


Figura 3. ETo FAO P-M contra Diferencia acumulada.

En el caso de la estación de San Marcos (1011 msnm), el promedio entre la diferencia de la ETo y el pixel de la imagen satelital (excluyendo los valores de diferencia entre 0 y 1) es de 1.71 mm/día. En todos los datos revisados, el dato del pixel era menor al dato de la ETo. Una vez evaluada la diferencia acumulada, se obtuvo una correlación R^2 de 0,9223.

Para las estaciones evaluadas, la de mejor aproximación entre los datos fue la estación de mayor elevación sobre el nivel del mar, estación de Barragán.

CONCLUSIÓN

Predomina en las imágenes raster información de ETo entre 1 y 2 unidades menores si se compara con la ETo obtenida de la información de las estaciones *in-situ*.

Se descartaron los datos de cero (0) de las imágenes satelitales, pues en el proceso de diferencia acumulada, genera un error voluntario que es permitido obviar.

Los modelos satelitales, son excelentes herramientas para el ajuste de la ETo en superficies agrícolas donde se tiene información base de estaciones meteorológicas. La correlación para los tres casos entre el error acumulado y la ETo obtenida con datos climáticos es superior a 0,85 para el presente estudio.

Se debe procurar estudiar índices que puedan apoyar la información satelital para ajustar mejor la ETo al compararse con el resultados de ETo de estaciones meteorológicas.

REFERENCIAS

Allen RG., Smith M, Perrier A and Pereira LS (1994a) An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID BUlletin, 43(2): 35–92.

Allen RG, Smith M, Perrier A and Pereira LS (1994b) An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID BUlletin, 43(2), 1–34.

Allen R, Tasumi M and Trezza R (2007) Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Intenalized Calibration (METRIC) Model. Idaho, Idaho Department Water Resources.

Bastiaanssen W, Meneti M, Feddes R and Holtslag A (1998) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) Formulation. Journal of Hydrology Wageningen, The Netherlands.

Cargua S, Cueva M, Escobar J, Arciniegas S and Nieto E (2017) Recurso hídrico. Clima y sistemas de información geográfica. Quito, Ecuador. Universidad Central de Ecuador.

FAO Capítulo 56 (1990) Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Evapotranspiración_de_los_cultivos_5.PDF

Fisher JB (2018) ECOsystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station (ECOSTRESS): Level-3 Evapotranspiration L3(ET_PT-JPL). Algorithm Theoretical Basis Document. Jet Propulsion Laboratory (JPL) Publication D-94645. California Institute of Technology, NASA. 18 pag.

Fisher JB, Lee B, Purdy AJ, Halverson GH, Dohlen MB, Cawse-Nicholson K et al (2020) ECOSTRESS: NASA's Next GenerationMission to measure evapotranspirationfrom the International Space Station. Water Resources Research 56: e2019WR026058. https://doi.org/10.1029/

IDEAM (2025). http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/ Sistema de Información para la Gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos. Información consultada 15 de agosto de 2025.

NASA (2025) https://ecostress.jpl.nasa.gov/data, información consultada 15 de agosto del 2025.

Priestley CHB and Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters, Monthly Weather Review 100: 81-92.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Validación de modelos de evapotranspiración con lisimetría para riego en arroz del Tolima

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Validation of evapotranspiration models using lysimetry for irrigation in Tolima rice crops

Ronaldo David Medrano Barrios[1]*, Liseth Johana Paez Pacheco[1], Quelbis Román Quintero Bertel[2] and Darío Fernando Pineda Suárez[3]

Palabras clave:
Balance hídrico
Lisímetros volumétricos
Optimización
Requerimiento hídrico

RESUMEN

El cultivo de arroz en Tolima requiere un alto uso de agua, por lo que optimizar el riego es clave para la sostenibilidad. Este estudio valida modelos de evapotranspiración (ET) mediante lisimetría volumétrica en la variedad Fedearroz 67. Se aplicó un diseño de bloques completamente al azar con cinco tratamientos de riego en El Espinal, Colombia. Los modelos teóricos (FAO Penman-Monteith, Hargreaves) se compararon con mediciones directas de ETc. Los resultados buscan definir coeficientes de cultivo (Kc), una función agua–rendimiento y un modelo ET adaptado. El protocolo aporta evidencia empírica para mejorar la gestión hídrica en sistemas arroceros de alto rendimiento.

Keywords:
Water balance
Volumetric lysimeters
Optimization
Water requirements

ABSTRACT

Rice cultivation in Tolima demands high water use, making irrigation efficiency vital for sustainability. This study validates evapotranspiration (ET) models using volumetric lysimetry in Fedearroz 67 crops. A randomized block design with five irrigation treatments was implemented in El Espinal, Colombia. Theoretical models (FAO Penman-Monteith, Hargreaves) were compared to direct ETc measurements. Results aim to define crop coefficients (Kc), a water–yield function, and a regionally adapted ET model. The protocol provides empirical evidence to improve water management in high-performance rice systems.

[1]Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Agrícola, Semillero de Investigación AgriSOS, Universidad de Sucre, Colombia.
[2]Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad de Sucre, Colombia. quelbis.quintero@unisucre.edu.co, https://orcid.org/0000-0002-8241-5677.
[3]Centro de Gestión del Recurso Hídrico, Federación Nacional de Arroceros, El Espinal, Colombia. dariopineda@fedearroz.com.co
*Corresponding author: rmedrab@gmail.com

CC BY NC SA

La gestión del agua es uno de los mayores desafíos ambientales y productivos a nivel global. La agricultura consume más del 70% del agua dulce disponible, y cerca del 50% se pierde por ineficiencia (FAO 2021). En Colombia, el arroz ocupa más de 500.000 hectáreas y es clave para la seguridad alimentaria. Tolima, con El Espinal como núcleo arrocero, demanda grandes volúmenes de agua para este cultivo (Fedearroz 2022).

La evapotranspiración (ET) es fundamental para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos. El modelo FAO Penman-Monteith es el estándar para calcular la ETo, pero requiere datos meteorológicos completos. Modelos como Hargreaves-Samani, basados solo en temperatura, ofrecen una alternativa más accesible. Sin embargo, su aplicación sin validación local puede generar errores significativos en la programación del riego. Para Fedearroz 67, variedad de alto rendimiento en Tolima, no existe aún validación de campo con ETc medida directamente. Este vacío limita la precisión en las recomendaciones de riego y la eficiencia en el uso del recurso hídrico.

Este manuscrito presenta el protocolo experimental actualmente en ejecución en El Espinal. Se busca validar modelos teóricos mediante lisimetría volumétrica y establecer parámetros agronómicos clave. El diseño incluye cinco tratamientos de riego en bloques completamente al azar. La presentación en CONCIA 2025 busca difundir el enfoque metodológico antes de los resultados finales. El objetivo es determinar el requerimiento hídrico óptimo de Fedearroz 67 para maximizar su rendimiento local.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se lleva a cabo en el módulo de lisímetros volumétricos del Centro de Gestión del Recurso Hídrico (CGRH) de Fedearroz, en El Espinal, Tolima (Colombia), durante el primer semestre de 2025.

El experimento se desarrolla bajo un diseño de bloques completamente al azar con cinco tratamientos y 16 unidades experimentales. Cada unidad experimental tiene un área de 1,44 m². Los tratamientos consisten en diferentes estrategias de riego basadas en la reposición de un porcentaje de la ETc medida en el lisímetro de referencia, como se detalla en la Tabla 1. Esta configuración permite construir una función de producción agua-cultivo.

Se establecerá el cultivo de arroz variedad Fedearroz 67 mediante siembra manual en surcos separados a 17 cm, con una densidad de 150 kg ha^{-1}. La ETc se determinará mediante el método del balance hídrico en los lisímetros volumétricos, aplicando la siguiente ecuación (González-Cervantes et al. 2012).

$$ETc = I + P - D - R \pm \Delta S \quad (1)$$

Donde I es el riego (mm), P es la precipitación (mm), D es el drenaje (mm), R es la escorrentía (mm), y ΔS es el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo (mm).

Tabla 1. Descripción de los Tratamientos Experimentales de Riego.

Identificador	Estrategia de Riego	Criterio de Aplicación	Réplicas
T1	Riego deficitario severo	Reposición del 50% de la ETc medida	3
T2	Riego deficitario moderado	Reposición del 75% de la ETc medida	3
T3	Riego óptimo (Referencia)	Reposición del 100% de la ETc medida	4
T4	Riego con exceso moderado	Reposición del 125% de la ETc medida	3
T5	Práctica común (Tanque Evaporímetro)	Riego programado según el método del Tanque Evaporímetro Clase A	3

En este estudio, el efecto de la precipitación (P) se eliminará con una cubierta móvil tipo 'Rain Out Shelter' y la escorrentía (R) se considerará despreciable. La ecuación se simplifica a:

$$ETc = I - D \pm \Delta S \quad (2)$$

Se empleará una estación climática para alimentarlos modelo FAO Penman-Monteith y Hargreaves. La humedad del suelo se medirá con sensores TDR, FDR (Diviner 2000) y sondas SM100 calibradas previamente. Variables agronómicas y potencial hídrico se registrarán periódicamente durante el ciclo del cultivo. Al finalizar, se evaluarán componentes de rendimiento y biomasa paravalidar el protocolo experimental.

La información se analizará con el software InfoStat (versión 2020). Se realizará un análisis de varianza (ANOVA) para las variables agronómicas. La comparación entre los métodos de estimación de ET se realizará mediante el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Coeficiente de Determinación (R2), métricas robustas para la evaluación de modelos (Chai & Draxler 2014).

CONTRIBUCIONES POTENCIALES

Resultados esperados

En la actualidad se están tomando datos diarios de humedad del suelo y climáticos con el fin de estimar la ETc del cultivo Fedearroz 67. Esperando que al momento de la aplicación de esta metodología se generará la base de datos empírica necesaria para:

Validar el modelo teórico más confiable para estimar la lámina de riego en las condiciones locales, proveyendo la evidencia para establecer su grado de confiabilidad y error asociado.

Determinar con precisión el requerimiento hídrico óptimo de la variedad Fedearroz 67, permitiendo establecer una función de producción agua-rendimiento para las condiciones del Espinal, Tolima.

Generar coeficientes de cultivo (Kc) específicos para la variedad Fedearroz 67, validados localmente para cada etapa fenológica.

Cuantificar la relación entre el consumo hídrico y los componentes de rendimiento, identificando las estrategias de manejo que maximizan la eficiencia en el uso del agua.

Fundamentar una estrategia de manejo del riego adaptada al Tolima, que permita a los productores ahorrar agua y reducir costos de producción sin comprometer el rendimiento.

IMPLICACIONES ANTICIPADAS

Conclusiones esperadas

De manera anticipada se espera que este estudio establezca que:

El requerimiento hídrico óptimo para la variedad Fedearroz 67 se alcanza con una lámina de riego que maximiza el rendimiento, demostrando que el exceso de agua no se traduce en un aumento de la producción.

La validación mediante lisimetría confirmará que al menos un método teórico presenta una alta correlación con los valores experimentales, estableciéndolo como una herramienta confiable para la gestión del riego en la región. Un manejo hídrico adecuado, basado en la lámina de riego óptima, incide directamente de manera positiva en los componentes de rendimiento y, por ende, en la productividad del cultivo.

La adopción de un método teórico validado proporcionará a los productores una herramienta práctica y precisa para planificar el riego, contribuyendo a la sostenibilidad del recurso hídrico y la resiliencia del sector arrocero.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a FEDEARROZ por facilitar el espacio de investigación en El Espinal, Tolima. A la Universidad de Sucre y al prof. Quelbis Román Quintero Bertel por su valioso acompañamiento académico. Al co-director Dario Pineda Suárez por impulsar la cooperación interinstitucional y orientar el trabajo de campo. Su apoyo ha sido fundamental para la calidad y el desarrollo de este proyecto científico.

REFERENCIAS

Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith, M (2006) Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Estudio FAO Riego y Drenaje No 56). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Alimentación.

Chai T and Draxler RR (2014) Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?–Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development 7(3): 1247-1250. https:// doiorg/105194/gmd-7-1247-2014

FAO (2021) The state of the world's land and water resources for food and agriculture – systems at breaking point (SOLAW 2021) In: The state of the world's land and water resources for food and agriculture – systemsat breaking point (SOLAW 2021) FAO. https:// doiorg/104060/cb7654en

Fedearroz (2022) Informe de gestión Fondo Nacional del Arroz vigencia 2022.

Fedearroz-Fondo Nacional del Arroz Vigencia 2022 (EneroDiciembre).

Fernanda L and Castaño C (2017) Estimación y análisis de la evapotranspiración en el municipio Manizales. Estimation and analysis of evapotranspiration in the municipality of Manizales.

González-Cervantes G, Sánchez-Cohen I and Íñiguez-Covarrubias M (2012) Comparación de métodos para determinar la evapotranspiración y oportunidad de riego en nogal pecanero. Terra Latinoamericana 30(1): 85-91. publication/235704197

Hargreaves GH and Samani ZA (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture 1(2): 96-99. https://doiorg/1013031/201326773

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO (2021) The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point

(SOLAW 2021) FAO. https://doiorg/104060/cb7654en Pereira LS (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. https://wwwresearchgatenet/

Quispe-Velasquez JR, Ravazzani G and Serruto M (2019) Evaluación de cinco métodos empíricos para la estimación de la evapotranspiración de referencia en la cuenca alta del Apurímac, Perú. Revista de Investigaciones Altoandinas 21(3): 195-204. http://dxdoiorg/1018271/ria2019479

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Optimización del riego por goteo mediante redes neuronales en datos de sensores de humedad y clima

Drip irrigation optimization using neural networks using data from humidity and climate sensors

Israel Enrique Herrera Díaz[1]*, Edith Alejandra Gamiño Ramírez[1], Franklin Manuel Torres Bejarano[2], Gabriel Antonio Campo Daza[2] and Alfredo Márquez Herrera[1]

Palabras clave:
Humedad del suelo
Inteligencia artificial
LabVIEW
Riego por goteo
Redes neuronales

RESUMEN

Este trabajo propone un sistema inteligente para la optimización del riego por goteo aplicando redes neuronales artificiales (ANN) entrenadas con datos de sensores ambientales y de humedad del suelo. Se diseñó un sistema integrado compuesto por sensores conectados a una plataforma Arduino, una interfaz en LabVIEW para monitoreo en tiempo real, y un modelo predictivo implementado en MATLAB para estimar la cantidad óptima de agua a aplicar en función de las condiciones climáticas y del suelo. Se recopilaron 500 muestras simuladas que incluyeron humedad del suelo (%), temperatura (°C) y humedad relativa (%), junto con el volumen de agua aplicado como variable objetivo. Se entrenó un perceptrón multicapa (MLP) con dos capas ocultas, logrando una precisión del R^2=0,95 y un error cuadrático medio (MSE) inferior a 0,4 en la fase de prueba. El desempeño del modelo fue superior al obtenido mediante regresión lineal múltiple, validando la utilidad de técnicas de inteligencia artificial para la toma de decisiones agrícolas. El sistema demostró ser replicable, eficiente y adaptable a futuras aplicaciones en entornos agrícolas reales, reafirmando el potencial del aprendizaje automático como herramienta clave en la agricultura de precisión orientada a la sustentabilidad.

Keywords:
Humidity sensors
Agricultural automation
LabVIEW
Drip irrigation
Neural networks

ABSTRACT

This work proposes an intelligent system for drip irrigation optimization using artificial neural networks (ANNs) trained with data from environmental and soil moisture sensors. An integrated system was designed, comprised of sensors connected to an Arduino platform, a LabVIEW interface for real-time monitoring, and a predictive model implemented in MATLAB to estimate the optimal amount of water to apply based on climatic and soil conditions. 500 simulated samples were collected, including soil moisture (%), temperature (°C), and relative humidity (%), along with the volume of water applied as the target variable. A multilayer perceptron (MLP) was trained with two hidden layers, achieving an accuracy of R^2=0.95 and a mean square error (MSE) of less than 0.4 in the testing phase. The model's performance was superior to that obtained using multiple linear regression, validating the usefulness of artificial intelligence techniques for agricultural decision-making. The system proved to be replicable, efficient, and adaptable to future applications in real-world agricultural settings, reaffirming the potential of machine learning as a key tool in precision agriculture focused on sustainability.

[1]Universidad de Guanajuato Méx. CIS-DICIVA. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2117-7548; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6669-7277; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7660-3575
[2]Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3144-7289; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6471-0250
*Corresponding author: eherrera@ugto.mx

CC BY NC SA

El uso eficiente del agua en agricultura es crítico ante el cambio climático y la escasez de recursos hídricos (FAO 2020). El riego por goteo reduce el consumo de agua, pero su eficacia depende de una programación precisa en función de la humedad del suelo y las condiciones climáticas. Actualmente, muchos agricultores emplean métodos fijos que no aprovechan datos en tiempo real, limitando la eficiencia del sistema.

Se plantea la pregunta: ¿puede optimizarse el riego por goteo mediante inteligencia artificial aplicada a datos de sensores en tiempo real? Estudios previos indican que la combinación de adquisición de datos con Arduino, monitoreo en LabVIEW y predicción con ANN en MATLAB ofrece soluciones efectivas (Sharma & Kumar 2019; Camargo et al. 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó una unidad NI-DAQ 4001, sensores capacitivos de humedad del suelo, un sensor DHT22 de temperatura y humedad relativa, y una electroválvula de 12 V para el sistema de riego. Se empleó LabVIEW® 2014 para la adquisición y visualización en tiempo real y MATLAB® R2024a para la construcción y entrenamiento de la Red Neuronal Artificial (ANN por sus siglas en inglés) con Toolbox Neural Network. La ANN es un perceptrón multicapa (MLP) con dos capas ocultas (10 y 5 neuronas), funciones sigmoidal en capas ocultas y lineal en salida (Figura 1). El Entrenamiento se llevó con algoritmo Levenberg–Marquardt (trainlm) y 500 muestras o mediciones previas de las variables de humedad de suelo, humedad ambiental, temperatura y caudal o volumen suministrado.

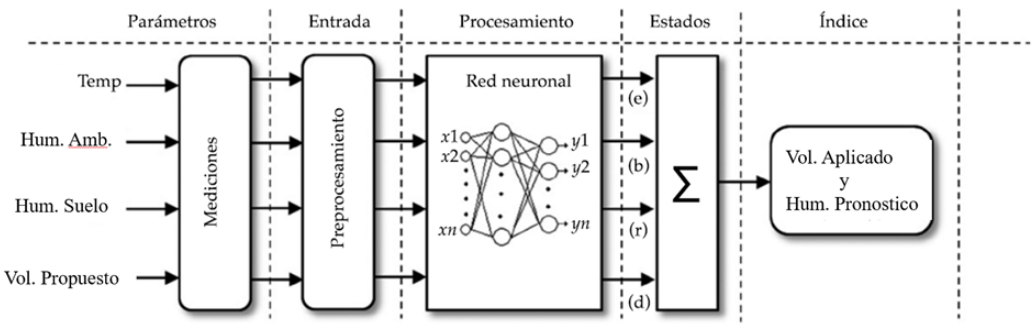


Figura 1. Esquema de construcción de la red neuronal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez desarrollada y entrenada la red neuronal y obtenido el rendimiento-comportamiento para las mediciones de las cuatro variables a emplear con los sensores, se procedió al desarrollo e implementación de la interfaz de usuario en LabVIEW (Figura 2), la cual controla la apertura de válvula para la línea de alimentación de los goteros, así como las opciones de cálculo de la red neuronal que se ejecuta en Matlab.

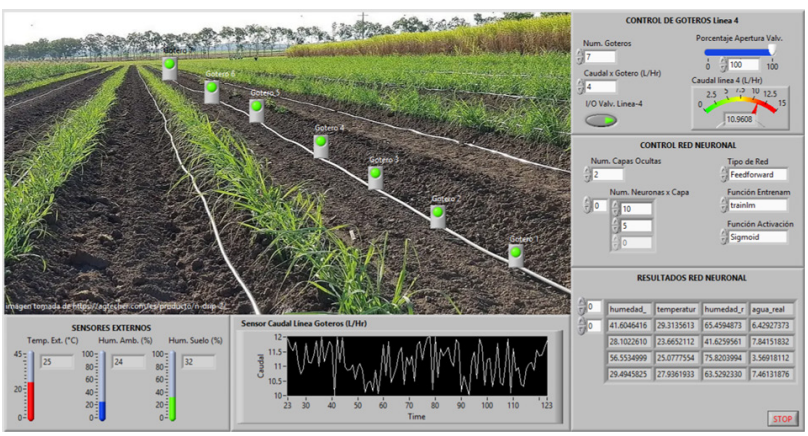


Figura 2. Aplicación de la interfaz de usuario en LabVIEW para el sistema de riego por goteo

El escenario de simulación es una línea de 7 goteros de bajo caudal y presión nominal de 10 metros columna de agua (m.c.a.); así mismo, se tiene el control de una electroválvula para la apertura a cierto porcentaje que permite regular el caudal que proviene de la extracción de la línea principal. Al aplicar la interfaz de usuario con los datos del escenario que se describe en la Tabla 1 así como el uso de la red neuronal que se ejecuta en Matlab, en la Figura 3 se muestra los resultados que arroja la interface y su control, así como los parámetros para controlar la red neuronal, donde los resultados se guardan en un archivo para su posterior grafica.

Tabla 1. Escenario para simular y controlar con LabVIEW y ANN (Artificial Neuronal Network) en Matlab

Variable / proceso	Valor
Temp. Ambiente registrado por Sensor	25 °C
Humedad Ambiente registrado por Sensor	24%
Humedad Suelo registrado por Sensor	32%
Caudal entrada línea 4, registrado por Sensor	10-12 L/hr
Número Goteros	7
Caudal por Gotero	4 L/hr
Porcentaje apertura Válvula	100%
Número Capas Ocultas	2
Número Neuronas x Capa	10 y 5
Tipo de ANN	Feedforward
Función Entrenamiento ANN	Trainlm
Función de Activación ANN	Sigmoid
Tiempo simulación	76 días
Regresión lineal (RLM)	Si

Con la ejecución de la interfaz para el escenario descrito en la Tabla 1, se desarrolló un script en MATLAB para predecir nuevos valores a partir de archivos CSV exportados desde el sistema de sensores. Estas predicciones fueron almacenadas automáticamente en un nuevo archivo con los resultados obtenidos para cada entrada, incluyendo las variables originales y la cantidad de agua estimada por la red neuronal. Los resultados de la simulación del escenario para 76 días de suministro de agua en la línea de goteros se observan en la Figura 3.

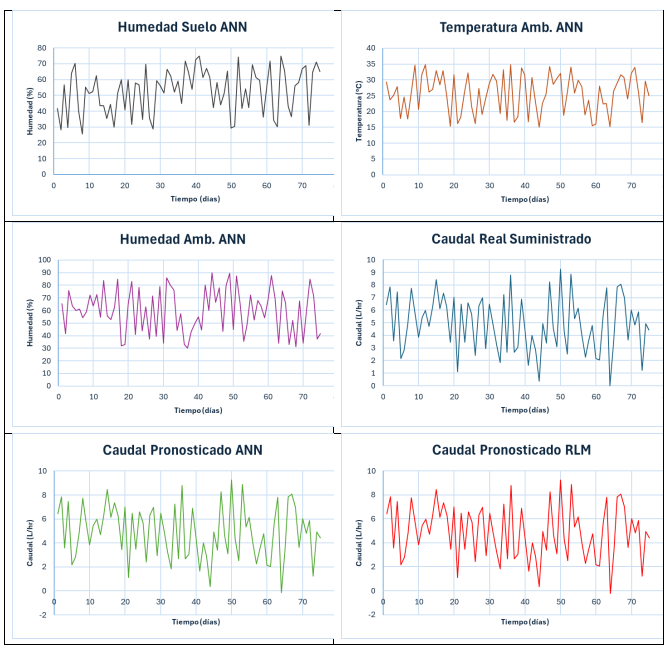


Figura 3. Resultados de la Red Neuronal (ANN) para las variables de humedad, temperatura y caudal suministrado.

El MLP entrenado presentó MSE<0,4 y $R^2 \approx 0,95$. La regresión mostró correlaciones cercanas a 1 en entrenamiento, validación y prueba, indicando buen ajuste sin sobreajuste.

En un escenario de 76 días, la ANN superó al RLM en todas las métricas: MSE=0,37 y R^2=0,95 frente a MSE=0,81 y R^2=0,87 en el RLM. La ANN mostró menor dispersión y mayor precisión, especialmente en valores intermedios y altos.

CONCLUSION

El sistema desarrollado optimiza el riego por goteo usando ANN entrenadas con datos de sensores de humedad y clima. La integración Arduino–LabVIEW–MATLAB permitió automatizar la toma de decisiones, logrando alta precisión y reduciendo errores frente a RLM.

La solución es replicable, adaptable a campo y viable para integración en IoT agrícola. Se propone incorporar variables como radiación solar y tipo de cultivo, así como explorar arquitecturas de aprendizaje profundo para mejorar la predicción en tiempo real.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Departamento de Ingeniería Agrícola, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca por el apoyo económico para asistir a presentar el trabajo de Investigación, así como al Campus Celaya-Salvatierra por las facilidades otorgadas para la asistencia al Congreso.

REFERENCIAS

Camargo M, Gutiérrez M and Hernández J (2021) Modeling drip irrigation scheduling using artificial neural networks and soil moisture sensors. Computers and Electronics in Agriculture 188: 106350. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106350

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020) Water for sustainable food and agriculture: A report produced by the HLPE of the Committee on World Food Security. FAO. https://www.fao.org/3/ca9731en/ca9731en.pdf

Sharma K and Kumar R (2019) Automated irrigation system using Arduino with LabVIEW. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) 8(6S3): 561–565. https://doi.org/10.35940/ijeat.F1110.0986S319

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Riego localizado en maíz: Análisis comparativo de rendimiento y diseño en turnos fijos y a demanda

Localized irrigation in corn: Comparative analysis of performance and design using fixed and on demand on irrigation shift

Julián Augusto Espitia Cuadros[1] and Sebastian Felipe Contreras Robayo[2]

Palabras clave:
Evaluación de rendimiento
Método de Clement
Modelación de cultivos
Optimización del riego

RESUMEN

El maíz es vital para la seguridad alimentaria, en Colombia, este cultivo tiene presencia con el 70% de su producción tecnificada, que requiere irrigación y fertilizantes. Sin embargo, la selección actual de sistemas de riego a menudo no considera la capacidad hídrica del suelo, causando estrés en los cultivos y pérdidas. Este estudio compara la viabilidad económica de sistemas de riego por turnos y riego a demanda para maíz en Puerto Gaitan, Meta, usando el software AquaCrop. Los resultados muestran que el riego a demanda incrementa el rendimiento del maíz en un 7,9% (13.860 t ha^{-1}) comparado con el riego por turnos (12.845 t ha^{-1}). Aunque el sistema a demanda implica una inversión inicial 2,56 veces mayor en tuberías y 3 veces en equipos de bombeo, el aumento en la productividad sugiere una posible amortización más rápida, especialmente en momentos de alta demanda del grano. La investigación destaca la importancia de considerar factores edáficos y climáticos para optimizar la eficiencia del riego.

Keywords:
Yield assessment
Clement's method
Crop modeling
Irrigation optimization

ABSTRACT

Corn is vital for food security. In Colombia, 70% of corn production is technified, requiring irrigation and fertilizers. However, the current selection of irrigation systems often does not consider soil water capacity, causing crop stress and losses. This study compares the economic viability of shift irrigation and on-demand irrigation systems for corn in Puerto Gaitan, Meta, using AquaCrop software. The results show that on-demand irrigation increases corn yield by 7.9% (13,860 t ha^{-1}) compared to shift irrigation (12,845 t ha^{-1}). Although the on-demand system involves an initial investment 2.56 times higher in pipes and 3 times higher in pumping equipment, the increase in productivity suggests a possible faster payback, especially at times of high grain demand. The research highlights the importance of considering soil and climate factors to optimize irrigation efficiency.

El maíz (*Zea mays* L.) constituye uno de los cultivos de mayor relevancia para la seguridad alimentaria mundial, tanto por su papel en la dieta básica de millones de personas como por su importancia en la alimentación animal e industrial (Paliwal 2001). En Colombia, este cereal se cultiva en los 32 departamentos. En Colombia se cultiva en los 32 departamentos, destacándose regiones como la Orinoquía y el Valle del Cauca que concentran cerca del 63% de la producción nacional (CIMMYT & CIAT 2019). El cultivo tecnificado aporta cerca del 70% del total, caracterizándose por el uso de semillas híbridas, sistemas de irrigación y fertilización nitrogenada.

Pese a su importancia estratégica, los rendimientos en Colombia (4,1–4,3 t ha^{-1} en los departamentos con mejores registros) son menores a los alcanzados en países con mayor nivel de tecnificación, debido principalmente a limitaciones en el manejo del agua. Uno de los problemas radica en la elección y operación de los sistemas de riego, que en muchos casos no consideran la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo ni las necesidades hídricas del cultivo. Esto genera escenarios de déficit o exceso de humedad, ocasionando estrés hídrico y disminución de los rendimientos (Benavides and Miño 2023).

Estudios previos han demostrado que la gestión del riego basada en sensores de humedad y modelos de simulación mejora la eficiencia en el uso del agua y la productividad (Espinosa et al. 2016). En este contexto, herramientas como AquaCrop, desarrollado por la FAO, permiten evaluar la respuesta del maíz bajo diferentes escenarios de manejo hídrico, comparando la programación del riego por turnos con sistemas a demanda.

En este marco, la presente investigación plantea como hipótesis que la implementación de un sistema de riego a demanda incrementa la eficiencia en el uso del agua y la rentabilidad del cultivo en comparación con un riego por turnos. El objetivo general es comparar la viabilidad económica de ambos esquemas de riego en el cultivo de maíz tecnificado en Carimagua (Puerto Gaitán, Meta), mediante la integración de diseños agronómicos e hidráulicos y la simulación del rendimiento en AquaCrop.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la altillanura colombiana para comparar la viabilidad técnica y económica de dos esquemas de riego presurizado por aspersión en maíz (*Zea mays* L.): uno por turnos y otro a demanda. Se caracterizó la zona de estudio (clima, suelo y cultivo), se diseñaron ambos sistemas y se simuló el rendimiento mediante AquaCrop (FAO s.f.) integrando criterios técnicos e indicadores económicos.

Área de estudio

El trabajo se desarrolló para un lote de 251 ha de la finca Liviney, vereda La Cristalina, municipio de Puerto Gaitán (Meta, Colombia). representativo de las sabanas de altillanura, donde predominan sistemas tecnificados de maíz y soya.

Caracterización climática

Se utilizaron datos de la normal climatológica (1971–2000) para la estación agrometeorológica Carimagua (código 33035010, IDEAM), la zona presenta un régimen monomodal de lluvias, con un máximo en junio y un periodo seco entre diciembre y febrero. La evapotranspiración de referencia (ETo) estimada con AquaCrop (FAO s.f.) fue de 3,6 mm $día^{-1}$.

Caracterización edáfica

Se consultaron estudios edafológicos previos realizados por el ICA y CIAT (1978), los cuales identifican predominancia de Oxisoles con limitaciones en fertilidad. Con base en análisis de textura y materia orgánica del horizonte superficial, se determinaron propiedades hidrofísicas mediante el software SPAW: textura franco arcillo limosa, capacidad de campo de 39,1%, punto de marchitez permanente de 23,4% y velocidad de infiltración básica de 7,91 mm h^{-1}.

Cultivo

Se modeló maíz (*Zea mays* L.), con etapas fenológicas reportadas por FAO (2006) y (Guzmán Bunay 2017) y coeficientes de cultivo (Kc) de 0,7, 1,2, 1,2 y 0,6. Para el diseño del riego se utilizó el valor máximo (Kc=1,2), cubriendo las fases críticas de demanda hídrica.

Diseño de los sistemas de riego

Riego por turnos. red para regar una fracción del área a la vez, con 14 parcelas y ciclo de siete días, considerando láminas netas y pérdidas por infiltración.

Riego a demanda. dimensionado con el método de Clement (Planells et al. 1999), calculando probabilidad de operación simultánea y tres tomas equivalentes, lo que permitió definir diámetros de tubería y equipos de bombeo.

Ambos diseños se evaluaron en términos de requerimientos de tuberías, pérdidas por fricción y potencia de bombeo.

Modelación en AquaCrop

Se simuló el rendimiento bajo dos escenarios:

Turnos. reposición de lámina cada 7 días.
A demanda. riego cuando el agotamiento alcanzó 30%, reponiendo hasta capacidad de campo. Se emplearon datos climáticos de Carimagua, el archivo Maize.CRO, densidad de 7,5 plantas m^{-2}, duración de 132 días y condiciones iniciales de humedad en punto de marchitez.

Análisis de la información

Se evaluaron rendimiento de grano, eficiencia en uso de agua, requerimientos energéticos, costos de inversión y rentabilidad (relación costo–beneficio y periodo de amortización).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento simulado con riego por turnos

En la Figura 1, se presenta la simulación bajo un esquema de riego por turnos (lámina y frecuencia constantes) la cual estimó un rendimiento de 12.845 t ha^{-1}, equivalente a 3,1 veces el mayor valor reportado por CIMMYT and CIAT (2019).

Rendimiento simulado con riego a la demanda

El riego a la demanda, con reposición al 30% de agotamiento de humedad, alcanzó 13.860 t ha^{-1} (Figura 2), lo que representa un 7,9% más que el esquema por turnos y 3,36 veces el valor reportado por CIMMYT and CIAT (2019).

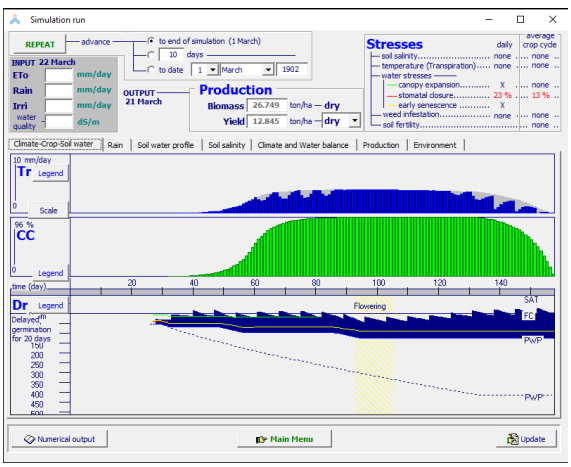


Figura 1. Simulación de rendimiento de maíz bajo riego programado por turnos (lámina y frecuencia constantes).

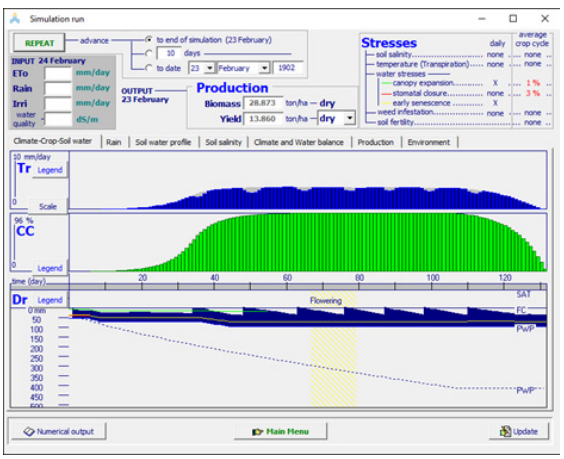


Figura 2. Simulación de rendimiento de maíz bajo riego a la demanda (factor de agotamiento del 30%).

El riego a la demanda ofrece ventajas agronómicas al reducir el estrés hídrico y maximizar el rendimiento, en concordancia con lo señalado por Planells et al. (1999). En términos económicos, el incremento de 7,9% en el rendimiento puede mejorar la rentabilidad en escenarios de precios variables del maíz.

Limitaciones y consideraciones para el diseño

Factores críticos identificados incluyen: velocidad de infiltración básica del suelo, caudal disponible en la fuente de agua y la necesidad de mayores caudales en ciertos momentos.

Recomendaciones para futuras investigaciones

Se sugiere ajustar los parámetros del modelo AquaCrop a variedades locales de maíz, considerando duración de etapas fenológicas, crecimiento radicular, rendimiento esperado e índice de cosecha.

CONCLUSION

El riego a la demanda fue más eficiente que el riego por turnos, al incrementar un 7,9% el rendimiento y reducir el estrés hídrico.

Variables como la velocidad de infiltración, la duración de la jornada y los coeficientes de diseño influyen directamente en el dimensionamiento de las redes de conducción.

Aunque requiere mayor inversión inicial, el riego a la demanda resulta más rentable a largo plazo, especialmente ante la volatilidad del precio del maíz.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi compañero y amigo Sebastián Felipe Contreras Robayo, con quien desarrollé esta investigación y cuyo aporte fue fundamental para la obtención de los resultados presentados. Por motivos personales no pudo acompañarme en este congreso, pero su contribución al trabajo es altamente reconocida. Declaro, además, que no existe ningún conflicto de intereses en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

Benavides Reyes SC and Miño Escobar JS (2023) Contaminación en las fuentes hídricas por causa de usos excesivos de agroquímicos producto de actividad agricola en el municipio de sapuyes nariño, a partir de geoprocesos utilizando sistemas de información geográfica.

CIAT (1978) Informe Anual CARIMAGUA 1978. https://www.google.com/l?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://ciat-library.ciat.cgiar.org/forrajes_tropicales/archives.

CIMMYT & CIAT (2019) Maíz para Colombia Visión 2030.

Espinosa Espinosa B, Flores Magdaleno H, Ascencio Hernández R, Carrillo Flores G, Espinosa E, Flores Magdaleno H & Ascencio Hernández Carrillo Flores RG (2016) Diseño de un sistema de riego hidrante parcelario con los métodos por Turnos y Clement: análisis técnico y económico Design of a system of farm hydrant with the Turns and Clement methods: technical and economic analysis.Terra Latinoamericana.

FAO (s.f.) AquaCrop - el modelo de productividad del agua de los cultivos. Recuperado el 2025, de https://www.fao.org/aquacrop/es

FAO (2006) Estudio FAO Riego y drenaje 56 Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm

FAO (2013) Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca. https://www.fao.org/4/i3429s/i3429s.pdf

Guzmán Bunay DA (2017) Etapas fenológicas del maiz (*Zea mays* L.) var. Tusilla bajo las condiciones climáticas del Cantón Cumandá, provincia de Chimborazo [Universidad Técnica de Ambato]. http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25123

Paliwal RL (2001) El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. https://www.fao.org/4/x7650s/x7650s00.htm#toc

Planells P, Ortega JF, Valiente M, Montero J and Tarjuelo JM (1999). Criterios para el diseño de redes colectivas de riego. In Artículo publicado en Ingeniería del Agua (Vol. 6). http://iwaponline.com/IA/article-pdf/6/1/27/576543/ia19992773.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Estrategias de riego con pivote central en caña de azúcar: Mejorando la eficiencia y rentabilidad en el Valle del Cauca, Colombia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Center pivot irrigation strategies for sugarcane: Improving efficiency and profitability in the Valle del Cauca Colombia

Alberto Mario Arroyo Avilez[1] and Elkin Geovanni Sanchez Roncancio[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Balance hídrico
Eficiencia en el uso del agua
Rentabilidad económica
Riego
Saccharum officinarum

El riego es una práctica esencial y costosa en la caña de azúcar colombiana, donde el 90% de los cultivos son irrigados, haciendo crucial su eficiencia. Este estudio evaluó el manejo del riego con pivote central en el Ingenio Providencia, Valle del Cauca, Colombia, utilizando la metodología de balance hídrico para optimizar el rendimiento, la productividad del agua y el beneficio económico. El experimento incluyó seis tratamientos de aplicación de agua (60% (T1), 80% (T2), 100% (T3), 120% (T4) y 140% (T5), además de un tratamiento control (T6) que replicaba el manejo convencional del ingenio). La metodología de balance hídrico fue validada con tensiómetros, mostrando que el Tratamiento 3 (100% del requerimiento hídrico) fue el que mejor se ajustó a las condiciones de campo (R^2=0,92). Los rendimientos más altos se obtuvieron con T3, T4 y T5 (163-169 t ha^{-1}), siendo T3 el más eficiente en productividad del agua. Económicamente, T3, T4 y T5 mostraron incrementos significativos en el beneficio neto (13%, 16% y 15% respectivamente), mientras T1 resultó económicamente inviable. Además, T3 se destacó por tener una de las huellas hídricas totales más bajas (79,6 m^3 t^{-1}), demostrando un balance óptimo entre eficiencia y productividad. Estos hallazgos sugieren que la aplicación del 100% del requerimiento hídrico (T3) representa la estrategia óptima para la caña de azúcar bajo pivote central, mejorando la rentabilidad y la sostenibilidad hídrica en la región.

ABSTRACT

Keywords:
Water Balance
Water use efficiency
Economic profitability
Irrigation
Saccharum officinarum

Irrigation is a critical and costly practice in Colombian sugarcane production, where over 90% of crops are irrigated, making efficiency paramount. This study evaluated center pivot irrigation management at Ingenio Providencia in the Cauca Valley, Colombia. We utilized a water balance methodology to optimize yield, water productivity, and economic profitability.The experiment included six treatments of water application: 60% (T1), 80% (T2), 100% (T3), 120% (T4), and 140% (T5) of the crop's water requirement, plus a conventional control treatment (T6). The water balance model was validated using tensiometers, showing a strong fit with field conditions for T3 (R^2=0.92). The highest yields were achieved with T3, T4, and T5, ranging from 163 to 169 t ha^{-1}. T3 (100% water requirement) was the most efficient in terms of water productivity. Economically, T3, T4, and T5 showed significant increases in net profit (13%, 16%, and 15%, respectively), while T1 proved to be economically unviable. Furthermore, T3 had one of the lowest total water footprints (79.6 $m^3 t^{-3}$), demonstrating an optimal balance between efficiency and productivity. These findings suggest that applying 100% of the water requirement (T3) is the optimal strategy for sugarcane under center pivot irrigation, significantly improving both economic profitability and water sustainability in the region.

[1]Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), Florida, Valle del Cauca, Colombia. amarroyo@cenicana.org
[2]Ingenio Providencia, El Cerrito, Valle del Cauca, Colombia. esanchez@providenciaco.com

CC BY NC SA

La gestión sostenible de los recursos hídricos es una actividad esencial para la agricultura, particularmente en regiones con limitada disponibilidad de agua y creciente competencia por su uso. En Colombia, el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una actividad agrícola fundamental donde el riego constituye una de las prácticas esenciales y, a su vez, costosas. Aproximadamente el 85% de los cultivos de caña de azúcar en el Valle geografico del rio Cauca son irrigados, lo que hace que el uso eficiente del agua sea cada vez más necesario para maximizar la producción, reducir costos y promover la sostenibilidad. Globalmente, la escasez de agua desafía la sostenibilidad de este cultivo, especialmente en regiones tropicales y subtropicales, como lo señalan Mekonnen y Hoekstra (2011). Por ello, la implementación de alternativas para el manejo eficiente del agua en sistemas de riego tecnificados es una prioridad para ingenios y agricultores de la region del valle geografico del rio Cauca.

Las necesidades hídricas de la caña de azúcar varían significativamente según su fase fenológica, con picos de demanda durante la fase de crecimiento maximo debido a la alta evapotranspiración, un aspecto que Allen et al. (1998) vinculan al desarrollo vegetativo máximo. Una aplicación insuficiente de agua en etapas claves puede afectar funciones fisiológicas cruciales, como la fotosíntesis y la conductancia estomática, reduciendo la biomasa y el contenido de azúcar, según estudios de Soares et al. (2012) y Ferraz et al. (2012). Por otro lado, el exceso de riego incrementa los costos de producción y conlleva riesgos ambientales como el encharcamiento y la lixiviación de nutrientes, un problema señalado por Figueiredo et al. (2020). En este contexto, la adopción de estrategias avanzadas, como el uso de herramientas de balance hídrico, se ha vuelto fundamental para mejorar la eficiencia del uso del agua (EUA) y maximizar el rendimiento. La distinción entre huella verde (lluvia efectiva) y huella azul (agua de riego) es esencial para evaluar la sostenibilidad de las prácticas de riego, permitiendo una evaluación más completa del uso total del agua y apoyando la toma de decisiones para reducir la presión sobre los recursos de agua dulce, como enfatizan Hoekstra et al. (2011).

La integración de métodos de balance hídrico, complementados con monitoreo de humedad del suelo mediante tensiómetros y datos de estaciones meteorológicas, mejora la programación del riego, adaptándose a la variabilidad espacial y temporal de la demanda de agua, una necesidad destacada por Ferreira et al. (2022). Estudios como los de Zhang et al. (2021) y de Gheewala et al. (2020) resaltan el papel de manejar tanto la huella verde como el huella azul para mejorar la productividad y reducir la huella hídrica de la caña de azúcar. Además, evaluaciones económicas realizadas por Rodrigues et al. (2019) muestran que estas prácticas avanzadas de riego no solo mejoran la productividad sino que también pueden ser rentables, compensando los costos adicionales mediante el aumento de los rendimientos y que contribuyen también a la reducción de la huella hídrica total del cultivo, un indicador clave de sostenibilidad.

Este estudio tiene como objetivo principal evaluar el impacto de diferentes tratamientos de riego, basados en una herramienta de balance hídrico, sobre el rendimiento de la caña de azúcar, su eficiencia en el uso del agua y los retornos económicos en la región del Valle geografico del rívao Cauca, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en un campo comercial de caña de azúcar regado con pivote central ubicado en el municipio de El Cerrito, Valle del Cauca, Colombia (3.624168° N, -76.290360° W). El sitio presenta un clima semi-seco con una precipitación media anual de 872 mm.

El experimento se realizó en una parcela de 25 ha de caña de azúcar de segundo ciclo de soca de la variedad CC 05-430, con un espaciamiento de 1,65 m entre surcos. El suelo del área de estudio es de textura franco-arcillosa. Se caracterizaron las propiedades de retención de agua del suelo para determinar la Lámina de Agua Aprovechable (LAA) y generar una curva de retención de humedad, utilizada para validar el modelo de balance hídrico.

El diseño experimental fue un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos y tres repeticiones, sumando 18 parcelas (Figura 1). Los tratamientos definieron el volumen de riego como un porcentaje del requerimiento hídrico del cultivo, calculado

mediante un modelo de balance hídrico: T1: 60% del requerimiento hídrico; T2: 80% del requerimiento hídrico T3: 100% del requerimiento hídrico; T4: 120% del requerimiento hídrico; T5: 140% del requerimiento hídrico; T6: Manejo convencional (control), basado en un tanque evaporímetro Clase A.

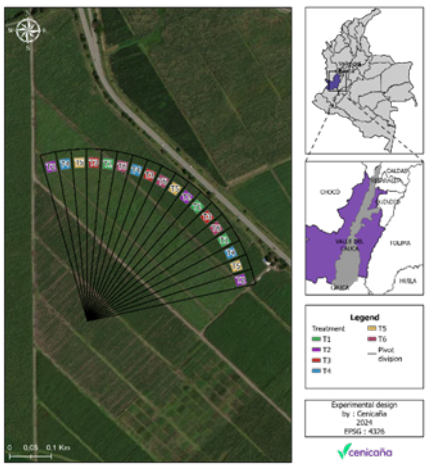


Figura 1 - Localización del área de estudio y diseño del área experimental.

La humedad del suelo se monitoreó con tensiómetros en cada parcela para validar los cálculos del balance hídrico. El requerimiento de agua del cultivo se estimó con una ecuación de balance hídrico que considera la precipitación, el ascenso capilar, la evapotranspiración del cultivo (ETc), la escorrentía, el drenaje y el cambio en el almacenamiento de humedad. La ETc se calculó utilizando la ecuación de Penman-Monteith y un coeficiente de cultivo (Kc) específico para la variedad CC 05-430.

Para evaluar la viabilidad económica, se realizó un análisis de costo-beneficio para cada tratamiento, que incluyó:

Costo total de riego por evento (~US$49 por aplicación de 40 mm).
Ingreso bruto, calculado a partir de las toneladas de caña por hectárea (TCH), el porcentaje de sacarosa y un precio fijo por kilogramo de azúcar.
Utilidad neta, la diferencia entre el ingreso bruto y los costos de riego.

Se calcularon métricas adicionales como el costo marginal, el incremento de ingresos marginales y el ingreso neto marginal para comparar la rentabilidad de los tratamientos experimentales con el método convencional (T6).

Determinación de la huella hídrica

Para evaluar la sostenibilidad ambiental de cada tratamiento de riego, se calculó la huella hídrica del cultivo, diferenciando entre agua verde (precipitación efectiva consumida por el cultivo) y agua azul (agua de riego extraída de fuentes). Este análisis es crucial para minimizar la presión sobre los recursos de agua dulce.
La metodología se basó en la evapotranspiración del cultivo (ETc), calculada a partir de la ecuación de Penman-Monteith (FAO; Allen et al. 1998) y el coeficiente de cultivo (Kc) de la variedad CC-05430. Los resultados de la huella hídrica se expresan en metros cúbicos de agua por tonelada de caña (m3/t), normalizando el volumen de agua consumida (de lluvia o riego) por el rendimiento del cultivo. El estudio destaca que, del total de 1249 mm de agua requerida por el cultivo, el 59% provino de lluvia y el 41% de riego. Este enfoque está alineado con la investigación de Mekonnen y Hoekstra (2011) y Gheewala et al. (2020) sobre la gestión del agua y la sostenibilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó que el requerimiento hídrico total acumulado (ETc) del cultivo fue de 1249 mm, de los cuales el 59% provino de la precipitación y el 41% del riego. Las necesidades de agua variaron significativamente a lo largo del ciclo fenológico, siendo

las fases de crecimiento vegetativo y activo las de mayor demanda. La validación del balance hídrico con tensiómetros demostró que la aplicación del 100% del requerimiento hídrico (T3) fue la que mejor se ajustó a las condiciones de campo, con una subestimación del 8,4%.

En términos de productividad del cultivo, los tratamientos T3, T4 y T5 (100-140% del BH) lograron los rendimientos más altos (163-169 t ha^{-1}), superando significativamente al manejo convencional (T6) y a los tratamientos de bajo riego (T1 y T2) (Figura 2). Esta superioridad se debe a que una aplicación de agua adecuada previene el estrés hídrico, lo que optimiza la fotosíntesis y el desarrollo de la biomasa. Por el contrario, la productividad de T1 (60% del BH) fue la más baja, lo que subraya la ineficiencia de un riego insuficiente. En cuanto a la calidad del jugo, no se encontraron diferencias significativas en el contenido de sacarosa entre los tratamientos, lo que demuestra que una gestión eficiente del agua puede maximizar el rendimiento sin comprometer la calidad Inman-Bamber et al. (2005) .

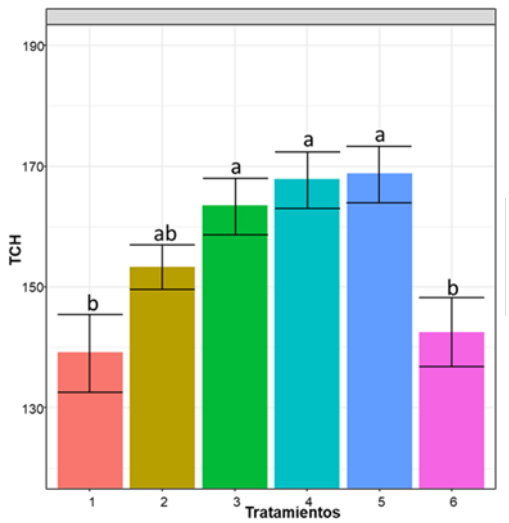


Figura 2 - Productividad total para cada tratamiento.

El análisis económico reveló que los tratamientos T3, T4 y T5 no solo fueron los más productivos, sino también los más rentables. T4 y T5 mostraron el mayor Incremento Neto Marginal (INM) (16% y 15%, respectivamente), lo que indica que el aumento de ingresos compensó los mayores costos de riego. T3 también resultó altamente rentable, con un INM del 13%. En contraste, T1 resultó económicamente inviable, con un INM negativo. Estos hallazgos sugieren que el manejo del riego debe apuntar a suplir la totalidad del requerimiento hídrico para optimizar los beneficios económicos, en línea con estudios que destacan la importancia del riego adecuado para la rentabilidad (Moreno-Pérez et al. 2021; López-Uribe et al. 2017).

Desde una perspectiva ambiental, el análisis de la huella hídrica mostró que T3 fue la estrategia más sostenible, logrando un balance óptimo entre eficiencia y productividad con una de las huellas hídricas totales más bajas (79,6 $m^3 t^{-1}$). Esto se debe a un uso moderado del agua azul (riego) y a un aprovechamiento eficiente del agua verde (precipitación). Este resultado concuerda con las recomendaciones de estudios previos sobre la gestión eficiente del agua para la sostenibilidad ambiental (Mekonnen y Hoekstra 2011; Gheewala et al. 2020). Por el contrario, los tratamientos T4 y T5 aumentaron la huella hídrica sin mejoras significativas en el rendimiento, lo que confirma las ineficiencias del riego excesivo y su impacto en el uso del recurso hídrico (de Figueiredo et al. 2020).

CONCLUSION

La aplicación de riego basada en el 100% del requerimiento hídrico (T3) demostró ser la estrategia más efectiva. Este enfoque, que utiliza un método científico y preciso, superó tanto a la gestión convencional como a la aplicación

insuficiente de agua, optimizando la productividad y el uso del recurso.

Los tratamientos que cubrieron las necesidades hídricas del cultivo (T3, T4 y T5) no solo obtuvieron los mayores rendimientos, sino que también generaron los mayores ingresos netos. Esto prueba que la inversión en riego es rentable cuando se alinea con la demanda real del cultivo, superando los resultados de los métodos de riego empíricos o de bajo volumen.

El análisis de la huella hídrica confirmó que el tratamiento T3 es el más sostenible. Al lograr altos rendimientos con una de las huellas hídricas más bajas, este método demuestra que es posible maximizar la productividad de la caña de azúcar sin ejercer una presión excesiva sobre los recursos hídricos. Los tratamientos con riego excesivo, por el contrario, resultaron en una mayor huella hídrica y una menor eficiencia.

REFERENCIAS

Allen RG, Pereira LS, Raes, D and Smith, M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO.

de Figueiredo AML, Silva JB and dos Santos RC (2020) "Impact of over-irrigation on the water footprint of sugarcane". Agricultural Water Management 230: 105953.

de Gheewala SH, Bonnet S, Silva L and Phong HN (2020) Water footprint assessment for sugarcane production: A case study in Thailand. Journal of Cleaner Production 256: 120329. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120329

Ferraz RLS, Melo AS, Suassuna JF, Brito MEB, Fernandes PD and Nunes Júnior ES (2012) Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. Revista Pesquisa Tropical 42: 181-188.

Ferreira JJ, Silva FHBB and Oliveira AD (2022) Modeling sugarcane yield under water stress conditions using AquaCrop. Agricultural Water Management 263: 107470. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107470

Gheewala SH, Mung-Nark T and Chaiyapa W (2020) "Water Footprint of Sugarcane in Thailand: A Case Study". Journal of Cleaner Production 256: 120538.

Inman-Bamber NG and Smith DM (2005) Water relations in sugarcane and their role in improving crop productivity. Field Crops Research 92(2-3): 195-212.

López-Uribe R, Cuartas EL and Garcés-Restrepo F (2017) "Efecto del déficit hídrico en la rentabilidad de la producción de caña de azúcar". Agronomía Colombiana 35(2): 234-245.

Mekonnen MM and Hoekstra AY (2011) "The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products". Hydrology and Earth System Sciences 15(5): 1577-1600.

Moreno-Pérez AJ, Lopera-Álvarez OD and Giraldo-Giraldo OR (2021) "Impacto económico de la gestión del riego en la productividad de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia". Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias 23(1): 54-67.

Rodrigues FA, de Andrade CLT and Macedo GM (2019) Economic analysis of sugarcane irrigation under deficit and full irrigation scenarios. Irrigation Science 37(3): 357–366. https://doi.org/10.1007/s00271-018-0602-4

Soares JM, Barbosa JR and Oliveira MT (2012) Physiological responses of sugarcane to water deficit and their implications for crop management. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 16(4): 380–388. https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400013

Zhang H, Wang Q, Wang X and Li X (2021) Impacts of irrigation strategies on sugarcane productivity and water use efficiency in semi-arid regions. Agricultural Water Management 250: 106845. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106845

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Análisis económico del riego por aspersión para plantaciones de palma aceitera en Colombia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Economic evaluation of sprinkler irrigation systems for oil palm plantations in Colombia

Elizabeth Ruiz–Alvarez[1], Camilo Ardila[1], Arley Zapata–Hernández[1], Nolver Arias[1] and Mauricio Mosquera–Montoya[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Costo unitario
Eficiencia en el uso del agua
Indicadores financieros
Rentabilidad

El déficit de agua es uno de los factores más limitantes para la obtención de altos rendimientos en cultivos de palma aceitera. Este documento presenta los resultados de una investigación que evalúa desde un punto de vista económico la implementación de sistemas de riego por aspersión en plantaciones de palma de aceite en dos zonas de Colombia: Zona Norte (900 mm año^{-1} de déficit hídrico) y Zona Oriental (618 mm año^{-1}). Se consideró un escenario comparativo donde el productor no utiliza sistemas de riego. La metodología empleó un modelo económico que integra parámetros técnicos y financieros, considerando costos de inversión (CAPEX) de $14.000.000 ha^{-1} para un sistema de riego por aspersión con eficiencia del 85%. Los indicadores de evaluación económica utilizados fueron: Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), costo unitario, periodo de recuperación de la inversión y relación costo-beneficio. Los resultados indican que a un precio de $733.000 por tonelada de Racimos de Fruta Fresca (RFF), la Zona Norte presenta un VPN de $12.592.348 ha^{-1} con TIR del 11%, mientras que la Zona Oriental registra un VPN de $1.111.185 ha^{-1} con TIR del 9%. El costo unitario resulta 9 - 10% menor con riego por aspersión comparado con el escenario sin riego.

ABSTRACT

Keywords:
Unit cost
Water use efficiency
Financial indicators
Profitability

Water deficit is one of the most limiting factors for obtaining high yields in oil palm crops. This paper presents the results of research that evaluates from an economic perspective the implementation of sprinkler irrigation systems in oil palm plantations in two zones of Colombia: Northern Zone (900 mm year^{-1} water deficit) and Eastern Zone (618 mm year^{-1}). A comparative scenario where the producer does not use irrigation systems was considered. The methodology employed an economic model that integrates technical and financial parameters, considering investment costs (CAPEX) of $14,000,000 ha^{-1} for sprinkler irrigation systems with 85% efficiency. The economic evaluation methods used were: Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), unit cost, payback period, and cost-benefit ratio. Results indicate that at a price of $733,000 per ton of Fresh Fruit Bunches (FFB), the Northern Zone presents an NPV of $12,592,348 ha^{-1} with IRR of 11%, while the Eastern Zone registers an NPV of $1,111,185 ha^{-1} with IRR of 9%. Unit cost is 9-10% lower with sprinkler irrigation compared to the scenario without irrigation.

[1]Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite-CENIPALMA,Colombia. eruiz@cenipalma.org; cjardila@cenipalma.org; adzapata@cenipalma.org; narias@cenipalma.org; mmosquera@cenipalma.org

CC BY NC SA

El rendimiento potencial de la palma de aceite se ve limitado, entre otros factores, por el déficit de agua. Esta situación se traduce en una brecha entre el potencial que ofrecen los materiales genéticos desarrollados y el rendimiento que en realidad obtienen los productores de sus cultivos. En ese sentido, la oferta hídrica determina el potencial de producción de un cultivo (Ittersum et al. 2013).

El rendimiento de la palma de aceite se reduce con precipitaciones inferiores a 2.000 mm año^{-1}, o si se presentan meses con precipitaciones inferiores a 100 mm (Woittiez et al. 2017). En el caso de las regiones palmeras de Colombia al menos una de las condiciones ha sido cierta en los últimos cinco años. Las zonas productoras del país han enfrentado déficits hídricos variables que han oscilado entre 400 mm año^{-1} en la zona oriental hasta 900 mm año^{-1} en la zona norte, lo cual representa un factor limitante significativo para la productividad del cultivo.

Estudios previos refieren que la implementación de sistemas de riego por aspersión ha resultado económicamente viable comparado con sistemas de riego por inundación y cultivos sin riego en la Zona Norte colombiana (Álvarez et al. 2018). No obstante, persistió la necesidad de ampliar este análisis a otras regiones del país y de evaluar la viabilidad económica bajo las condiciones de precios actuales.

Entre las estrategias adoptadas por las empresas palmeras para mitigar el déficit hídrico destacó la implementación de sistemas de riego, siendo el riego por aspersión una alternativa tecnológicamente superior debido a su mayor eficiencia en el uso del agua (85%) frente a los sistemas de riego por inundación (15%).

La eficiencia del 85% en sistemas de riego por aspersión se refiere al porcentaje de agua aplicada que efectivamente es utilizada por las plantas. Este nivel de eficiencia se logra mediante un diseño agronómico e hidráulico adecuado, mantenimiento preventivo de equipos, calibración regular de emisores y monitoreo continuo de la uniformidad de distribución. Factores como la obstrucción de boquillas, variaciones de presión, vientos fuertes y mantenimiento deficiente pueden reducir significativamente esta eficiencia. La superación del 85% es posible mediante tecnologías avanzadas como sensores de humedad del suelo, sistemas de control automatizados y fertirriego integrado.

El presente trabajo abordó una evaluación económica actualizada sobre la adopción de sistemas de riego por aspersión en plantaciones de palma aceitera, considerando los costos y beneficios a largo plazo en condiciones de déficit hídrico de dos zonas representativas de Colombia: la Zona Norte y la Zona Oriental. El objetivo es proporcionar información técnica y económica que facilite la toma de decisiones de inversión por parte de los productores palmeros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un análisis de ingeniería económica para evaluar la viabilidad de invertir en un sistema de riego por aspersión versus no implementar sistemas de riego en plantaciones de palma aceitera.

La evaluación se centró en la estimación de costos y beneficios a lo largo de un proyecto productivo de 30 años, considerando dos escenarios geográficos: Zona Norte caracterizada por suelos con pendientes menores a 3%, texturas francas arenosa y arenosas y precipitaciones entre 974 a 2467 mm año^{-1}, asumiendo un déficit hídrico de 900 mm (Delgado-Revelo 2023); y Zona Oriental con pendientes menores 7%, con precipitaciones entre 2.200 a 3.500 mm año^{-1} asumiendo un déficit hídrico 618 mm (Figura 1).

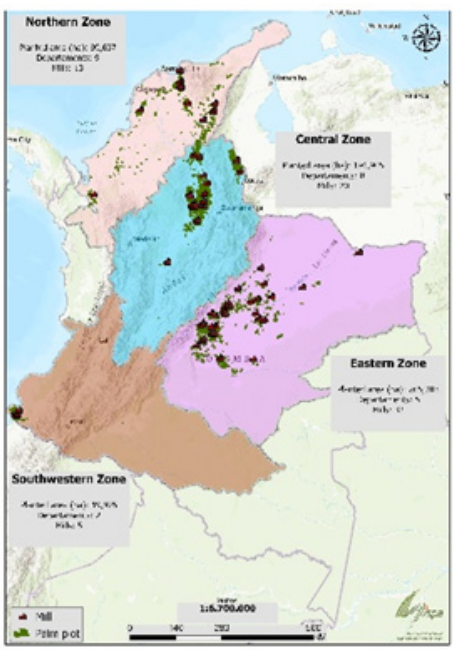


Figura 1. Costos operacionales de riego por aspersión por zona.

Parámetros de evaluación

Se consideró un área de análisis de 100 hectáreas, con un sistema por aspersión convencional de tipo fijo de cobertura total con 72 emisores ha^{-1} con caudal de 384 L h^{-1} $emisor^{-1}$ y eficiencia general del 85%, CAPEX de \$14.000.000 ha^{-1}, respuesta productiva de 25 kg RFF mm^{-1} de agua aplicado y precio de referencia RFF de \$733.000 $tonelada^{-1}$.

Modelo económico

Se desarrolló un modelo que integra cuatro módulos: plan financiero (tasas de interés y financiamiento), sistemas de riego (requerimientos energéticos y de mano de obra), fertilización (estimación de rendimientos y requerimientos nutricionales) y costos operacionales (cosecha, transporte, fertilización y operación del sistema de riego).

Indicadores de evaluación

Se calcularon Valor Presente Neto (VPN) con tasa de descuento del 8,6%, Tasa Interna de Retorno (TIR), costo unitario, relación costo-beneficio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Costos operacionales (OPEX) de sistemas de riego por zona

Los costos operacionales de sistemas de riego por aspersión (Figura 2) mostraron diferencias significativas entre zonas y escenarios. En la Zona Norte, los costos promedio de operación de sistemas de riego por aspersión fueron de \$4.180.000 ha^{-1} $año^{-1}$. En la Zona Oriental, estos costos fueron \$2.950.000 ha^{-1} $año^{-1}$. El componente energético representó el mayor porcentaje en los costos operativos del sistema de riego: 59% en la Zona Norte y 57% en la Zona Oriental. Los requerimientos

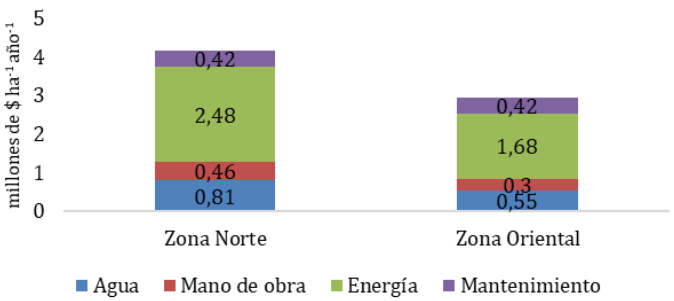


Figura 2. Costos operacionales de riego por aspersión por zona.

energéticos fueron 3.379 kWh $año^{-1}$ en la Zona Norte y 2.320 kWh $año^{-1}$ en la Zona Oriental.

Estimación de costos de producción según escenario

La Tabla 1 presenta una comparación de los costos de producción por hectárea según tres etapas del ciclo productivo de la palma de aceite: improductiva, en desarrollo y adulta. Los datos están desagregados por zona geográfica (Norte y Oriental) y condición de riego (con riego y sin riego), lo que permite identificar variaciones significativas en los costos asociados a cada escenario. En la etapa adulta, los cultivos con riego presentaron costos notablemente superiores: en la zona Norte, el costo por hectárea con riego fue un 116% más alto que sin riego (\$14.402.220 vs. \$6.671.941 ha^{-1} $año^{-1}$), mientras que en la zona Oriental la diferencia alcanza un 76% (\$13.485.549 vs. \$7.644.913 ha^{-1} $año^{-1}$). Estas

Tabla 1. Costo de mantenimiento de una hectárea según escenario (\$ ha^{-1})

Escenario	Improductiva (0 a 3 años)	Desarrollo (3 a 6 años)	Adulta (7 a 25 años)
Norte con riego	10.527.418	14.426.581	14.402.220
Norte sin riego	5.175.256	4.905.678	6.671.941
Oriental con riego	9.583.804	13.134.614	13.485.549
Oriental sin riego	5.855.670	7.063.293	7.644.913

diferencias reflejan el impacto de la infraestructura hídrica sobre los costos operativos, y aportan insumos clave para la evaluación económica de los sistemas productivos según contexto agroecológico.

Indicadores de evaluación económica

La Tabla 2 compara indicadores financieros para cuatro escenarios de cultivo de palma de aceite en Colombia, diferenciados por zona y condición de riego. En todos los escenarios con riego se observa un mejor desempeño, con VPN positivo frente a valores negativos sin riego, TIR más alta (11% vs. 2% en la Zona Norte; 9% vs. 7% en la Zona Oriental) y reducción del costo unitario entre un 9% y un 10%.

Tabla 2. Indicadores económicos por escenario.

Indicadores financieros	Norte con riego	Norte sin riego	Oriental con riego	Oriental sin riego
Costo unitario ($ t FF^{-1})	$ 515.698	$ 693.996	$ 536.935	$ 597.369
VPN ($ ha^{-1})	$ 12.592.348	- $ 12.598.934	$ 1.111.185	- $ 5.011.805
TIR (%)	11%	2%	9%	7%
Relación Beneficio/costo	1,08	0,82	1,01	0,94

CONCLUSION Y DISCUSIÓN

La evaluación económica realizada demuestra que la implementación de sistemas de riego por aspersión es una alternativa financieramente viable y superior al manejo sin riego en plantaciones de palma de aceite ubicadas en zonas de Colombia con déficit hídrico significativo.

Estos resultados confirman y amplían las conclusiones de Álvarez et al. (2018) a una nueva región geográfica, y se alinean con la evidencia internacional sobre la viabilidad económica de los sistemas de riego presurizados en agricultura. La superioridad económica del riego por aspersión se sustenta en factores clave, entre ellos su alta eficiencia en el uso del agua (85%), que optimiza la inversión en un recurso que concentra la mayor parte de los costos operativos.

No obstante, la adopción de tecnologías avanzadas de irrigación en el sector palmero sigue siendo baja. Martínez-Arteaga et al. (2023) señalan que menos del 15% de los productores las utilizan, influenciados por factores como el acceso a servicios de extensión. Para revertir esta tendencia, es fundamental generar condiciones que favorezcan la adopción, incluyendo apoyo financiero.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Fondo de Fomento Palmero por los recursos para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

Álvarez M, Ruiz E, Mosquera M and Silva J (2018) Evaluación económica de sistemas de riego para plantaciones de palma aceitera en la Zona Norte de Colombia. Revista Palmas 39(1).

Sánchez JC (2020) Riego en el cultivo de palma de aceite: consideraciones técnicas para alcanzar el potencial productivo. Boletín La Palma 16.

Ittersum VMK, Cassman KG, Grassini P, Wolf J, Tittonell P and Hochman Z (2013) Yield gap analysis with local to global relevance—A review. Field Crops Research 143: 4–17. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009

Woittiez LS, van Wijk MT, Slingerland M, van Noordwijk M and Giller KE (2017) Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. European Journal of Agronomy 83: 57–77. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Avances en el benchmarking: caracterización operativa de los sistemas de riego en zona norte

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Advances in benchmarking: operational characterization of irrigation systems in the northern zone

Camilo José Ardila Badillo[1], Elizabeth Ruíz Álvarez[1] and Arley David Zapata Hernandez[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Benchmarking
Déficit hídrico
KPI's
Palma de aceite
Riego por aspersión

El 17% del área sembrada en palma de aceite de Colombia se encuentra ubicada en la región norte, donde se ha identificado que la escases de agua es uno de los factores limitantes de la productividad del cultivo. Los sistemas de riego han sido adoptados como mecanismo para mitigar los efectos negativos asociados al déficit hídrico, por tanto, resulta de interés para el productor el hacer seguimiento de las condiciones operativas del sistema para asegurar condiciones óptimas mediante la estimación de Indicadores Claves de desempeño (KPI´s). Este estudio de benchmarking tuvo como objetivo el caracterizar e identificar las divergencias en la operatividad de los sistemas de riego con enfoque en la zona norte del país. El estudio se centró en sistemas de riego por aspersión, recopilando datos operativos de la vigencia 2023. Los resultados indican que el consumo de agua, energía y mano de obra pueden variar entre 5.786-9.456 m^3 ha^{-1} $año^{-1}$, 996-2.206 kWh ha^{-1} $año^{-1}$ y 4,2-5,6 jornales ha^{-1} $año^{-1}$ respectivamente. El comportamiento de estos parámetros vario en función del déficit hídrico experimentado, disponibilidad y tipo de fuente de abastecimiento, potencia de equipo, presencia de elementos de automatización y los esquemas de operación en las plantaciones.

ABSTRACT

Keywords:
Benchmarking
Water shortages
KPI's
Oil palm
Sprinklers irrigation

17% of Colombia's oil palm plantation area is located in the northern region, where water scarcity has been identified as one of the limiting factors for crop productivity. Irrigation systems have been adopted as a mechanism to mitigate the negative effects associated with water shortages; therefore, it is in the producer's interest to monitor the system's operating conditions to ensure optimal conditions by estimating Key Performance Indicators (KPIs). This benchmarking study aimed to characterize and identify discrepancies in the operation of irrigation systems, focusing on the northern region of the country. The study focused on sprinkler irrigation systems, collecting operational data from the 2023 period. The results indicate that water, energy, and labor consumption can vary between 5,786 and 9,456 m^3 ha^{-1} $year^{-1}$, 996 and 2,206 kWh ha^{-1} $year^{-1}$, and 4.2 and 5.6 days ha^{-1} $year^{-1}$, respectively. The behavior of these parameters varies depending on the water deficit experienced, availability and type of supply source, equipment power, presence of automation elements, and the operating schemes on the plantations.

[1]Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, Colombia. cjardila@cenipalma.org; eruiz@cenipalma.org; adzapata@cenipalma.org

CC BY NC SA

El déficit hídrico genera efectos a nivel fisiológico en el cultivo de la palma de aceite, autores como Woittiez et al. (2017) identificaron que por cada 100 mm de déficit la productividad puede caer en un 10-20%.

La viabilidad económica del cultivo se ve afectada por la caída de la producción, por tanto, resulta de interés para los productores el desarrollar prácticas y tecnologías que resulten viables económicamente y permitan salvaguardar la sostenibilidad del cultivo.

Una estrategia para mitigar los efectos negativos del déficit hídrico son los sistemas de riego. En evaluaciones económicas realizadas por Álvarez et al. (2017), Sánchez (2020) y Mosquera-Montoya et al. (2025) coinciden en que la implementación de sistemas de riego permite mejorar el desempeño de los principales indicadores económicos como el Valor Presente Neto (VPN), costo unitario, entre otros, debido al aumento de la productividad del cultivo.

Para lograr los beneficios asociados a su implementación es necesario realizar seguimiento de la operatividad de los sistemas de riego de manera que se pueda garantizar sus condiciones óptimas de operación. En este contexto los estudios de referenciación competitiva (Benchmarking) se constituyen como una herramienta útil para la selección, estandarización y evaluación de indicadores útiles para el seguimiento de los sistemas de riego, ya que por su enfoque comparativo busca identificar las causas de divergencia entre plantaciones que impactan positivamente en el desempeño de estos. Permitiendo además, el incremento de la productividad y la reducción de los costos de producción (Mosquera-Montoya y Gallego-Velasco 2005).

La hipótesis de este trabajo en proceso es evaluar la pertinencia de indicadores en la descripción de la operatividad de los sistemas de riego, en términos del consumo de agua, energía y jornales por hectárea al año.

A pesar de los esfuerzos previamente realizados en la evaluación del impacto agronómico y económico de los sistemas de riego en el cultivo de palma de aceite, en estos no se han abordado los indicadores claves para el seguimiento y evaluación de las condiciones operativas de estos sistemas. Por tal razón, este estudio tiene como objetivo el proponer y evaluar la variabilidad de indicadores que permitan describir en termino de los factores de costos (agua, energía y mano de obra) la operatividad de los sistemas considerando datos históricos de operación en 4 plantaciones ubicadas en la zona norte palmera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en tres diferentes etapas:

Fase de planeación

Socialización y selección de participantes. Este estudio se realizó en cuatro plantaciones de la zona norte ubicadas en las subzonas de Cesar, norte del Cesar y Magdalena. De estas plantaciones se seleccionaron 7 lotes considerando los siguientes criterios: cultivares *E. guineensis;* edad del lote igual o mayor a 7 años (etapa adulta); contar con sistemas de riego con al menos 3 años de operación y disponibilidad de datos de la operación en esta temporalidad; disponibilidad de datos agronómicos como textura del suelo, dosis de fertilización anual y productividad.

Definición de indicadores claves de seguimiento. Los indicadores clave (KPI's, por sus siglas en inglés) fueron definidos en conjunto con el equipo técnico de las empresas participantes.

La caracterización de los sistemas de riego se hizo teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

Agua	Energía	Mano de obra
• Volumen bruto • Lamina apicada • Déficit hídrico potencial • Frecuencia de riego • Tiempo de riego	• Consumo energético • Índice de mecanización del Sistema de riego	• Intensidad en el uso de la mano de obra

Figura 1. Parámetros de caracterización de los sistemas de riego.

Los indicadores de seguimiento propuesto en esta etapa del proyecto fueron:

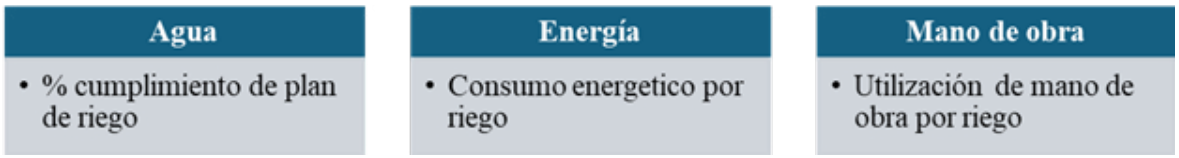


Figura 2. Indicadores de sistemas de riego.

Toma de datos

Esta etapa correspondió a la captura de datos para la caracterización de las plantaciones y los sistemas de riego presentes. Para la captura de información primaria se realizaron visitas a las plantaciones participantes donde se entrevistó al personal técnico y administrativo relacionado con la operación del sistema de riego (dueños del proceso).

Tabla 1. Condiciones técnicas de los sistemas de riego por aspersión.

Plantaciones	Lote	Tipo de emisor	Emisores por hectárea	Frecuencia de riegos	Riegos	Tiempo de riego	Volumen bruto
			Emisores ha^{-1}	Días $riego^{-1}$	Riegos $año^{-1}$	Horas $turno^{-1}$	$m^3\ ha^{-1}\ año^{-1}$
A	A-1	ERHAS 16-15	36	2	99	4,1	6.123
	A-2	LWP 2450	36	2	99	5,3	7.399
	A-3	ERHAS 16-15	36	2	96	4,7	7.095
	A-4	Mini Wobbler	72	2	99	5,4	7.688
B	B-1	Mini Wobbler	72	2	58	6,0	7.907
C	C-1	Mini Wobbler	72	2,5	41	12	5.786
D	D-1	RainBird LF1200	48	2	45	7,1	9.456

Análisis de datos

La estimación y el análisis del comportamiento de los parámetros de caracterización e indicadores se realizó bajo el enfoque de la estadística descriptiva.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consumo del recurso hídrico. Las causas de variación de estos parámetros se deben a diferencias en el déficit hídrico experimentado en cada plantación, disponibilidad del recurso hídrico e incidencias a nivel operativo del sistema de riego. Se destaca la plantación C que debido a incidencias en el sistema de bombeo se vio afectada la capacidad de operación del sistema, por lo que como parte de una estrategia de mitigación, la duración de las jornadas de riego se extendieron.

Tabla 2. Utilización de la mano de obra.

Plantaciones	Sistema de bombeo	Área regada al día	Duración jornada de riego	Tiempo con presencia del operario	Personal involucrado	Intensidad de la mano de obra	
		ha	Horas $jornada^{-1}$	Hora $día^{-1}$	Personal $día^{-1}$	Jornales ha^{-1} $riego^{-1}$	Jornales ha^{-1} $año^{-1}$
A	A-1	95,5	16,3	14	3	0,05	4,7
	A-2	91,0	16,8		3	0,04	4,4
	A-3	78,2	16,3		3	0,04	4,2
	A-4	98,8	16,3		3	0,05	4,5
B	B-1	20,8	18	12,0	2	0,06	5,6
C	C-1	28,0	24	24,0	3	0,12	4,8
D	D-1	38,4	12,1	12,1	3	0,12	5,4

Los esquemas adoptados por las plantaciones A y B resultan ser los más eficientes en el uso de la mano de obra. Esto se debe a que los sistemas de bombeo en estas plantaciones cuentan con elementos de seguridad que permiten su operación sin supervisión constante.

CONCLUSION

En los sistemas de riego presurizado se han identificado variedad en sus condiciones operativas, lo cual se debe a las condiciones específicas de la plantación como la disponibilidad del recurso hídrico, déficit hídrico, consumo de energía, entre otros.

Este ejercicio de caracterización ha permitido identificar y generar valores de referencia de la operación de los sistemas de riego.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma, por financiar esta investigación y a las plantaciones participantes por permitir el acceso a la información.

REFERENCIAS

Álvarez O, Ruiz-Álvarez E, Mosquera-Montoya M, and Silva JH (2017) Evaluación económica de sistemas de riego para plantaciones de palma aceitera en la Zona Norte de Colombia. Revista Palmas 38(4): 69–85.

Mosquera-Montoya M, Arias-Arias NA, Camperos-Reyes JE, Munévar-Martinez DE, Hoyos W, Morales C et al. (2025) Productividad y TEA: Análisis económico de prácticas orientadas a incrementar la productividad.

Mosquera-Montoya M, and Gallego-Velasco MC (2005). Referenciación Competitiva para la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. https://www.researchgate.net/publication/343323527

Sánchez JC (2020) Riego en el cultivo de palma de aceite: consideraciones técnicas para alcanzar el potencial productivo. Boletín La Palma 16.

Woittiez LS, van Wijk MT, Slingerland M, van Noordwijk M and Giller KE (2017) Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. European Journal of Agronomy 83: 57–77. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Infiltración en suelos arcillosos con fragmentos rocosos compactados en condiciones de laboratorio

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Infiltration in clay soils with compacted rock fragments under laboratory conditions

Diana Paola Vargas Rodríguez[1]* and Nicolás Duarte Cano[2]

Palabras clave:
Fragmentos rocosos
Infiltración
Infiltrómetro minidisco
Propiedades hidrofisicas
Suelo

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de fragmentos rocosos (FR: 0, 10, 20, 30 y 40%) sobre la tasa de infiltración en un suelo arcilloso compactado en laboratorio. La infiltración se midió con un infiltrómetro de minidisco, bajo condiciones controladas de humedad (21,41±0,17%) y porosidad (42,87±2,37%). Con los datos se construyeron las curvas de infiltración acumulada y de tasa de infiltración, ajustándose esta última a los modelos de Philip, Kostiakov y Kostiakov-Lewis, a partir de los cuales se estimaron la sortividad (S), conductividad hidráulica (K) y velocidad de infiltración básica (VIB). Los resultados indicaron que el tratamiento con 20% FR empleó menor tiempo de infiltración y presentó las mayores tasas inicial y final, mientras que 30% FR alcanzó tasas más bajas requiriendo mayor tiempo. Los modelos Kostiakov y Kostiakov-Lewis describieron mejor la dinámica de la tasa de infiltración, con un ajuste asociado a la VIB. Aunque el análisis de varianza no mostró diferencias significativas (P>0,05), la tendencia sugiere que contenidos intermedios de FR favorecen la infiltración, mientras que proporciones mayores la restringen. Estos hallazgos aportan evidencia sobre cómo la tasa de infiltración en suelos arcillosos varia con la proporción de FR.

Keywords:
Rock fragments
Infiltration
Minidisc infiltrometer.
Hydrophysical properties
Soil

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of different proportions of rock fragments (RF: 0, 10, 20, 30, and 40%) on the infiltration rate of a compacted clay soil under laboratory conditions. Infiltration was measured using a mini-disk infiltrometer under controlled moisture (21.41±0.17%) and porosity (42.87±2.37%) conditions. From experimental data, cumulative infiltration and infiltration rate curves were obtained, with the latter fitted to the Philip, Kostiakov, and Kostiakov-Lewis models. Sorptivity (S), hydraulic conductivity (K), and basic infiltration rate (VIR) were estimated from these models. Results indicated that the 20% RF treatment required less infiltration time and exhibited the highest initial and final rates, while the 30% RF treatment showed lower rates and required more time. The Kostiakov and Kostiakov-Lewis models better described the dynamics of infiltration rate, with adjustments linked to VIR. Although the analysis of variance showed no significant differences (P>0.05), the trend suggests that intermediate RF content enhances infiltration, whereas higher proportions restrict it. These findings provide evidence of how the infiltration rate in clayey soils varies with the proportion of RF.

[1]Facultad de Ingeniería, Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
[2]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
*Corresponding author: dipvargasro@unal.edu.co

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

La velocidad de infiltración proporciona información importante para el desarrollo de prácticas de manejo y uso del suelo orientadas a prevenir procesos de degradación (Fachi et al. 2023). Sin embargo, la mayoría de los enfoques metodológicos empleados para su evaluación no consideran la influencia de los fragmentos rocosos (FR), y los estudios que sí lo hacen se han concentrado principalmente en zonas septentrionales, con escasa atención a contextos tropicales (Leal Villamil et al. 2021). Algunos autores han reportado que la presencia de FR puede aumentar la tortuosidad del flujo, restringiendo el movimiento del agua y reduciendo la infiltración (Beibei et al. 2009). En contraste, otros señalan que los FR favorecen la formación de macroporos y caminos preferenciales, lo que incrementa la infiltración (Fachi et al. 2023; Jiaxin et al. 2025). Así mismo, ambos efectos han sido observados de manera simultánea en una misma investigación (Wu et al. 2021; Ipaz and Viveros 2024). Estos resultados, que evidencian impactos tanto positivos como negativos e incluso ambivalentes de los FR sobre la infiltración, reflejan la complejidad del fenómeno. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes proporciones de FR sobre la dinámica de la tasa de infiltración, mediante el análisis de curvas de infiltración y ajuste de modelos que permitieron estimar parámetros hidráulicos adicionales para la comparación entre tratamientos. Con base en esto, se planteó la hipótesis según la cual la proporción de FR modifica la dinámica de la tasa de infiltración en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue llevado a cabo en el Laboratorio de Física de Suelos, de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Se prepararon cinco tratamientos consistentes en mezclas de suelo arcilloso con diferentes proporciones en peso de FR: 0%, 10%, 20%, 30% y 40%. El suelo base fue recolectado en Pradilla, municipio El Colegio, Cundinamarca (4°35'54,6" N 74°24'31,9" W), a partir de una muestra compuesta obtenida entre 0–30 cm de profundidad, la cual fue secada al aire, molida y tamizada con malla N°10, separando la fracción fina (<2,0 mm) de los FR (>2,0 mm).

Para la fracción rocosa se determinó una granulometría predominante entre 2,00–4,75 mm y forma principalmente esférica. La fracción fina de suelo fue caracterizada como de textura arcillosa (método de Bouyoucos), con humedad óptima de compactación de 21,41% (método Proctor Estándar). También se determinó la densidad aparente (método del cilindro) y la densidad real (método del picnómetro), para calcular la porosidad (42,87±2,37%). Los valores obtenidos en estas pruebas se emplearon como condiciones iniciales para el ensayo de infiltración.

Las mezclas de fracción fina y FR se compactaron siguiendo el procedimiento del ensayo Proctor Estándar, aplicando una energía de compactación de 597 kJ m^{-3}. El ensayo de infiltración se realizó con un infiltrómetro de minidiscos de 4,5 cm de diámetro, configurado con una succión constante de -0,5 cm. Para cada tratamiento se midió el tiempo acumulado necesario para infiltrar 15 mL (9,43 mm), registrando el tiempo por cada mililitro infiltrado.

Cada tratamiento fue replicado dos veces. Las repeticiones se promediaron para construir la curva de infiltración acumulada y la tasa de infiltración, reportándose en esta última la desviación estándar respectiva. Los datos experimentales obtenidos para la tasa de infiltración de cada repetición se ajustaron a los modelos de infiltración de Philip, Kostiakov y Kostiakov–Lewis mediante regresión no lineal, minimizando el error cuadrático medio (RMSE) entre los valores observados y estimados. Finalmente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) a los parámetros estimados de cada modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La curva de infiltración acumulada (Figura 1a) mostró que el tratamiento con 20% de FR presentó el menor tiempo para infiltrar la lámina de 9,43 mm (75,66±36,15 min), siendo 32,42% más rápido que el control (0%: 111,96±56,10 min). En contraste, los tratamientos con 10, 30 y 40% fueron más lentos que el control en 18,94, 72,44 y 33,83%, respectivamente, destacándose 30% como el tratamiento que requirió más tiempo (193,07±38,70 min). Esta tendencia coincidió con la curva de tasa de infiltración (Figura 1b), donde el 20% alcanzó las tasas inicial y final más altas (1,17±1,08 y 0,10±0,04 mm min^{-1}), mientras que el 30% registró las más bajas (0,24±0,49 y 0,04±0,01 mm min^{-1}). Se observó que alrededor de los 40 min todos los tratamientos muestran una tasa hacia la estabilización.

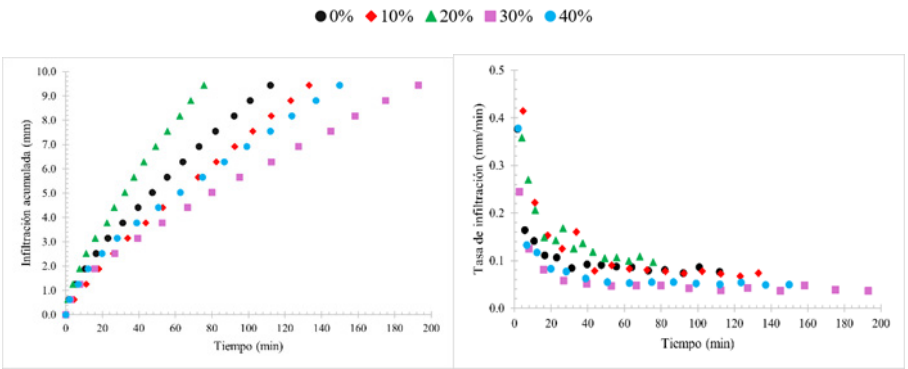


Figura 1. (a) Infiltración acumulada media y (b) tasa de infiltración media.

El desempeño positivo encontrado para 20% sugiere la existencia de un contenido de FR óptimo que promueve la formación de caminos preferenciales que facilitan el movimiento del agua en el suelo. Sin embargo, al superar cierto umbral, los FR incrementan la tortuosidad del flujo al reducir el área efectiva de infiltración, lo que genera tasas de infiltración más bajas y por lo tanto tiempos de infiltración más prolongados como se evidenció en el tratamiento de 30%. Wu et al. (2021) observaron que, aunque la infiltración disminuyó progresivamente con el aumento del contenido de FR, alcanzó un mínimo en 40% y evidenció un efecto positivo alrededor de 30% atribuido a la formación de poros lacunares en la interfase fracción fina y FR. De manera similar, Beibei et al. (2009) identificaron un contenido crítico alrededor de 40%, en el que la interconexión entre macroporos generados alrededor de los FR predominó sobre la tortuosidad, lo que resultó en un efecto positivo sobre la infiltración.

El ajuste de los datos experimentales a los modelos de infiltración (Tabla 1) mostró que el modelo de Kostiakov-Lewis tuvo un mejor desempeño para los tratamientos 10 y 20% mientras que Kostiakov presentó el mejor ajuste para los tratamientos 0, 30 y 40%, al reportarse el menor RMSE en cada caso. Este comportamiento difiere parcialmente de lαo reportado

Tabla 1. Parámetros de ajuste y RMSE para los modelos de infiltración Philip, Kostiakov y Kostiakov-Lewis.

FR (%)	Philip				Kostiakov			Kostiakov-Lewis			
	A	S	K	RMSE	a	k	RMSE	a	k	VIB	RMSE
0	0,056 ±0,039 [a]	0,411 ±0,025 [a]	0,012 ±0,010 [a]	0,054	0,666 ±0,064 [a]	0,412 ±0,017 [a]	0,051	0,478 ±0,025 [a]	0,425 ±0,012 [a]	0,058 ±0,042 [a]	0,059
10	0,043 ±0,004 [a]	0,437 ±0,459 [a]	0,011 ±0,001 [a]	0,055	0,732 ±0,177 [a]	0,407 ±0,435 [a]	0,054	0,503 ±0,023 [a]	0,571 ±0,445 [a]	0,040 ±0,001 [a]	0,044
20	0,054 ±0,011 [a]	0,664 ±0,477 [a]	0,013 ±0,003 [a]	0,104	0,621 ±0,114 [a]	0,717 ±0,519 [a]	0,101	0,455 ±0,028 [a]	0,597 ±0,466 [a]	0,062 ±0,007 [a]	0,084
30	0,024 ±0,005 [a]	0,359 ±0,030 [a]	0,006 ±0,001 [a]	0,046	0,627 ±0,016 [a]	0,334 ±0,063 [a]	0,043	0,432 ±0,027 [a]	0,218 ±0,057 [a]	0,028 ±0,007 [a]	0,051
40	0,029 ±0,008 [a]	0,426 ±0,033 [a]	0,007 ±0,002 [a]	0,058	0,619 ±0,031 [a]	0,410 ±0,104 [a]	0,055	0,448 ±0,001 [a]	0,475 ±0,033 [a]	0,034 ±0,009 [a]	0,066

FR fragmentos rocosos; A [mm min-1], sortividad S [mm $min^{-1/2}$] conductividad hidráulica K[mm min^{-1}]; k [mm $min^{-\alpha}$]], 0 < *a* < 1 exponente adimensional; velocidad de infiltración básica VIB [mm min^{-1}]; raíz del error cuadrático medio RMSE [mm min^{-1}]; [a] indica que no se encontraron diferencias significativas *P>0,05.*

en la literatura para ensayos en campo, donde el modelo de Kostiakov suele ser más adecuado para tiempos cortos y el de Kostiakov-Lewis para tiempos prolongados. Los resultados obtenidos sugieren que la capacidad de ajuste estuvo más relacionada con la magnitud de la VIB que con la duración del proceso, considerando que la VIB para los tratamientos 10 y 20% se encontró dentro de las más altas registradas, mientras que para los tratamientos 30 y 40% la tasa final fue más baja.

En el modelo de Philip, S aumentó de 0 a 20%, disminuyó en 30% y volvió a incrementarse en 40%, mostrando un patrón oscilatorio. K y VIB siguieron la misma tendencia de la tasa de infiltración, con valores máximos en 20%, mínimos en 30% y niveles intermedios en 0, 10 y 40%. Para los modelos Kostiakov y Kostiakov-Lewis el parámetro *k*, vinculado a la humedad inicial del suelo, debería ser similar entre tratamientos, sin embargo, se observaron valores superiores en 20% FR (Kostiakov) e inferiores en 30% FR (Kostiakov-Lewis), asociados a diferencias encontradas en la tasa de infiltración. El exponente *a*, presentó una mejor consistencia entre tratamientos para cada modelo, al depender de la textura del suelo (arcillosa para todos los tratamientos); las diferencias pueden estar atribuidas a otras variables asociadas como la estructura y el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. También se ha encontrado que el término VIB incluido en el modelo de Kostiakov-Lewis produce una reducción de los valores de los parámetros *a* y *k* (Romay et al. 2023).

Respecto al análisis estadístico, el ANOVA no mostró diferencias significativas para los parámetros de ajuste $P>0,05$. La variabilidad experimental de la tasa de infiltración, expresada como desviación estándar (Figura 2), presentó una tendencia decreciente con el tiempo en todos los tratamientos. La desviación inicial alta, se atribuye a las diferencias en la superficie del suelo, generadas durante el proceso de compactación, en particular al enrasamiento de la última capa, que puede generar irregularidades y marcar un efecto diferenciador en los primeros instantes de la infiltración. Este resultado es coherente con lo reportado por Bagarello et al. (2025), quienes señalan que los parámetros de infiltración diferían hasta 2,7 veces probablemente porque la energía de compactación del suelo variaba con el procedimiento aplicado.

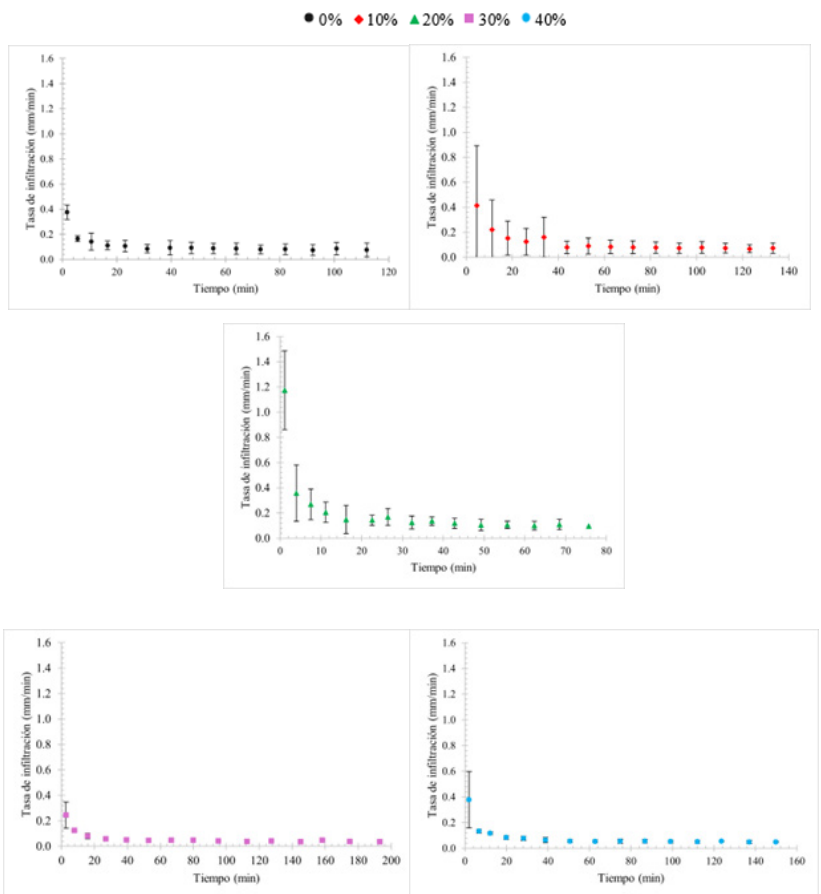


Figura 2. Desviación estándar de la tasa de infiltración media.

CONCLUSION

La proporción de FR modificó la dinámica de la tasa de infiltración del suelo, con un desempeño favorable en 20%, que redujo el tiempo e incrementó la tasa, y un efecto contrario en 30% donde la infiltración se ralentizó debido a una tasa más baja. Los modelos de Kostiakov y Kostiakov-Lewis describieron mejor los datos, sugiriendo que la capacidad de ajuste dependió de la magnitud de la velocidad de infiltración básica. Aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas, la tendencia observada sugiere la necesidad de aumentar el número de repeticiones para disminuir la variabilidad y confirmar los patrones encontrados. Estos resultados aportan evidencia sobre cómo la tasa de infiltración en suelos arcillosos se ve influenciada por el contenido de FR, identificándose un umbral óptimo que sugiere la posibilidad de alcanzar condiciones de infiltración favorables, lo cual representa un escenario prometedor para el manejo de suelos pedregosos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue posible gracias al apoyo del Laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, así como a la orientación del profesor Nicolás Duarte Cano y la colaboración del laboratorista Norberto Alfonso Pérez. Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Bagarello V, Barone S, Caltabellotta G, et al (2025) A Test of Factors Influencing One-Dimensional Mini-Disk Infiltrometer Experiments on Repacked Loam Soil Columns. Hydrology 12: 85. https: //doi.org/10.3390/HYDROLOGY12040085

Beibei Z, Ming'an S, Hongbo S (2009) Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil. Comptes Rendus Geoscience 341: 462–472. https: //doi.org/10.1016/J.CRTE.2009.03.009

Fachi SM, Gubiani PI, Pedron F de A, Rauber LR (2023) Rock-soil skeleton increases water infiltration. Rev Bras Cienc Solo 47: . https: //doi.org/10.36783/18069657RBCS20230029

Ipaz S, Viveros D (2024) Efecto de los fragmentos de roca sobre el movimiento de agua en suelos disturbados. Memorias del XII Congreso Colombiano de Ingeniería Agrícola, Biosistemas y Afines, I Encuentro internacional de aplicaciones de Ingeniería en agricultura y sistemas biológicos 196–199

Jiaxin L, Ziming D, Liding C, et al (2025) Quantifying the influence of soil-rock interfaces on water infiltration rate in karst landscapes. Geoderma 460: . https: //doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2025.117432

Leal Villamil J, Avila Pedraza EA, Lobo Luján D, Hernández Atencia Y (2021) Los fragmentos de roca. Origen e influencia en la infiltración y propiedades hidráulicas de los suelos. Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. https: //doi.org/10.16925/9789587603439

Romay C, Sainato C, Iseas M, Lemeillet F (2023) Comportamiento del proceso de infiltración del agua en un suelo bajo riego complementario. Ciencia del suelo 41:

Wu X, Meng Z, Dang X, Wang J (2021) Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of Inner Mongolia, China. Soil and Water Research 16: 151–163. https: //doi.org/10.17221/107/2020-SWR

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Viabilidad de tubería de drenaje agrícola en guadua en la Universidad Surcolombiana sede Pitalito

Feasibility of an agricultural drainage pipeline made of guadua at the Universidad Surcolombiana in Pitalito

Edinson Mujica Rodriguez[1]*, Jesús Alberto Guzmán Alvarez[1] and Yaqueline Casas Motta[1]

Palabras clave:
Drenaje agrícola
Guadua
Plan de manejo ambiental
Pitalito
Tubería en guadua

RESUMEN

La granja experimental de la Universidad Surcolombiana ubicada en el municipio de Pitalito-Huila a 1.277 msnm, temperaturas entre los 18-21 °C, precipitaciones de 1.516 mm año^{-1} y topografía plana, tiene condiciones que la convierten en un espacio ideal para el desarrollo de diversos cultivos, pero presenta limitaciones de drenaje agrícola. Es por esto que en el año 2021 se instaló un sistema de drenaje con 16 tuberías en guadua de 3 m de longitud y 3 m de separación en dos tratamientos (T1, T2). Ahora se evaluó su viabilidad con un tratamiento testigo (T3) sin tubería; se midieron las propiedades hidrodinámicas del suelo, encontrando cambios en la conductividad hidráulica que pasó de 0,298 a 0,37 m día^{-1} y la humedad del suelo de 55% a 42%, además de estabilizar el nivel freático. Para determinar el precio de una tubería se contabilizó tiempos y costo por hora, el valor hallado fue $23.982/tubería, más el uso del banco de perforación de entrenudos. El análisis ambiental se fundamentó en los métodos: Matriz de Leopold, diagrama de redes, calificaciones de Arboleda y Battelle-Columbus, aplicando tres escenarios (E). Los resultados evidencian que el drenaje además de reducir el exceso de humedad genera empleo agrícola en el mejor escenario que fue E3.

Keywords:
Agricultural drainage
Bamboo
Environmental management plan
Pitalito
Bamboo pipes

ABSTRACT

The experimental farm of the Universidad Surcolombiana, located in the municipality of Pitalito, Huila, at 1,277 meters above sea level, with temperatures between 18 and 21 °C, rainfall of 1,516 mm year^{-1}, and flat topography, has conditions that make it an ideal space for the development of various crops, but it has agricultural drainage limitations. For this reason, in 2021, a drainage system with 16 guadua pipes, 3 meters long and 3 meters apart, was installed in two treatments (T1 and T2). Its viability was now evaluated with a control treatment (T3) without pipes; the hydrodynamic properties of the soil were measured, finding changes in hydraulic conductivity, which went from 0.298 to 0.37 m day^{-1}, and soil humidity from 55 to 42%. The water table was also stabilized. To determine the price of a pipeline, time and cost per hour were calculated, resulting in a value of $23,982/pipe, plus the use of an internode drilling bench. The environmental analysis was based on the Leopold matrix, network diagram, Arboleda qualifications, and Battelle-Columbus methods, applying three scenarios (E). The results show that drainage, in addition to reducing excess moisture, generates agricultural employment in the best-case scenario, which was E3.

[1]Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana, Pitalito, Colombia. edinson.mujica@usco.edu.co; u20181169848@usco.edu.co; u20202191256@usco.edu.co
*Corresponding author

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

La granja es un espacio académico-natural que forma parte del ecosistema de transición andino entre la Cordillera Central y la Cordillera Oriental, con suelos franco-arcillosos y una pendiente menor al 5%. El balance hídrico positivo del área ha generado condiciones de encharcamiento, problemas de drenaje agrícola, los cuales han sido objeto de estudios académicos e investigativos, como el desarrollo de tecnologías sostenibles para el manejo del exceso de agua en los suelos agrícolas.

En el ámbito productivo, se propone desarrollar actividades en cultivos como maíz, pimentón, café y hortalizas, con enfoque en el aprovechamiento de recursos locales y prácticas de bajo impacto ambiental. Recientemente, se ha instalado un sistema experimental de drenaje en guadua con el fin de ayudar a disminuir el contenido de agua en el suelo, en esta investigación se evaluó su viabilidad técnica, económica y ambiental, como una alternativa ecológica frente a los sistemas convencionales. Se realizó un ejercicio de viabilidad técnica preliminar pues se espera continuar, aunque en primera instancia se comprobó que la tubería en guadua es viable técnicamente, con limitado e indeterminado tiempo de vida útil, también se determinó la factibilidad económica de la guadua como tubería de drenaje en la Sede Pitalito aunque por ser un proceso de investigación el valor unitario es mayor que el que realmente invertiría un agricultor que tenga guadua en su predio y quiera solucionar el problema de drenaje con la metodología propuesta.

En este sentido, la implementación de un Plan de Manejo Ambiental (PMA) contribuirá a orientar las decisiones hacia un equilibrio entre la productividad, la conservación ambiental y la utilidad de la tecnología que se está evaluando para proponer a la comunidad científica y pequeños productores agrícolas interesados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Evaluación técnica preliminar

Estudio agrológico: Determinación de las propiedades físicas de los suelos del área experimental de la Universidad Surcolombiana Sede Pitalito, además de pruebas hidrodinámicas; mediciones de infiltración, conductividad hidráulica y humedad del suelo, mediante anillos de infiltración, pozo barrenado, método gravimétrico. Medir nivel freático: estudio del nivel freático en el área de estudio mediante piezómetros y pozos de observación en los tratamientos T1 y T2 con drenaje en guadua, que difieren en la pendiente de las tuberías de drenaje una del 2% y otra del 3% respectivamente, y el tratamiento T3 sin sistema de drenaje agrícola.

Evaluación económica del sistema previamente instalado

Análisis de Precios Unitarios (APU): Estudio de costos de producción e instalación del diseñó de la tubería de guadua propuesta por Caranton y Molina (2021) y comparación con tres cotizaciones de tubería de diámetro similar (3 - 4" ó 7,62-10,16 cm).

Evaluación ambiental

Para la identificación, evaluación y priorización de los impactos ambientales generados por las actividades desarrolladas en la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana – Sede Pitalito con la tubería de drenaje en guadua, se aplicaron tres metodologías ampliamente reconocidas: la matriz de Leopold, el diagrama de redes, la matriz de Evaluación de Impacto Ambiental Battelle-Columbus, junto con la Calificación Ambiental de Arboleda. Estas herramientas permitieron realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de los impactos positivos y negativos.

A su vez, la metodología Battelle-Columbus posibilitó la cuantificación del grado de afectación o beneficio ambiental de las actividades, mediante la asignación de valores de importancia relativa a diversos indicadores de calidad ambiental, mientras que la calificación de Arboleda complementó este análisis con un enfoque adaptado al contexto local. Estos métodos fueron aplicados considerando tres escenarios: sin intervención (E1), con intervención sin medidas de mitigación (E2) y con intervención aplicando un plan de manejo ambiental (E3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación técnica preliminar

En el estudio agrológico se encontró a una profundidad de 22 centímetros textura franco arcillosa (FA) con un color negro 10YR 4/2 en la escala de Munsell, en una profundidad de 48 cm con una textura FA con un color gris con tonalidades naranjas de referencia 10YR 6/2 de las dos muestras tomadas del T1 y T2. Así mismo, la primera muestra con una humedad del 55% y la otra presentó una humedad del 22%, datos obtenidos

mediante secado del suelo en el laboratorio de física de la universidad Surcolombiana sede Pitalito por medio de un horno de convención forzada a 105 °C por 24 horas, con estos resultados se puede inferir que el drenaje ha mejorado la conductividad del suelo presente como lo afirmaron investigadores de Francia donde encontraron que el drenaje cambia la hidrografía del suelo (Henine et al. 2022).

La infiltración se realizó por el método de los anillos concéntricos. La gráfica de lámina infiltrada acumulada (I) en los 40 minutos que se evaluaron, donde la ecuación de regresión más cercana a los datos fue la potencial con R^2 de 97% (Figura 1). Para la determinación de la lámina básica se hallaron los valores de a=2,134 y b= -0,6067 obteniendo una lámina básica de 0,24 mm h^{-1}, lo que indica una infiltración muy lenta, <0.25 cm h^{-1}, y por medio del pozo barrenado inverso se determinó una conductividad hidráulica (K) del suelo de K=0,298 m $día^{-1}$ en un rango moderadamente lento. El agua tiende a encharcarse en la superficie y moverse lentamente una vez ingresa al suelo. En el control del nivel freático (NF) se instalaron pozos de observación y piezómetros presentes en cada tratamiento y se obtuvieron los siguientes resultados de la Figura 2. Se analizó que los tratamientos T1 y T2 tienen menor desviación estándar, lo que se refleja en la gráfica de cajas y bigotes que son más cercanas al promedio, demostrando que los drenes están ayudando a estabilizar los niveles freáticos de las recargas por lluvias. Se verificó que está saliendo agua por las tuberías, y con respecto a su vida útil lleva 4 años en funcionamiento, se notó un mayor deterioro en la parte que queda fuera del suelo en la zanja colectora.

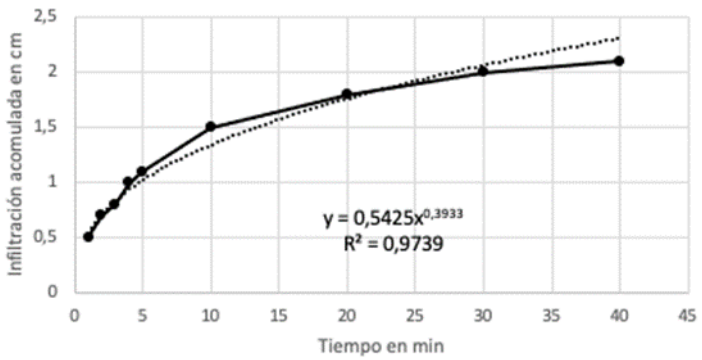


Figura 1. Infiltración en la zona con drenaje.

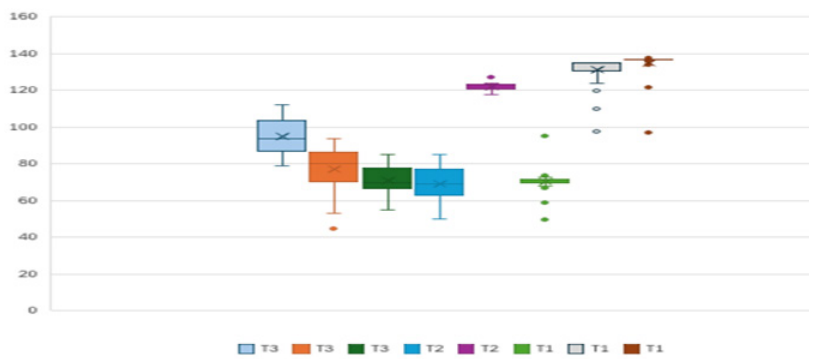


Figura 2. Diagrama de cajas y bigotes de los piezómetros, profundidad NF en cm.

Evaluación económica

Para la elaboración de una tubería de drenaje de 3 metros se incurrirá en los siguientes tiempos y valor por hora de mano de obra (Tabla 1), los valores de 16 drenes con guadua y el valor unitario con base a los resultados obtenidos por Carantón y Molina (2021) son:

Tabla 1. Valor unitario por mano de obra.

Labor	Empleado	Horas	Valor unitario	Total
Inventario	Estudiantes	32	$ 6.189	$ 198.048
Corte	Profesional	1	$ 18.567	$ 18.567
Extracción	Estudiantes	16	$ 6.189	$ 99.024
Perforación interna	Estudiantes	3	$ 6.189	$ 18.567
Perforación externa	Estudiantes	8	$ 6.189	$ 49.512
			Total	$ 383.718
			Unidad	$ 23.982

Para la perforación de un metro se ocuparon 3 minutos aproximadamente en la marcación de los puntos a perforar en la guadua y el tiempo de perforación fue de 4 minutos con 22 segundos y con un promedio de 26,80 segundos por cada tres perforaciones lineales en la periferia. Se puede determinar que para obtener un tubo de drenaje se necesitan aproximadamente 28 minutos de mano de obra directa con movimientos y traslados. La tubería en guadua ya se había evaluado con un cultivo de maíz y cuatro variables fisiológicas que fueron mejores en los dos tratamientos con drenaje comparados al testigo que no tenia; altura de la planta (2,57 y 1,17 m), peso de la hoja (16,94 y 3.37g); peso del tallo (204,8 y 31,67 g) y peso de la mazorca de choclo (189.3 y 23,3 g) (Guzmán et al. 2024).

En Homecenter una Tubería de Drenaje de 4” Drainpipe por 10 m tiene un costo de $149.900 pesos colombianos con un precio por metro de $14.990 pesos colombianos. En la tienda Coval un Tubo Drenaje Kananet de 4”x50 m Gerfor tiene un costo de $1.656.156 pesos colombianos con un precio por metro de $33.123 pesos colombianos, en la tienda Geomatrix SAS un Tubería de drenaje 4 pulgadas HD tiene un costo de $12.600 pesos colombianos por metro.

Evaluación ambiental

Impactos positivos significativos: Se destacan la generación de empleo, el aumento de cultivos, la mejora en la proliferación de microfauna y la evacuación eficiente del exceso de agua en el suelo, lo cual favorece los procesos productivos y ecológicos. Impactos negativos controlables: Entre ellos están la erosión, la pérdida de capa vegetal y la posible contaminación del suelo por agroquímicos.

El PMA se estructuró en cinco programas estratégicos, cada uno conformado por proyectos específicos y medidas concretas que responden a los impactos identificados en las dimensiones ambiental, social, productiva y administrativa.

El Programa 1: Manejo Sostenible del Suelo y el Agua agrupa los proyectos P1 y P2. El proyecto 1.1 Conservación y restauración del suelo y el proyecto 1.2 Gestión del drenaje y control de escorrentía. El Programa 2: Conservación de Ecosistemas de Guadua se desarrolla mediante el proyecto 2.1 Protección y restauración forestal. El Programa 3: Fortalecimiento Productivo y Tecnológico se divide en dos proyectos; el proyecto 3.1 Desarrollo agrícola alternativo, y el proyecto 3.2 Empleo, innovación y propiedad intelectual. El Programa 4: Investigación, Participación y Educación Ambiental está compuesto por los proyectos 4.1 Fomento a la investigación aplicada y 4.2 Evaluación de mercado, este programa también incluye el proyecto 4.3 Seguimiento operativo y control de daños físicos. Finalmente, el Programa 5: Gestión de Riesgos y Sanidad Agrícola contempla los proyectos 5.1 Monitoreo y control sanitario y 5.2 Prevención de contaminación química.

El escenario con proyecto más PMA presenta el mayor índice de calidad ambiental, según Battelle-Columbus (Unidad de impacto ambiental>950/1000), y el mayor número de impactos positivos clasificados como de alta importancia. La comparación global entre escenarios evidencia que el escenario E3 es el más favorable desde el punto de vista ambiental, por reducir al mínimo los impactos negativos, seguido por E2 y finalmente por E1, que representa la condición más restrictiva y con menor rendimiento ambiental.

CONCLUSION

La tubería de drenaje en guadua instalada en la granja de la Universidad Surcolombiana Sede Pitalito puede mejorar las condiciones del suelo tales como la K, humedad gravimétrica, así como el NF, pero aún falta medir parámetros fundamentales como el caudal de descarga, llevar el sistema al límite de saturación y compararlo con otros sistemas de drenaje. Cabe resaltar que por el tipo de suelo FAr y Ar la infiltración es muy lenta y que la tubería ya tenía una evaluación agronómica con cultivo de maíz.

La tubería de drenaje es viable económicamente, solo si, se minimiza el tiempo y personal empleado en los procesos para ser menos costosa su adquisición o elaboración, como se planteó, buscando hacer más simple y económico el proceso. Se necesitan más estudios para encontrar la vida útil real de dicha tubería y establecer diferentes cultivos para encontrar un margen de utilidad por medio del aumento de productividad por el uso del sistema de drenaje.

Viabilidad ambiental comprobada, la implementación del sistema de drenaje en guadua, especialmente bajo el escenario tres con PMA, contribuye a mejorar la productividad, estabilidad ecológica, uso eficiente del suelo y generación de empleo agrícola.

REFERENCIAS

Carantón GL and Molina GJ (2021) Diseño y construcción de drenaje agrícola en la Usco – Pitalito. [Proyecto de grado, Universidad Surcolombiana].

Guzmán A A, Casas MY, Molina GJF, Pardo SKV and Mujica RE (2024) Ponencia: “Evaluación de drenaje agrícola en guadua con cultivo de maíz”. II Congreso Internacional USRA de Ingeniería Agrícola y Carreras Afines (USRA).

Henine H, Jeantet A, Chaumont C, Chelil S, Lauvernet C and Tournebize J (2022) Coupling of a subsurface drainage model with a soil reservoir model to simulate drainage discharge and drain flow start. Agricultural Water Management 262: 107318. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107318

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Análisis experimental de la precisión del método de flotación para la determinación de caudales en canal de laboratorio

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Experimental analysis of the accuracy of the flotation method for determining flow rates in laboratory channels

Jhon Javier Muñoz Garro* and Norberto Urrutia Cobo

Palabras clave:
Canal hidráulico
Experimento de laboratorio
Medición de caudales
Método de flotación
Método volumétrico

RESUMEN

Este estudio presenta una evaluación comparativa de la medición de caudales mediante el método de flotación y el método volumétrico en condiciones de laboratorio controladas. Se utilizaron cinco tipos de flotadores: una esfera de icopor, una esfera de plastilina y botellas plásticas con tres niveles de llenado (vacía, medio llena y completamente llena). Los ensayos se realizaron en un canal basculante bajo tres configuraciones de pendiente. Para cada tipo de flotador se efectuaron diez repeticiones, tomando como referencia el método volumétrico por su alta precisión. Los resultados evidenciaron que los flotadores livianos, como la esfera de icopor y la botella vacía, tendieron a sobreestimar el caudal al desplazarse únicamente en la superficie, mientras que los flotadores pesados, como la botella llena, subestimaron el caudal cuando la profundidad fue insuficiente. La botella medio llena presentó un comportamiento más equilibrado, arrojando valores más cercanos al método volumétrico. El análisis confirma que el método de flotación constituye una alternativa sencilla y económica para la estimación preliminar de caudales, aunque su confiabilidad depende de la selección adecuada del flotador y de condiciones hidráulicas favorables.

Keywords:
Hydraulic channel
Laboratory experiment
Flow measurement
Flotation method
Volumetric method

ABSTRACT

This study presents a comparative evaluation of flow rate measurement using the float method and the volumetric method under controlled laboratory conditions. Five different float types were tested: a polystyrene sphere, a clay sphere, and plastic bottles with three levels of filling (empty, half-full, and completely full). The tests were conducted in a tilting channel under three slope configurations. For each float type, ten repetitions were performed, using the volumetric method as a reference due to its high accuracy. The results showed that light floats, such as the polystyrene sphere and the empty bottle, tended to overestimate the discharge as they moved solely on the surface. In contrast, heavy floats, such as the full bottle, underestimated the discharge under conditions of insufficient water depth. The half-full bottle exhibited a more balanced behavior, yielding values that most closely matched those of the volumetric method. The analysis confirms that the float method is a simple and low-cost alternative for preliminary flow estimation, although its reliability depends on the appropriate selection of the float and favorable hydraulic conditions.

* Corresponding author: jhon.garro@correounivalle.edu.co

CC BY NC SA

La medición precisa del caudal es fundamental para el diseño y gestión de sistemas hídricos. Entre los métodos disponibles, el aforo por flotadores destaca por su simplicidad y bajo costo, siendo especialmente útil en evaluaciones preliminares en campo, como se documenta en textos fundamentales de hidráulica (Chow 1954). Sin embargo, su precisión está sujeta a las características del flotador y a las condiciones hidráulicas del canal. Flotadores muy ligeros o pesados pueden generar sobrestimaciones o subestimaciones del caudal real, respectivamente, como se ha observado en estudios de validación previos (Rodríguez 2011). Estas discrepancias se atribuyen principalmente a la densidad del flotador, la cual determina su calado y posición en la columna de flujo, afectando la velocidad medida.

Partiendo de lo anterior, se planteó la hipótesis de que un flotador con una densidad cercana a la del agua podría generar resultados más cercanos al método volumétrico, tomado como referencia por su alta exactitud en condiciones de laboratorio. En consecuencia, el objetivo general de este estudio fue comparar ambos métodos en condiciones controladas de laboratorio, evaluando cinco tipos de flotadores con distinta densidad con el fin de identificar aquel que ofreciera mayor confiabilidad en la estimación del caudal.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el laboratorio de hidráulica de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Universidad del Valle, Santiago de Cali (Colombia). El equipo principal correspondió a un canal basculante de 5 m de longitud, 76 mm de ancho de solera, paredes laterales en acrílico y altura total de 250 mm. El sistema permitió pendientes entre –0,5 y 3%, operando en circuito cerrado con caudales de 0,83 a 2,08 L s^{-1}.

Se emplearon cinco tipos de flotadores: una esfera de icopor (polystyrene), una esfera plástica, y tres botellas plásticas de 600 mL con diferente nivel de llenado (0%, 50 y 100%). Cada flotador fue evaluado bajo tres configuraciones de pendiente: 0,25, 0,5 y 0,5% con tableta en el extremo inferior para incrementar la profundidad del flujo.

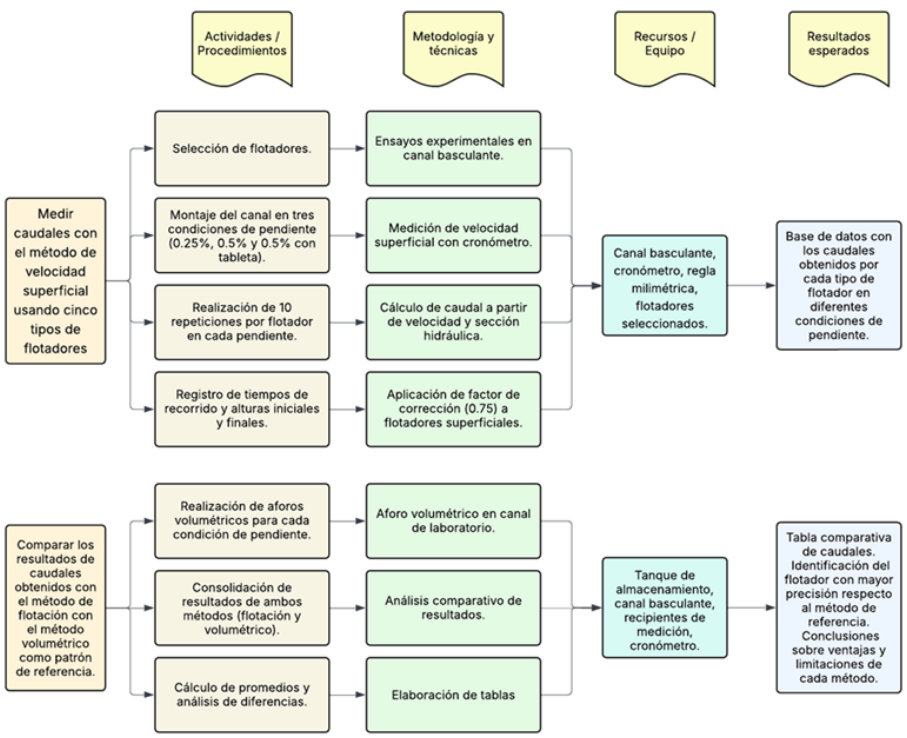


Figura 1. Esquema sobre la Metodología (Elaborado por Jhon Javier Muñoz).

En cada condición experimental se realizaron diez repeticiones de tiempo de desplazamiento del flotador, además de mediciones de nivel inicial y final del agua. Posteriormente, se efectuaron aforos por el método volumétrico, considerado como patrón de referencia. Para los flotadores que permanecieron en superficie (icopor, esfera plástica y botella vacía) se aplicó un factor de corrección de eficiencia de 0,75.

El procesamiento de datos incluyó el cálculo del caudal promedio y la comparación entre ambos métodos. El procedimiento seguido se resume en el esquema metodológico (Figura 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los caudales estimados por flotación para los cinco tipos de flotadores (esfera de icopor, esfera plástica, botella vacía, medio llena y llena) se compararon con el método volumétrico de referencia (Tabla 1). En los casos en que los flotadores permanecieron en superficie esfera de icopor, esfera plástica y botella vacía se aplicó un factor de corrección de eficiencia de 0,75, con el fin deaproximar la velocidad superficial a la velocidad media del flujo.

Los resultados evidencian que los flotadores livianos (icopor, esfera plástica y botella vacía) presentaron mayores desviaciones respecto al método volumétrico,

Tabla 1. Caudales promedios estimados por flotación y método volumétrico en el canal de laboratorio.

So%	Flotador	Q flotación (Lps)	Q volumétrico (Lps)	Variación %
0,25	Esfera de icopor	1,93	2,25	14,27%
	Esfera plástica	1,87	2,26	17,40%
	Botella llena	2,37	2,32	-2,30%
	Botella medio llena	2,59	2,29	-13,19%
	Botella vacía	1,80	2,29	21,51%
0,5	Esfera de icopor	1,91	2,30	16,66%
	Esfera plástica	1,89	2,32	18,53%
	Botella llena	2,08	2,30	9,60%
	Botella medio llena	2,47	2,22	-11,47%
	Botella vacía	1,74	2,29	24,12%
0,5 - Tableta	Esfera de icopor	1,63	2,25	27,43%
	Esfera plástica	1,76	2,28	22,74%
	Botella llena	2,56	2,26	-12,58%
	Botella medio llena	2,53	2,27	-11,70%
	Botella vacía	1,77	2,26	21,62%

a pesar de la corrección aplicada. Estos elementos tendieron a desplazarse únicamente en la superficie, lo que generó subestimaciones del caudal real. En contraste, la botella medio llena mostró valores muy próximos al patrón de referencia (diferencia de –0,03 L s^{-1}), confirmando la hipótesis de que un flotador con densidad intermedia refleja con mayor confiabilidad la velocidad media del flujo. La botella llena, aunque más estable que los flotadores superficiales, presentó dificultades en condiciones de baja profundidad debido al roce con el fondo del canal.

Ecuaciones empleadas

Velocidad superficial del flotador a partir de la distancia recorrida:

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Corrección a velocidad media (flotadores superficiales) con factor k=0,75:

$$V_m = k \times V_s \quad (2)$$

Área hidráulica en canal rectangular:

$$A = b \times y \quad (3)$$

Caudal por flotación:

$$Q_f = V_m \times A \quad (4)$$

Caudal volumétrico (referencia):

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (5)$$

Comparacion de métodos (Variacion porcentual)

$$\text{Variaciones}(\%) = \frac{(Q_v - Q_f)}{Q_v} \times 100 \quad (6)$$

Donde: L (m) longitud del tramo; t (s) tiempo; k (0,75) factor de corrección; b (m) ancho de solera; y (m) profundidad; A (m^2) área; V (m^3) volumen.

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los experimentos de laboratorio, la aplicación del método de velocidad superficial con cinco tipos de flotadores evidenció que los elementos livianos (esfera de icopor, esfera plástica y botella vacía) sobrestimaron el caudal aun con la corrección de eficiencia, mientras que la botella llena presentó limitaciones en condiciones de poca profundidad. Por el contrario, la botella medio llena mostró el mejor desempeño, con una desviación promedio de apenas -11,91%, destacando que la densidad del flotador es el factor crítico para una selección, adecuada.

Al comparar con el método volumétrico, la botella medio llena fue la que presentó valores más cercanos al patrón de referencia, lo que confirma la hipótesis planteada de que un flotador de densidad intermedia ofrece mayor precisión. En consecuencia, el método de flotación puede considerarse una herramienta sencilla y económica para estimaciones preliminares de caudal, siempre que se seleccione un flotador con la densidad apropiada. Sin embargo, dada su inherente dependencia de las condiciones hidráulicas, no sustituye al método volumétrico cuando se requiere alta precisión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Valle, a la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), al Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas (LASA) y al Semillero Regar por el apoyo institucional, académico y la infraestructura suministrada para la realización de la investigación. Así mismo, se reconoce la orientación del profesor Ing. Norberto Urrutia Cobo durante la ejecución del trabajo.

Se declara que no existió ningún tipo de conflicto de intereses en el desarrollo de este estudio.

REFERENCIAS

Chow VT (1994) Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill, México D.F. 636 p.

Rodríguez GIC (2011) Guía de hidrometría: Estimación del caudal por el método de flotadores. Dirección Regional de Lima, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Lima. 48 p.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Monitoreo de deforestación y salud vegetal en cultivos de café mediante teledetección

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Monitoring deforestation and plant health in coffee crops using remote sensing

Laura Vanesa Cano-Rodríguez[1]*, Valentina Cruz-Ospina[1], Juan R. Sanz-Uribe[1] and Eduardo Duque-Dussán[1]

Palabras clave:
Caficultura sostenible
Imágenes RGB
NDVI
Sentinel-2
Zoca

RESUMEN

Este estudio analizó la dinámica de la cobertura vegetal en sistemas de producción de café en la estación experimental Naranjal (Chinchiná, Colombia), combinando imágenes de drones (RGB) y satelitales (Sentinel-2) para diferenciar entre prácticas agrícolas de renovación (zoca) y procesos de deforestación. Se evaluaron cuatro lotes de *Coffea arabica L.* en etapas vegetativa/productiva (5 meses a 5 años) mediante el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI), el cual mostró aumentos en todos los casos (ΔNDVI +0.029 a +0.216). Los ortomosaicos georreferenciados e imágenes RGB capturadas con dron mostraron un predominio del canal verde (G: 78,2–85,7) y valores bajos en el azul (B: 38,2–43,2), confirmando una cobertura vegetal densa. Los resultados indican un incremento en la cobertura vegetal en los lotes estudiados, lo cual aporta evidencia técnica para demostrar que la renovación de cafetales bajo las prácticas evaluadas no conlleva una pérdida neta de cobertura y diferencia el manejo agronómico legítimo de la deforestación un aspecto relevante frente a regulaciones como el reglamento de deforestación de la Unión Europea (EUDR) que buscan garantizar la sostenibilidad de las cadenas de suministro.

Keywords:
Sustainable coffee
RGB images
NDVI
Sentinel-2
Stumping

ABSTRACT

This study analyzed the dynamics of plant cover in coffee production systems at the Naranjal experimental station (Chinchiná), by combining drone (RGB) and satellite (Sentinel-2) images to differentiate between agricultural renewal practices (stumping) and deforestation processes. Four *Coffea arabica L.* plots in vegetative/productive stages (5 months to 5 years) were evaluated using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which showed increases in all cases (ΔNDVI +0.029 to +0.216). Georeferenced orthomosaics and RGB images captured by drone showed a predominance of the green channel (G: 78.2–85.7) and low blue values (B: 38.2–43.2), confirming dense plant coverage. The results indicate an increase in plant cover in the studied plots, providing technical evidence to demonstrate that coffee renewal under the evaluated practices does not lead to a net loss of cover, a relevant aspect in the context of regulations such as the European Union Deforestation Regulation (EUDR), which aim to ensure the sustainability of supply chains.

[1] Disciplina de Poscosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Manizales, Colombia.
*Corresponding author: laura.cano@cafedecolombia.com

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

América Latina produce aproximadamente el 60% del café mundial y el 80% de *Coffea arabica* L. (Ekqvist 2015). Colombia es uno de los tres principales productores, consumidores y exportadores globales (Caravaggio and Vaquero-Piñeiro 2024), destina más de 850 mil hectáreas a este cultivo, principalmente en manos de pequeños agricultores con 1,3-1,6 ha de área promedio cultivadas (FNC 2024). El café es un pilar económico, social y ambiental para la región, sustentando medios de vida y configurando paisajes rurales (Somarriba et al. 2021). Las exportaciones colombianas en 2023/24 alcanzaron 11,9 millones de sacos de 60 kg 15,2% mas que en el año 2022/23, con mercados clave en Norteamérica (47.8%), Europa (27,1%) y Asia (20,8%) (FNC 2024). Sin embargo, regulaciones como el reglamento de deforestación de la Union Europea (EUDR) exigen certificar que el café no provenga de tierras deforestadas después de 2020 (Soto and Parada 2025), El cumplimiento de esta norma requiere de sistemas de trazabilidad y verificación de la condición de la cobertura del suelo, lo que representa un desafío para la cadena productiva. En Colombia donde tradicionalmente el café es cultivado bajo sombra (Arcila P et al. 2007), prácticas como la zoca (renovación de cafetales) son frecuentemente confundidas con deforestación. Esta ambigüedad amenaza certificaciones y el acceso a mercados internacionales. Este estudio evaluó si la zoca puede ser diferenciada de la deforestación real, mediante el análisis integrado de imágenes Sentinel-2 (Copernicus) y drones. El propósito es generar evidencia que sustente la sostenibilidad de este manejo agronómico en términos de cobertura vegetal.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental Naranjal (Cenicafé), ubicada en el municipio de Chinchiná, Caldas (Colombia), en las coordenadas 04°59' N, 75°39' O, a una altitud de 1.400 msnm y temperatura media anual de 20,8 °C. (Gómez-Soto 2023).

Material vegetal

Se evaluaron lotes de *Coffea arabica* L. con diferentes edades y etapas fenológicas:

Tabla 1. Descripción de lotes evaluados.

Lote	Edad	Etapa fenológica	Área
La Merced	5 meses	etapa vegetativa	2.325 m²
Germinación	7 meses	etapa vegetativa	3.319 m²
Desarrollo	3 años	etapa productiva	4.394 m²
Maduro	5 años	etapa productiva	4.043 m²

Adquisición de imágenes

Drones: se capturaron imágenes RGB con un dron DJI Mavic mini (formato PNG), volando a 20 m de altura con un ángulo nadiral (90°), velocidad de 1,5 m s^{-1}, y solapes del 80% (frontal) y 70% (lateral). Las fotografías se tomaron cada 3 segundos para garantizar una cobertura completa.

Procesamiento: las imágenes RGB se procesaron mediante el software WebODM Lightning para generar ortomosaicos georreferenciados. El flujo de trabajo incluyó:

Fotografías de cada lote con metadatos GPS, Procesamiento automático con configuración estándar y ortomosaicos resultantes que se analizaron en ImageJ, donde se obtuvieron los valores promedio de rojo, verde y azul (escala 0-255).

Análisis comparativo con imágenes satelitales: se utilizaron imágenes multiespectrales de la misión Sentinel-2 (plataforma Copernicus) para los años 2020 (línea base) y 2024 (estado mas actual de las imágenes). El Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) se calculó para cada lote y año utilizando la ecuación 1, donde B8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR) y B4 a la banda roja.

$$NDVI: \frac{(B8 - B4)}{B8 + B4)} \quad (1)$$

El NDVI varía entre -1 y 1, donde valores altos (próximos a 1) indican vegetación densa y saludable, valores bajos

positivos representan vegetación escasa o estresada, y valores negativos se asocian a cuerpos de agua o suelo desnudo. Cabe mencionar que el NDVI puede presentar efectos de saturación en áreas de vegetación muy densa, lo que podría subestimar la verdadera vitalidad de la vegetación en los puntos de más alta cobertura.

Análisis de datos. El análisis se centró en la comparación descriptiva de los valores de NDVI entre 2020 y 2024 para evaluar la tendencia en la cobertura vegetal, y en el análisis de las firmas espectrales RGB derivadas de los ortomosaicos. Dada la naturaleza del diseño observacional y el número limitado de lotes, no se realizaron pruebas estadísticas de significancia; los cambios reportados son de carácter descriptivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación Temporal de NDVI (2020 vs. 2024)

Tabla 2. Valores de NDVI por lote (2020 vs 2024) y su diferencia.

Lote	NDVI 2020	NDVI 2024	ΔNDVI
La Merced	0,613	0,642	+0,029
Germinación	0,419	0,635	+0,216
Desarrollo	0,614	0,666	+0,052
Maduro	0,547	0,647	+0,1

Como se ve en la tabla 2 todos los lotes muestran un aumento en NDVI entre 2020 y 2024, lo que indica mejoras notables en la salud vegetal y/o manejo agrícola.

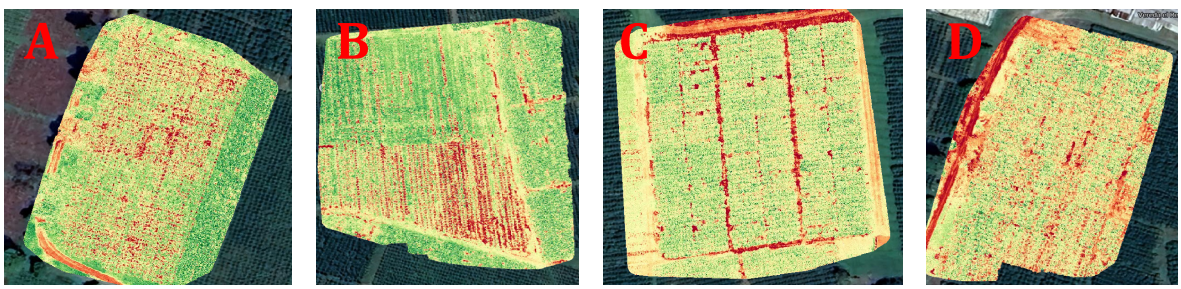


Figura 1. Salud vegetal de lotes evaluados.

La Figura 1 presenta los mapas de salud vegetal de los cuatro lotes: la Merced (A), Germinación (B), Desarrollo (C) y Maduro (D) donde la escala de color (verde: alta actividad fotosintética; amarillo: estrés leve; rojo: suelo desnudo) permite visualizar el vigor de la cobertura.



Figura 2. ortomosaicos georreferenciados de lotes evaluados

Tabla 3. Valores RGB por lote derivados de ortomosaico.

Lote	Red	Green	Blue	(R+G+B)/3	Luminosidad
La Merced	64,27	78,19	43,15	61,90	70,06
Germinación	65,15	85,72	38,17	63,06	74,14
Desarrollo	63,80	80,00	41,99	61,93	70,81
Maduro	65,13	80,83	43,22	63,07	71,83

Los valores RGB de la Tabla 3 de 2025 revelaron alta reflectancia en verde y baja en azul, indicando cobertura vegetal densa y mínima exposición de suelo. El lote 'Germinación' destacó con el mayor valor de verde (G: 85.7) y NDVI elevado (0,635).Los lotes con mayor NDVI tienen valores altos de verde y bajos de azul, confirmando cobertura vegetal densa.

CONCLUSIÓN

Los resultados demuestran que los sistemas de producción de café en la Estación Experimental Naranjal mantienen e incrementan la cobertura vegetal (NDVI promedio 2024: 0.64).

El estudio proporciona evidencia técnica para sustentar que los métodos de renovación en Naranjal cumplen con la regulacion de cobertura vegetal de la EUDR, al comprobar el aumento progresivo de NDVI en todos los lotes y bajos valores de azul en RGB (B <45), indicando mínima exposición de suelo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por las acciones de investigación e innovación Horizon EUSPA-2022-SPACE de la Unión Europea, en virtud del acuerdo de subvención no.101131859 (COMUNIDAD).

REFERENCIAS

Arcila PJ, Farfán VF, Moreno BA, Salazar GLF and Hincapié GE (2007) Sistemas de producción de café en colombia

Caravaggio N and Vaquero-Piñeiro C (2024) Are Geographical Indications Contributing to Environmental Conservation? The Case of Coffee Industry and Deforestation in Colombia SSRN https://doiorg/102139/ssrn4685756

Ekqvist I (2015, mayo 29) The influence of agroforestry on soil fertility in coffee cultivations

FNC FN de C de C (2024) Informe gerente general https://publicacionescenicafeorg/indexphp/infgerente/article/view/2954/2937

Gómez-Soto J (2023) Análisis económico de la retención de pases y empleo de lonas en la recolección de café Revista Cenicafé 74(1): e74101 https://doiorg/1038141/10778/74101

Somarriba E, Lopez-Sampson A and Rica C (2021) Coffee and Cocoa Agroforestry Systems: Pathways to Deforestation, Reforestation, and Tree Cover Change.

Soto XO and Parada LP (2025) Buenas prácticas públicas y privadas para la adecuación a la normativa europea en América Latina—Casos de aceite de palma, cacao y café.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Biorremediación de suelos contaminados con zinc usando *Zea mays* L., *Eisenia fetida* y *Pseudomonas putida*

Bioremediation of zinc contaminated soils using *Zea mays* L., *Eisenia fetida* and *Pseudomonas putida*

María Camila Álvarez Durango[1] and Leidy Tatiana Gañan Marín[2]

Palabras clave:
Microorganismos
PTE
Remediación
Suelos contaminados

RESUMEN

La contaminación por zinc representa un problema ambiental crítico debido a su origen en actividades industriales, mineras y agrícolas, con efectos adversos en la salud humana y el desarrollo vegetal. La biorremediación surge como una alternativa sostenible basada en la acción de organismos vivos capaces de remover contaminantes del suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de la biorremediación de suelos contaminados con zinc mediante la interacción de *Zea Mays* L. y *Eisenia fetida* en simbiosis con *Pseudomonas putida*. Se emplearon 80 kg de suelo con concentraciones de 250, 500 y 1000 mg kg^{-1} de zinc, distribuidos en 12 unidades experimentales por nivel. En cada unidad se sembraron tres semillas de *Zea mays* L., se adicionaron 15 ejemplares de *Eisenia fetida* previamente expuestos a 50 mg kg^{-1} de Zn y 8 mL de *Pseudomonas putida*, durante un periodo de 57 días, con riego y suplementación mediante solución Hoagland. Los tratamientos con *Eisenia fetida* y la doble inoculación con *Eisenia fetida* y *Pseudomonas putida* alcanzaron los mayores porcentajes de remoción, logrando hasta un 99,10% de reducción del zinc en el suelo. Se concluye que la interacción entre los organismos favoreció el crecimiento de *Zea mays* L. y mejoró significativamente la capacidad de biorremediación.

Keywords:
Microorganisms PTE
Remediation
Contaminated soils

ABSTRACT

Zinc contamination represents a critical environmental problem derived from industrial, mining, and agricultural activities, with adverse effects on human health and plant development. Bioremediation emerges as a sustainable alternative based on the action of living organisms capable of removing soil contaminants. The objective of this study was to evaluate the efficiency of zinc-contaminated soil bioremediation through the interaction of *Zea Mays* L. and *Eisenia fetida* in symbiosis with *Pseudomonas putida*. A total of 80 kg of soil with zinc concentrations of 250, 500, and 1000 mg kg^{-1} were used, distributed in 12 experimental units per level. Each unit contained three *Zea Mays* L. seeds, 15 specimens of *Eisenia fetida* previously exposed to 50 mg kg^{-1} of Zn, and 8 mL of *Pseudomonas putida*, maintained for 57 days with irrigation and supplementation using Hoagland solution. Treatments with *Eisenia fetida* and the dual inoculation with *Eisenia fetida* and *Pseudomonas putida* achieved the highest removal percentages, reaching up to 99.10% reduction of zinc in soil. It is concluded that the interaction among these organisms favored the growth of *Zea Mays* L. and significantly improved the bioremediation capacity of contaminated soils.

[1]Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. ORCID: 0009-0000-8365-3135
[2]Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. ORCID: 0009-0004-0244-7225
*Corresponding author: malvarezd@est.colmayor.edu.co

CC BY NC SA

Los Elementos Potencialmente Tóxicos (PTE, *Potentially Toxic Elements*) fueron definidos como elementos químicos que, en bajas concentraciones, desempeñaron funciones esenciales en los organismos vivos, pero que en niveles elevados resultaron tóxicos y generaron riesgos para la salud humana y los ecosistemas. Wei et al. (2021) señalaron que, entre estos elementos, el zinc (Zn) se consideró un micronutriente indispensable para el crecimiento de las plantas, por su participación en procesos como la activación enzimática, la síntesis de proteínas y la fotosíntesis. Sin embargo, Broadley et al. (2007) reportaron que, cuando el Zn superó concentraciones de 200 mg kg^{-1}, pasó de ser un nutriente esencial a convertirse en un contaminante tóxico, afectando la calidad del suelo y limitando la disponibilidad de nutrientes. A su vez, Wang et al. (2022) explicaron que su acumulación excesiva desencadenó alteraciones en el desarrollo y la reproducción de organismos y plantas, manifestadas en síntomas como clorosis, reducción del crecimiento y degradación de cloroplastos, además de interferir en la absorción de otros elementos esenciales. Resultados similares fueron descritos por Bhojiya et al. (2022).

Huang et al (2018) y Wang et al.(2022) indicaron que la presencia de Zn en el suelo se debió tanto a fuentes naturales —como la meteorización o la escorrentía— como a fuentes antropogénicas, principalmente minería, uso de fertilizantes, pesticidas y actividades industriales. Giovanella et al. (2020) advirtieron que, debido a su persistencia y movilidad, el Zn representó un desafío para los métodos tradicionales de remediación física y química, los cuales resultaron costosos, poco sostenibles y generaron residuos secundarios. Frente a esta problemática, Palanivel et al. (2023) concluyeron que la biorremediación se presentó como una alternativa prometedora por su bajo costo, eficiencia y menor impacto ambiental.

En esta línea, distintos autores resaltaron que los sistemas integrados de biorremediación (IBS) despertaron especial interés, ya que combinaron la acción de plantas, microorganismos y macroinvertebrados del suelo para incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes. Chiwetalu et al. (2020) y Wei et al. (2021) documentaron que el maíz (*Zea mays L.*) tuvo capacidad de acumular PTE en sus raíces y tejidos aéreos. Shavalikohshori et al. (2020) y Khanna et al. (2022) describieron que *Pseudomonas putida* fue una bacteria promotora del crecimiento vegetal que toleró PTE y contribuyó tanto a la fitorremediación como a la movilización de nutrientes y supresión de fitopatógenos. Por su parte, Cheng et al. (2021) y Buivydaitė et al. (2023) mencionaron que la lombriz roja californiana *Eisenia fetida* fue reconocida como bioindicador de suelos contaminados y como agente que mejoró las propiedades fisicoquímicas del suelo, promovió la disponibilidad de nutrientes y redujo la fracción biodisponible de metales.

Con base en lo anterior, surgió la pregunta de investigación: ¿cuál fue el efecto del uso combinado de *Eisenia fetida*, *Pseudomonas putida* y *Zea mays* L. sobre la biorremediación de un suelo contaminado con Zn? En este marco, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de estos organismos, en aislamiento y en interacción simbiótica, sobre la capacidad de remoción de Zn en suelos contaminados, con el fin de aportar evidencia sobre el potencial de los sistemas integrados de biorremediación como estrategia sostenible frente a la contaminación por PTE.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en condiciones controladas de invernadero en el municipio de Copacabana, Antioquia (1.454 msnm, 16,7 °C). Se utilizó suelo proveniente de Rionegro (80 kg), caracterizado fisicoquímicamente y contaminado con $ZnSO_4$ en concentraciones de 250, 500 y 1.000 mg kg^{-1}, del cual se emplearon 2 kg por unidad experimental. Las semillas de maíz (*Zea mays* L.) fueron germinadas durante siete días y posteriormente sembradas a 2–3 cm de profundidad, dejando una planta por unidad a los 15 días. El riego se realizó de forma manual cuando se evidenció la disminución de humedad en el sustrato, determinada por la observación de la superficie seca del suelo. El agua se aplicó en platos ubicados bajo cada maceta, permitiendo la absorción por capilaridad desde la zona radicular hacia la parte aérea. En promedio, se suministraron entre 200 y 300 mL de agua por unidad experimental, con una frecuencia de cada 2 a 3 días. Adicionalmente, se aplicaron 20 mL de solución Hoagland cada ocho días. Se incorporaron 15 lombrices *Eisenia fetida* por unidad experimental, previamente adaptadas al contaminante, y una cepa comercial de *Pseudomonas putida* inoculada a 1×10^7 UFC mL^{-1} (8 mL por unidad). El

diseño experimental fue tipo árbol con tres concentraciones de Zn y tres tratamientos (*Eisenia fetida , Pseudomonas putida* y *Eisenia fetida +Pseudomonas putida*), todos con *Zea mays* L., por triplicado, para un total de 36 unidades experimentales incluidos los controles. Se evaluaron variables biométricas en las plantas (altura, diámetro, número de hojas, biomasa aérea y radicular), densidad microbiana de *Pseudomonas putida* en medio YMA, concentración de Zn en suelo mediante Olsen-EDTA y en plantas por Espectroscopía de Absorción Atómica, además de peso y morfología de *Eisenia fetida*. Los datos se analizaron en Statgraphics (Centurion XVII) mediante ANOVA y prueba de Tukey (95%), y la eficiencia de remoción de Zn se calculó a partir de la reducción de su concentración en el suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización inicial del suelo mostró un pH ácido (5,3) y baja conductividad eléctrica (0,34 dS m^{-1}), condiciones que favorecieron la movilidad de elementos potencialmente tóxicos como el zinc (Zn) y explicaron su alta disponibilidad para las plantas. En cuanto al crecimiento de *Zea mays* L., los tratamientos con *Eisenia fetida* (Ef), *Pseudomonas putida* (Pp) y la combinación de ambos (Ef+Pp) promovieron mayor biomasa aérea y radicular en comparación con los controles. Los tratamientos con Ef y Ef+Pp furon los más efectivos, con promedios de 27-27,5 g de biomasa aérea, independientemente del nivel de zinc en el suelo. Respecto al contenido de zinc en la biomasa foliar, en el tratamiento con Pp se presentó una diferencia estadísticamente significativa únicamente en las concentraciones más altas, comportamiento similar al observado en la doble inoculación (Ef+Pp). En estos casos, la concentración foliar pasó de 14,82 a 28,29 mg Zn kg^{-1} al aumentar el nivel de contamiancion del suelo de 250 a 1.000 mg Zn kg^{-1}, respectivamente. Aunque estos valores fueron menores a los registrados en los controles no inoculados, se encontraron dentro del rango de acumulación en tejidos vegetales y reflejaron la capacidad de *Zea mays* L. de participar en procesos de fitoextracción. En el suelo, se observó una disminución significativa de la concentración final de Zn en los tratamientos inoculados frente a los controles, con remociones entre 97,49 y 99,10%. Los valores más altos de eficiencia se alcanzaron en las concentraciones de 1.000 mg kg^{-1} de Zn bajo los tratamientos con Ef y Ef+Pp, con un 99,10% de remoción. Estos resultados confirman la capacidad de *Zea mays* L. para acumular elementos potencialmente tóxicos y destacan el efecto positivo de *Eisenia fetida* y *Pseudomonas putida* en la biorremediación, logrando eficiencias superiores a las reportadas en estudios previos con otros metales (79–81% de remoción de Cd con *Eisenia fetida*), lo que evidencia la adaptabilidad de este sistema biológico a suelos contaminados con Zn.

No obstante, la detección de valores de hasta 28,29 mg Zn kg^{-1} en la biomasa foliar plantea un riesgo para su destino productivo. En Colombia, el Decreto 3249 de 2006 establece una ingesta diaria recomendada de 15 mg Zn $día^{-1}$ para niños mayores de 4 años y adultos, y un límite máximo tolerable de 40 mg Zn $día^{-1}$ para adultos. Sin embargo, la normativa nacional no define concentraciones máximas de Zn en alimentos vegetales ni en piensos para animales (INVIMA/ICA), lo que impide garantizar la inocuidad del material vegetal cosechado. Si bien las concentraciones detectadas no superan el límite máximo tolerable de ingesta diaria para adultos en Colombia, exceden los valores de referencia internacionales considerados seguros en tejidos vegetales (20–25 mg Zn kg^{-1}; Kabata-Pendias 2011). Además, la ausencia de regulaciones específicas a nivel nacional genera incertidumbre sobre los riesgos de bioacumulación en humanos y animales. En este contexto, se recomienda no destinar la biomasa de *Zea mays* L. cultivada en suelos contaminados a consumo humano ni animal. Asimismo, debe evitarse su reincorporación directa al ecosistema, ya que podría favorecer la redistribución del Zn y su bioacumulación en otros niveles tróficos. En su lugar, se deben priorizar alternativas de manejo seguro como compostaje controlado, digestión anaerobia para generación de bioenergía o disposición como residuo agrícola en sistemas regulados, minimizando riesgos para la salud y el ambiente.

CONCLUSIÓN

El presente estudio demuestra que la biorremediación de suelos contaminados con zinc mediante el uso de *Zea mays* L. en asociación con *Eisenia fetida* y *Pseudomonas putida* es una alternativa eficiente y sostenible, con remociones superiores al 97%. Los resultados evidencian que la participación de *Eisenia fetida* constituye el factor determinante en la reducción del Zinc y en la mejora de las condiciones del suelo, mientras que *Pseudomonas putida* no mostró un efecto

diferencial significativo. Este trabajo aporta evidencia experimental sobre la aplicabilidad de sistemas biológicos en la recuperación de suelos contaminados con Los elementos potencialmente tóxicos, lo cual representa un avance en estrategias de fitorremediación asistida y sienta bases para futuras investigaciones orientadas a optimizar la sinergia entre organismos y explorar su uso en escenarios de contaminación multimetálica.

AGRADECIMIENTOS

A la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia por el suministro de recursos en la etapa inicial del proyecto, y a los docentes asesores por su invaluable acompañamiento.

REFERENCIAS

Bhojiya AA, Joshi H, Upadhyay SK, Srivastava AK, Pathak VV, Pandey VC and Jain D (2022) Screening and optimization of zinc removal potential in *Pseudomonas aeruginosa*-HMR1 and its plant growth-promoting attributes. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 108(3): 468–477.

Broadley, M, White, P, Hammond, J, Zelko, I, and Lux, A (2007) Zinc in plants In New Phytologist (Vol 173, Issue 4, pp 677–702)

Buivydaitė Ž, Lilja M, Sapkota R, Hansen B, Ellegaard-Jensen L, Hendriksen N, Krogh P and Winding A (2023) Earthworms shape prokaryotic communities and affect extracellular enzyme activities in agricultural soil. European Journal of Soil Biology 115(103474).

Cheng Q, Lu C, Shen H, Yang Y and Chen H (2021a) The dual beneficial effects of vermiremediation: Reducing soil bioavailability of cadmium (Cd) and improving soil fertility by earthworm (*Eisenia fetida*) modified by seasonality Science of the Total Environment 755(142631).

Chiwetalu U, Mbajiorgu C and Ogbuagu N (2020) Remedial ability of maize (*Zea-mays*) on lead contamination under potted condition and non-potted field soil condition. Journal of Bioresources and Bioproducts 5(1): 51–59.

Giovanella P, Vieira GAL, Ramos Otero IV, Pais Pellizzer E, de Jesus Fontes B and Sette, L D (2020) Metal and organic pollutants bioremediation by extremophile microorganisms. Journal of Hazardous Materials 382: 121024.

Huang Y, Chen Q, Deng M, Japenga J, Li T, Yang X and He Z (2018) Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China. Journal of Environmental Management 207: 159–168.

Janna K, Kohli S, Kaur R, Handa N, Bakshi P, Sharma P, Ohri P and Bhardwaj R (2022) Reconnoitering the efficacy of plant growth promoting rhizobacteria in expediting phytoremediation potential of heavy metals. In Journal of Plant Growth Regulation Springer.

Palanivel T, Pracejus B and Novo L (2023) Bioremediation of copper using indigenous fungi *Aspergillus* species isolated from an abandoned copper mine soil. Chemosphere 314(137688).

Shavalikohshori O, Zalaghi R, Sorkheh K and Enaytizamir N (2020) The expression of proline production/degradation genes under salinity and cadmium stresses in *Triticum aestivum* inoculated with *Pseudomonas* sp. International Journal of Environmental Science and Technology 17(4): 2233–2242.

Wang D, Zheng L, Ren M, Li C, Dong X, Wei X, Zhou W and Cui J (2022a) Zinc in soil reflecting the intensive coal mining activities: Evidence from stable zinc isotopes analysis Ecotoxicology and Environmental Safety 239(113669).

Wei Z, Gu H, Van Le Q, Peng W, Lam SS, Yang Y, Li C and Sonne C (2021a) Perspectives on phytoremediation of zinc pollution in air, water and soil. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 24(100550).

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Implementación de una metodología de análisis de riesgo por sequía en caña panelera

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Implementation of the drought risk analysis methodology for panela sugarcane

García-Rodríguez, Nicolás[1]; Fernández-Palacios, Liliana Camila[1] and Valenzuela-Mahecha, Miguel Ángel[2]

Palabras clave:
Amenaza
Mapa
Recursos hídricos
Riego
Vulnerabilidad

RESUMEN

El cambio climático es una realidad, la cual ha implicado la presencia de fenómenos climáticos extremos cada vez más frecuentes y de mayor intensidad. En este estudio se analizó la incidencia del riesgo de sequía sobre el cultivo de caña panelera, uno de los cultivos promisorios en Colombia. La amenaza se calculó utilizando el índice SPEI, que mide la incidencia de la sequía. Los resultados mostraron que en la zona de estudio hay una probabilidad de ocurrencia de sequías durante todo el año. El análisis de vulnerabilidad indicó una alta susceptibilidad de este cultivo a la falta de agua. El mapa de riesgo elaborado muestra una categoría intermedia en la mayoría del área de la zona de estudio, un riesgo bajo en los extremos norte y sur, y alto en la zona suroriental. Se concluye que el cultivo podría obtener mejores rendimientos en la zona norte, ya que es la menos afectada en el periodo más crítico del año. Este análisis permite planificar mejor la producción en zonas de riesgo alto, y buscar alternativas como la implementación de sistemas de riego.

Keywords:
Threaten
Map
Water resources
Irrigation
Vulnerability

ABSTRACT

Climate change is a reality, which has implied the presence of more frequent and more intense extreme climatic phenomena. This study analyzed the incidence of drought risk on the panela sugarcane ('Panela' stands for raw sugarcane), one of the most promising crops in Colombia. The threat was calculated using the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI), which measures the incidence of drought. The results showed that in the study area there is a probability of drought occurrence throughout the year. A vulnerability analysis was then conducted, which indicated a high susceptibility of this crop to water shortage. The risk map prepared shows an intermediate category in most of the territory of the study area, a low risk in the extreme north and south, and an elevated risk in the southeastern area. It is concluded that the crop could obtain better yields in the northern zone, since it is the least affected in the most critical period of the year. It is also recommended that an irrigation system be implemented for the sugarcane crops located in the other zones of the municipality.

[1]Maestría en Ingeniería – Ingeniería de Biosistemas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. nicgarciarod@unal.edu.co, lfernandezp@unal.edu.co
[2]Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá Colombia. mavalenzuelam@unal.edu.co

CC BY NC SA

El riesgo agroclimático se define como la probabilidad de que fenómenos naturales poco frecuentes afecten la producción agrícola y se compone de amenazas y la vulnerabilidad (CIFFEN 2022). Las amenazas son eventos o condiciones climáticas extremas, evaluadas mediante modelos que integran datos históricos de clima, características del suelo y requerimientos del cultivo; y la vulnerabilidad, relacionada con las características que hacen susceptible a un sistema frente a la amenaza, la cual se ve influida por la exposición geográfica, la sensibilidad interna del cultivo o comunidad y la capacidad adaptativa para enfrentar cambios (Basualdo 2016; CIFFEN 2022).

Dado que, en los últimos años, fenómenos como las sequías han aumentado su frecuencia, surge la necesidad de cuantificar esta amenaza, para lo que se emplean índices como el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PSDI en inglés) (Bolaños et al. 2017; Martínez et al. 2016), Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) (Vicente-Serrano et al. 2010) o el Índice de Riesgo Agroclimático (RAC) (Casagrande et al. 2014), que combinan datos de precipitación, evapotranspiración, disponibilidad de agua, entre otros parámetros. Estos fenómenos afectan en mayor medida la producción de alimentos, especialmente en zonas rurales con limitada capacidad de respuesta (FAO 2016; Vega et al. 2017). Por tal motivo, los estudios suelen seleccionar un cultivo y una región, evaluar la disponibilidad de agua históricamente en la zona y superponerla con los requerimientos hídricos del cultivo para estimar el riesgo al que este está expuesto.

Considerando el reciente episodio del Fenómeno del Niño en Colombia, donde se presentaron aumentos de temperatura y reducción de lluvias, se vieron afectados múltiples departamentos del país, incluido el Cesar. El caso de estudio se centra en Aguachica, Cesar y en la caña panelera, tercer cultivo en área sembrada del país (DANE 2017), de gran importancia económica y social, pues da sustento a más de 350.000 familias y 278.000 empleos directos (Fedepanela 2023). La caña panelera es un cultivo perteneciente a la familia de las gramíneas, con ciclo de 14–17 meses, (Amaya 2023), requiere entre 1200 y 1750 mm de agua al año (FAO 2013) y temperaturas óptimas entre 10 y 38 °C. En el Caribe colombiano ocupa menos del 4% del área nacional, lo que plantea retos y oportunidades para su expansión bajo condiciones de sequía (Grajales et al. 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo del estudio fue generar un mapa de riesgo de sequía para caña panelera a escala municipal, considerando tres etapas principales: El cálculo de la amenaza, la parametrización de la vulnerabilidad y el análisis de riego utilizando Aqua Crop. Para el cálculo de la amenaza, se utilizó el Índice SPEI para identificar la presencia de sequías en periodos específicos, empleando datos de precipitación y evapotranspiración. La evapotranspiración se estimó con el software ETo Calculator a partir de humedad relativa y temperaturas, obtenidas de datos de estaciones meteorológicas con al menos treinta años de registros, disponibles en el geo visor del IDEAM, DHIME (IDEAM 2023a). El análisis estadístico de regresión que permitió la parametrización del índice se realizó a través de RStudio, utilizando la librería SPEI, para posteriormente integrarlo de forma mensual y de superpuesta en mapas del municipio por medio del software QGIS, generando un mapeo de la amenaza en el cultivo. La clasificación de amenaza se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parametrización de la amenaza.

Severidad de la sequía	SPEI
Extremadamente húmedo	≥ 2,00
Severamente húmedo	1,50 – 1,99
Moderadamente húmedo	1,00 – 1,49
Normal	-0,99 – 0,99
Sequía moderada	-1,00 – -1,49
Sequía severa	-1,50 – -1,99
Sequía extrema	≤ -2,00

Fuente: Ming et al. 2015.

Con respecto a la vulnerabilidad, partiendo de la metodología de Basualdo (2016), adaptada a la caña panelera, se consideraron tres componentes: sensibilidad, exposición y capacidad adaptativa. Para cada uno de estos componentes se definieron variables asociadas y se clasificó cada una de ellas en cuatro niveles (0–3), siendo 0 el nivel más bajo de vulnerabilidad (favorable) y 3 el nivel más alto (muy desfavorable).

Finalmente, se combinó la amenaza y la vulnerabilidad mediante la Ecuación 1 para obtener el riesgo final en una escala de 0-1, con siete niveles, parametrizados en

mapas mensuales realizados con QGIS, considerando las curvas de nivel y condiciones del suelo. Como último paso, se modeló el impacto de la sequía sobre el rendimiento de caña panelera usando AquaCrop, simulando escenarios con y sin riego.

$$\text{Riesgo agroclimático} = \text{Amenaza agroclimática} \times \frac{\text{Sensibilidad}}{\text{Capacidad adaptativa}} \times \text{Exposición} \quad (1)$$

Caso de estudio

El estudio se enfocó en el municipio de Aguachica (Cesar), ubicado en la región del Caribe Seco de Colombia, conocida por su potencial productivo, siendo un centro agroindustrial clave, responsable de gran parte del crecimiento industrial del Cesar, aunque altamente susceptible a la sequía, con antecedentes de estudios de riesgo con otros cultivos (Martínez et al. 2016). En caña panelera, especialmente, según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), Aguachica tiene una alta aptitud para caña panelera (UPRA 2020). El clima es árido, semiárido y cálido seco, con precipitación menor que la evapotranspiración, cuenta con altitudes entre 200 y 2,150 msnm, temperaturas promedio de 28 °C y lluvias hasta 1800 mm por año (Aguilera 2004). Dichas características, provocan que fenómenos como El Niño y la variabilidad climática agravan el riesgo de sequías, con posibilidad de hasta dos eventos al año en zonas del centro de la región Caribe (Grajales Lombana et al. 2011; Hurtado 2012). Esto ha sido agravado dadas las actividades agropecuarias y mineras, que han reducido la capacidad del suelo para retener agua (Saldaña-Escorcia et al. 2022).

Para implementar la metodología sobre el municipio, se creó una malla de puntos sobre todo el territorio, para interpolar datos de once estaciones meteorológicas diferentes, excluyendo zonas no aptas. Así mismo, se empleó información del Censo Agropecuario (DANE 2015), la Alcaldía (Alcaldía de Aguachica 2016), el Censo Poblacional (DANE 2019) y simulaciones en el software de la Organización de Alimentos y Agricultura (FAO) AquaCrop para caracterizar el cultivo y las condiciones locales (FAO 2023). El objetivo fue combinar esta información para determinar el nivel de riesgo de sequía para la caña panelera, considerando tanto la amenaza climática como la vulnerabilidad social y productiva.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización climática del municipio dio como resultado una precipitación máxima mensual de aproximadamente 223 mm, presentándose en septiembre, especialmente en las zonas más altas del municipio, así como una precipitación mínima de entre 14–40 mm en los meses de enero y febrero. Con respecto a la temperatura, el rango mínimo va desde 20 °C, bajando a 14 °C en zonas montañosas nororientales; mientras que las temperaturas máximas se dan entre enero y marzo, superando 34 °C. El periodo más crítico de sequía: diciembre a febrero, por bajas lluvias y altas temperaturas.

Con respecto a la amenaza ante la sequía, los valores más bajos (SPEI <-1) se presentan en los meses de enero y febrero a lo largo del territorio. En la zona sur del municipio, la amenaza es más baja, especialmente en los meses de abril y septiembre, pero en los últimos 3 meses del año, la sequía se hace presente, a pesar de la presencia de cuerpos de agua como el río Magdalena. Este fenómeno es especialmente fuerte en la zona suroriental, donde se presenta una constante sequía a lo largo del año, inclusive en periodos que históricamente son lluviosos.

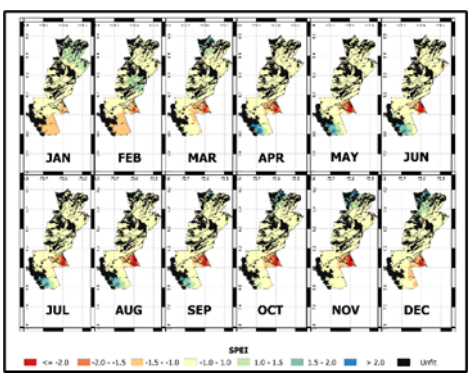


Figura 1. Mapa de Amenaza de sequía en el municipio de Aguachica basado en el SPEI.

Con respecto a la zona norte, la amenaza es muy baja, especialmente entre septiembre y enero, lo cual puede estar relacionado con el incremento en la elevación del terreno, lo que hace que haya una variabilidad climática y de los pisos térmicos.

Sobre los parámetros de vulnerabilidad, se evaluaron dentro de lo que corresponde a la sensibilidad, el cultivo tiene una condición muy desfavorable, dada la falta de riego, erosión severa del suelo y el predominio de pequeños productores. Sobre la exposición, su efecto también es bastante alto por el efecto del Caribe Seco y del Fenómeno del Niño, además del limitado acceso a alertas tempranas. Por último, la capacidad adaptativa es moderada, ya que hay pocas asociaciones campesinas, un bajo acceso a crédito, pero se cuenta con una buena infraestructura vial, gracias al acceso por la Ruta del Sol.

La Figura 2 muestra los mapas de riesgo por mes para la caña de azúcar en el municipio de Aguachica. En el territorio, el 80% presenta un riesgo medio. Es destacable que, en la zona suroriental equivalente a un 9.6% del área total, el riesgo va de moderadamente alto a muy alto durante todo el año, lo que implica que el cultivo es inviable sin riego tecnificado. Por otro lado, las zonas norte y sur presentan un riesgo bajo, por lo que son potencialmente aptas con manejo adecuado. Como último detalle, con respecto a la zonificación de aptitud proporcionada por UPRA, se encuentran algunas diferencias, las cuales están relacionadas al método de cálculo de aptitud de la entidad, con respecto a lo expuesto en el presente artículo.

Finalmente, con respecto a lo desarrollado con AquaCrop, se presenta un cultivo altamente inviable sin riego tecnificado, resultando en un pobre desarrollo, con un rendimiento casi nulo (0.26 ton ha^{-1}) por déficit hídrico inicial. En el caso de adicionarse riego por goteo, la producción aumentaría hasta 20 ton ha^{-1}, superando la media nacional (4–5 ton ha^{-1}), tomando como requerimiento aplicar 10–20 mm $día^{-1}$, 3–4 veces por semana, para mantener el suelo a capacidad de campo.

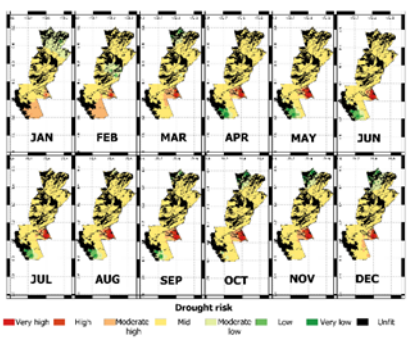


Figura 2. Mapa de Riesgo de sequía en el municipio de Aguachica.

CONCLUSIONES

Con respecto al nivel de riesgo, el municipio de Aguachica presenta un riesgo medio de sequía en la mayor parte de su territorio, lo que permite productividad aceptable con un manejo agronómico adecuado. No obstante, la zona suroriental muestra un riesgo alto durante todo el año, lo que hace inviable el cultivo sin riego permanente, por lo que se requieren estrategias de manejo hídrico (como riego tecnificado). Se sugiere aplicar esta metodología de evaluación de riesgo en otros cultivos y municipios.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la a la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá por el apoyo en la publicación.

REFERENCIAS

Aguilera MM (2004) Aguachica: Centro Agroindustrial del Cesar. Documentos de Trabajo Sobre La Economía Regional 42: 81.

Alcaldía de Aguachica (2016) Análisis de vulnerabilidad alcaldía Aguachica https://wwwaguachica-cesargovco/planes/analisis-de-vulnerabilidad-alcaldia-aguachica

Amaya Molina L (2023) Nivel de daño y rendimiento del cultivo de caña de azúcar panelera en presencia de *Diatraea saccharalis* (Lepidóptera: Crambidae) en Baquero Cundinamarca, Pontificia

Universidad Javeriana.

Basualdo A (2016) Guía metodológica y de indicadores para la elaboración de mapas de riesgo en Colombia.

Bolaños MM, Sebastián Gutiérrez J and Rueda GH (2017) Manejo eficiente de agua y suelo para reducir riesgo agroclimático en un cultivo de cebolla. Suelos Ecuatoriales 47(1–2): 93–98. https://dialnetuniriojaes/servlet/articulo?codigo=7831512

Casagrande GA, Vergara GT, Belmonte L, Fuentes ME and Arnaiz JP (2014) Agroclimatic risk areas for four crop rotation schedules in the agricultural eastern region of la Pampa (Argentina) 24(1): 31–38.

CIFFEN (2022) Definición de riesgo https://ciifenorg/definicion-de-riesgo/#:~:text=El riesgo se define como, la amenaza y la vulnerabilidad.

DANE (2015) Censo Nacional Agropecuario 2014 https://wwwdanegovco/indexphp/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-agropecuario-2014#12

DANE (2017) Particularidades del cultivo de la caña panelera (*Saccharum officinarum* L) en Colombia Dane, 1–10 https://wwwdanegovco/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_mar_2017pdf

DANE (2019) Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 https://wwwdanegovco/indexphp/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018

FAO (2013) Uso del modelo Aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca (Vol 1).

FAO (2016) Cambio climático y seguridad alimentaria y nutricional América Latina y el Caribe [Video recording]

FAO (2023) AquaCrop (Versión 71) https://wwwfaoorg/aquacrop/software/aquacropstandardwindowsprogramme/es/

Fedepanela (2023) Caña panelera: oportunidades del sector panelero en Colombia https://fedepanelaorgco/gremio/wp-content/uploads/2023/07/guia-sobre-oportunidades-del-sector-paneleropdf

Grajales Lombana H, Afanador Téllez G, Franco Castaño J, Ospina O, Téllez Iregui G, Cárdenas Rocha E Carulla Fornaguera J, Jiménez Escobar C, Manrique Perdomo C, Tofiño Rivera A and Becerra Daza A (2011) Plan estratégico regional de ciencia, tecnología e innovación para el Departamento del Cesar – Fase Contextualización.

Hurtado G (2012) Sequía meteorológica y sequía agrícola en Colombia: Incidencia y tendencias. http://wwwideamgovco/documents/21021/21138/Sequias+Incidencias+y+Tendenciaspdf/3e72c86c-cf4a-42f9-95f1-07e7cf88861a

IDEAM (2023) Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos http://dhimeideamgovco/atencionciudadano/

Martínez MFE, Deantonio FLY, Araujo CGA, Rojas EO, Gómez-Latorre DA, Alzate DF, Ortiz LA, Aguilera G E and Boshell-Villamarin JF (2016) Agroclimatic zoning methodology for agricultural production systems in dry Caribbean region of Colombia. Agronomia Colombiana 34(3): 374–384. https://doiorg/1015446/agroncolombv34n359672

Ming Bo1, Guo Yin-qiao, Tao Hong-bin, Liu Guang-zhou, Li Shao-kun and Wang Pu (2015) SPEIPM-based research on drought impact on maize yield in North China Plain. Journal of Integrative Agriculture, 14(4): 660–669. https://doiorg/101016/S2095-3119(14)60778-4

Saldaña-Escorcia R, Otalvarez Herrera R and Herrera Galviz JD (2022) Oferta hídrica superficial del humedal el Gallinazo, ubicado en Aguachica-Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental 14(1): 221–249. https://doiorg/1022490/214564535959

Vega AC, Martínez JC and Muñoz López AL (2017) Redes de conocimiento como estrategia de transferencia de tecnología para la adaptación al cambio climático. Ingenio Magno 8: 10–20.

Vicente-Serrano SM, Beguería S and López-Moreno JI (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate 23(7): 1696–1718. https://doiorg/101175/2009JCLI29091

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Determinación experimental de la huella hídrica del café de Colombia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Experimental determination of the water footprint of Colombian coffee

Nelson Rodríguez Valencia[1], Laura Vanessa Quintero Yepes[2], Ángel de Miguel García[3] and Miguel Antonio Romero Sánchez[4]

Palabras clave:
Beneficio ecológico
Contaminación hídrica
Cultivo de café
Gestión del agua

RESUMEN

Se determinó experimentalmente, en tres Estaciones Experimentales de Cenicafé, la huella hídrica (HH) del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo (siembra nueva- primera renovación por zoca), incluidas las etapas de germinador, almácigo, levante, producción y beneficio, con una densidad de siembra de 10.000 árboles ha^{-1}. La huella hídrica promedio para la producción de una chapola de café fue de 0,336 L/chapola, para la producción de un colino de café fue de 19,09 L/colino. La HH total promedio de la etapa de Levante fue de 1.849,26 L m^{-2}, para la etapa de producción fue de 3.876,24 L m^{-2}, y para la etapa de beneficio fue de 88,96 L kg^{-1} cps, La HH total promedio del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo (siembra nueva-renovación) fue de 4.456,72 L kg^{-1} café verde. Se concluye que, a mayores rendimientos por unidad de área, la HH es menor y que una forma de realizar una gestión integral del recurso hídrico durante el cultivo y beneficio es tener altas densidades de siembra y adoptar el beneficio ecológico con consumo de agua menor a 10 L kg^{-1} cps, realizando un tratamiento a las aguas residuales del café procurando cero descargas al ambiente.

ABSTRACT

Keywords:
Ecological processing
Water pollution
Coffee cultivation
Water management

The water footprint (WF) of Colombian coffee was experimentally determined at three Cenicafé Experimental Stations for a complete crop cycle (new planting - first renewal per zoca), including the germination, seedling, harvesting, production, and processing stages, with a planting density of 10.000 trees ha^{-1}. The average water footprint for the production of a single coffee chapola was 0,336 L $chapola^{-1}$, and for the production of a single coffee hill, it was 19,09 L/hill. The average total water flow rate for the Levante stage was 1.849,26 L m^2, for the Production stage it was 3.876,24 L m^{-2}, and for the processing stage it was 88,96 L kg^{-1} cps. The average total water flow rate for Colombian coffee, for a complete crop cycle (new planting-renewal) was 4.456,72 L kg^{-1} green coffee. It is concluded that the higher the yields per unit area, the lower the water flow rate. One way to comprehensively manage water resources during cultivation and processing is to maintain high planting densities and adopt an organic processing system with water consumption of less than 10 L kg^{-1} cps, while treating coffee wastewater to ensure zero discharge into the environment.

[1]Disciplina Poscosecha. Cenicafé, Manizales, Colombia. Nelson.Rodriguez@cafedecolombia.com
[2]Federación Nacional de Cafeteros-FNC, Manizales, Colombia. Laura.Quintero@cafedecolombia.com
[3]Environmental Research, Water and Food, Wageningen University Research-UR, The Netherlands. angel.demiguelgarcia@wur.nl
[4]Centro Internacional de Agricultura Tropical- CIAT, Cali, Colombia. m.a.romero@cgiar.org

CC BY NC SA

Para avanzar en el conocimiento de la relación del agua con el cultivo y el beneficio del café es posible realizar la medición de la Huella Hídrica (HH), concepto que fue presentado por Rees y Wackernagel (1996) y Hoekstra y Hung (2002), y fue concebido como una herramienta para estimar el contenido de agua oculta (asociada) en cualquier bien o servicio consumido por un individuo o grupo de individuos de un área específica. La HH tiene relación con el uso del agua para un proceso antrópico; una parte del volumen usado no retorna a la cuenca de la cual fue extraída o retorna con una calidad diferente a la original. Por lo tanto, la HH se refiere al impacto territorial del uso, en términos de reducción de la disponibilidad de agua tanto en cantidad como en calidad, a partir de un proceso antrópico determinado.

La HH es un indicador de uso de agua dulce que es palpable no sólo en el uso de agua directo de un consumidor o productor, sino también en su uso indirecto. La HH puede ser considerada como un indicador global de apropiación de los recursos de agua dulce, por encima de la medida tradicional y restringida de la extracción de agua.

La HH de un producto es el volumen de agua utilizada para producirlo, medido a lo largo de la cadena de suministro. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuentes y volúmenes de contaminación por cada tipo de contaminante, y cuyos componentes pueden ser especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra et al. 2011), por lo que se constituye en una herramienta importante para los planificadores y administradores del agua, con el objetivo que realicen una eficiente gestión integral del recurso hídrico en sus territorios.

Según el Estudio Nacional del Agua (ENA 2018), el cultivo del café registra la mayor HH verde del sector agrícola colombiano, con un valor de 10.786,5 Hm^3 $año^{-1}$ (representando el 25,5% de la HH verde total del sector agrícola) y una HH azul de sólo 0,6 Hm^3 $año^{-1}$ (representando el 0,01% de la HH azul total del sector agrícola) (IDEAM 2019). Por lo tanto, es necesario generar estrategias que permitan optimizar los rendimientos de la HH verde, a la vez que se mantengan las HH azul y la HH gris en valores muy bajos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experimentación de la etapa de germinador para el cálculo de la huella hídrica del café de Colombia se realizó en las estaciones experimentales El Rosario (Venecia, Antioquia), Naranjal (Chinchiná, Caldas) y El Tambo (Tambo, Cauca), para ello se construyeron 3 germinadores, con un área de 1,5 m^2 cada uno y se sembró 1 kg de semilla de café Castillo regional de acuerdo con la zona y los protocolos de Cenicafé (tipo de sustrato, metodología de siembra, entre otros) (Rodríguez et al. 2024).

Para la etapa de almácigo, en cada una de las 3 estaciones experimentales, se llenaron 1.260 bolsas de 17*23 cm con suelo de la Estación y pulpa de café descompuesta en relación 3 a 1, de acuerdo con los protocolos de Cenicafé. Estas bolsas se distribuyeron en tres micro-lotes de 420 bolsas cada uno y se colocaron sobre un plástico que permitiera la recolección de los lixiviados. Dada la necesidad de caracterizar la huella hídrica en sus diferentes colores, se enrollaron los bordes del plástico en guadua y se le generó una pendiente al plástico hacia el centro y hacia la parte inferior del área experimental, con el fin de canalizar los drenados hacia una tubería de recolección y conducirlos hasta un tanque ubicado en la zona baja de los montajes. Se organizó cada micro-lote y cada colector en forma independiente.

Se realizó un registro diario de la precipitación en la Estación, con el fin de determinar la HH verde. Mediante la utilización de un medidor se cuantificó la cantidad de agua utilizada en el riego del almácigo, con el fin de determinar la HH azul. Se recolectaron, midieron y caracterizaron los drenados generados en el almácigo con el fin de determinar la HH gris.

Una vez producidos los colinos se inició con la siembra de los mismos y con la delimitación e instrumentación de las parcelas para la determinación de la huella hídrica en las etapas de levante y producción en las 3 estaciones experimentales. En cada Estación Experimental se delimitaron 3 parcelas experimentales para la etapa de levante y 3 parcelas experimentales para la etapa de producción. Cada parcela estuvo conformada por 9 árboles de café variedad Castillo (en sus etapas de levante y producción) con una densidad de siembra de 10.000

árboles/ha. El tamaño de cada parcela fue de 3x3 m (9 m^2) distribuidas en el área de siembra de los colinos y aisladas, por lo menos, 3 m de surcos y caminos, con el fin de evitar el efecto borde.

Cada parcela fue instrumentada, de forma que se pudieran determinar las entradas y salidas de agua. Para evaluar la entrada de agua a la parcela (por precipitación) se ubicaron pluviómetros a 2,5 m de altura. Para determinar la salida de agua (por escorrentía, percolación y evapotranspiración), en cada parcela se instalaron de 2 sondas de humedad tipo Decagon 5TE (que permitían monitorear las variables humedad, temperatura y conductividad eléctrica) ubicadas a 15 y 45 cm de profundidad, se seleccionaron estos valores de profundidad dado que el campo de monitoreo de las sondas es de 30 cm, ubicando la sonda en el valor medio, permitiendo, entre las 2 sondas, una valoración del cambio de humedad en los primeros 60 cm del perfil del suelo. De igual manera, se instalaron 2 cápsulas de succión, ubicadas a 45 cm de profundidad, separadas 1,0 m de los sensores de humedad (que permitían la obtención del agua percolada para determinar su calidad) y se construyó una parcela de escorrentía de 30 cm de ancho, canalizando las aguas de escorrentía a un tanque para su recolección. Los sensores de humedad y el pluviómetro se conectaron a un a un datalogger tipo Decagon EM50 (5 canales) para el registro continuo de la información.

Para los lotes en producción se realizó la cosecha del fruto y el beneficio en las estaciones experimentales, las cuales contaban con sistemas de tratamiento de aguas residuales del beneficio. En ellas se cuantificó el volumen de agua utilizada en el beneficio del fruto y el volumen y la calidad del agua a la salida del sistema de tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La etapa de germinador tuvo una duración promedio de 96 días. La HH total promedio de la etapa de germinador, evaluada en las 3 estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 960,32 L m^{-2}, representando la HH verde el 42,54% (408,48 L m^{-2}), la HH gris un porcentaje del 35,71% (342,92 L m^{-2}) y la HH azul el 21,76% (208,92 L m^{-2}). La huella hídrica promedio para la producción de una chapola de café fue de 0,336 L/chapola (HH verde del 40,07%, HH azul del 20,49% y HH gris del 39,44%).

La etapa de almácigo tuvo una duración promedio de 226 días. La HH total promedio de la etapa de almácigo, evaluada en las 3 estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 1.618,03 L m^{-2}, representando la HH verde un porcentaje del 54,12% (875,68 L m^{-2}), la HH azul el 28,55% (462,00 L m^{-2}) y la HH gris el 17,33% (280,35 L m^{-2}). La huella hídrica promedio para la producción de un colino de café fue de 19,09 L/colino (HH verde del 53,53%, HH azul del 28,24% y HH gris del 18,23%).

La etapa de Levante tuvo una duración promedio de 736 y comprendió el periodo de tiempo entre la siembra en campo y la producción de los primeros frutos. La HH total promedio de la etapa de Levante, evaluada en las 3 estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 1849,26 L m^{-2}, representando la HH verde un porcentaje del 77,82% (1439,06 L m^{-2}) y la HH gris el 22,18% (410,20 L m^{-2}).

La etapa de Producción se monitoreó durante 736 días. La HH total promedio de la etapa de Producción, evaluada en las 3 estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 2.584,16 L m^{-2}, representando la HH verde un porcentaje del 81,55% (2.107,49 L m^{-2}) y la HH gris el 18,45% (476,67 L m^{-2}).

El café recolectado en las parcelas experimentales durante las etapas de Levante y Producción fue beneficiado en las estaciones experimentales y se cuantificó el agua utilizada en el proceso de beneficio y se caracterizó el agua residual descargada al suelo o a cuerpos de agua superficial. La HH total promedio de la etapa de beneficio, evaluada en las 3 estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 88,96 L kg^{-1} cps, representando la HH gris un porcentaje del 94,72% (84,26 L kg^{-1} cps) y la HH azul el 5,28% (4,70 L kg^{-1} cps).

La HH total promedio del café de Colombia, para un ciclo completo de cultivo (siembra nueva-renovación) y una densidad de siembra de 10.000 árboles ha^{-1}, evaluada en las 3 estaciones experimentales de Cenicafé, fue de 3.537,30 L kg^{-1} cps, representando la HH verde un porcentaje del 78,24% (2.767,49 L kg^{-1} cps), la HH gris el 21,54% (761,82 L kg^{-1} de cps) y la HH azul el 0,23% (7,98 L kg^{-1} cps) (Figura 1).

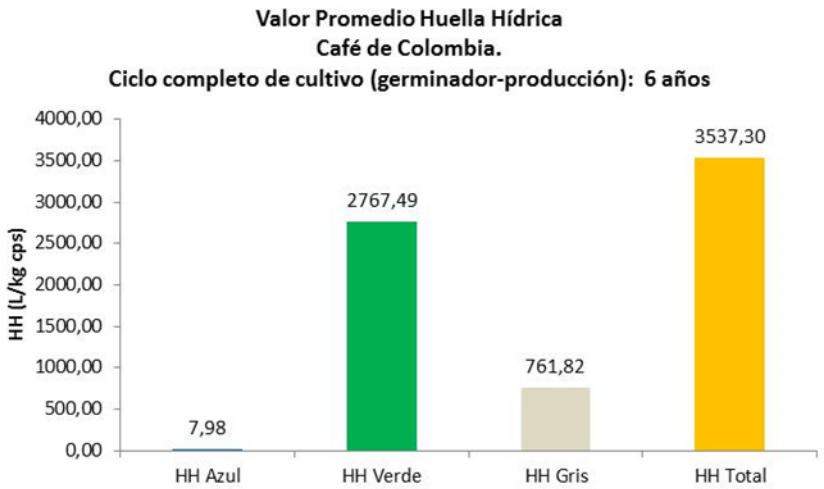


Figura 1. Valores de la Huella Hídrica del café de Colombia. Promedio 3 Estaciones.

La importancia de los resultados obtenidos en la presente investigación, es que se logra determinar, de manera experimental, el valor de la HH total del café de Colombia y los resultados muestran que su valor de 4.456,72 L kg^{-1} cv es inferior al reportado por otros autores, cuyos valores han variado entre 7.607 L kg^{-1} cv y 14.566 L kg^{-1} cv (Rodríguez et al. 2024).

CONCLUSIÓN

El uso de información local como el clima, el rendimiento, el manejo del cultivo, la tipología del sistema de beneficio o el tratamiento de efluentes, es esencial para obtener un valor representativo de la HH. De igual forma, una clara definición de los elementos incluidos en el análisis, especialmente en el caso de la HH gris, es imprescindible para obtener valores comparables con otros trabajos.

De la presente investigación queda claro que a mayores rendimientos por unidad de área la HH es menor y que una forma de realizar una gestión integral del recurso hídrico durante el cultivo es tener altas densidades de siembra y para el caso de la etapa de beneficio, es adoptar el beneficio ecológico con consumo de agua menor a 10 L kg^{-1} cps y realizar un tratamiento a las aguas residuales del café procurando cero descargas al suelo y a cuerpos de agua superficiales lo que permite disminuir en forma significativa las HH azul y HH gris de esta etapa.

Para el caso de la HH azul se puede disminuir su valor hasta en más de 100 veces respecto al beneficio convencional y para el caso de la HH gris, se puede disminuir su valor hasta en más de 725 veces respecto al beneficio convencional. Cenicafé a partir de los resultados de sus investigaciones recomienda a los caficultores la siembra de un alto número de plantas/ha (hasta 10.000 plantas) y la adopción del beneficio ecológico para mejorar su rentabilidad (Rodríguez et al. 2024).

Chapagain y Hoekstra (2007) estimaron que se necesitan 140 L de agua para producir una taza de café estándar de 125 mL (conteniendo 7 g de café tostado y molido). Con los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede estimar que el valor promedio de agua para producir una taza de café estándar colombiano es de 37 L, es decir, un 73,6% menos del valor que se tenía reportado en la literatura.

REFERENCIAS

Chapagain AK and Hoekstra AY (2007) The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands Ecological Economics 64(1): 109-118

Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM and Mekonnen M M (2011) The water footprint assesment manual: Setting the global standard Earthscan https://waterfootprintorg/en/resources/publications/water-footprint-assessment-manual/

Hoekstra AY and Hung PQ (2002) Value of Water Research Report Series No 11 Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade IHE Delft https://wwwwaterfootprintorg/media/downloads/Report11pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2019) Estudio Nacional del Agua 2018, IDEAM. https://ctaorgco/descargables-biblionet/agua-y-medio-ambiente/Estudio-Nacional-del-Agua-2018pdf

Rees W and Wackernagel M (1996) Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable—And why they are a key to sustainability. Environmental Impact Assessment Review 16(4): 223-248. https://doiorg/101016/S0195-9255(96)00022-4

Rodríguez-Valencia N, Quintero-Yepes L, De Miguel-García A and Romero-Sánchez MA (2024) Determinación experimental de la Huella Hídrica del Café de Colombia Cenicafé https://doiorg/1038141/cenbook-0053

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño digital de microdrenajes: Identificación de problemas causados por irregularidades del terreno

Digital design of micro-drainage systems for the identification of problems caused by terrain irregularities

Sebastian Saavedra Rincon[1]* and Oscar Chaparro Anaya[1]

RESUMEN

Se presenta una metodología para el diseño de microdrenajes agrícolas usando herramientas digitales libres como QGIS y Python. Se aplicó en el Centro Experimental de la Universidad Nacional sed Palmira, en una zona con depresión topográfica y suelo arcilloso, condiciones que favorecen el encharcamiento. A partir de un modelo digital de elevación y análisis de escurrimiento superficial, se propusieron tres alternativas de canalización. La opción seleccionada ubica el drenaje sin interferir con las labores de mecanización. Los resultados evidencian el potencial de estas herramientas para mejorar la gestión hídrica y apoyar la enseñanza en ingeniería agrícola.

Palabras clave:
Anegamiento
Escurrimiento
Mecanización
Python
QGIS

ABSTRACT

This study presents a methodology for designing agricultural microdrainage systems using open-source tools such as QGIS and Python. It was applied at the Experimental Center of the National University of Colombia, Palmira campus, in an area with a topographic depression and clayey soil, conditions that promote waterlogging. Based on a digital elevation model and surface runoff analysis, three drainage alternatives were proposed. The selected option improves drainage without interfering with mechanized field operations. The results demonstrate the potential of these tools to enhance water management and support agricultural engineering education.

Keywords:
Waterlogging
Runoff
Mechanization
Python
QGIS

[1]Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia ORCID: 0000-0001-6911-2818; ORCID: 0000-0001-5834-0786
*Corresponding author: ssaavedrar@unal.edu.co

CC BY NC SA

El manejo del recurso hídrico en suelos agrícolas con topografía irregular representa un desafío técnico frecuente en regiones tropicales. La acumulación de agua en la superficie del suelo (encharcamiento) por largos periodos de tiempo (anegamiento) afecta negativamente la productividad de cultivos y dificulta las operaciones mecanizadas en campo (Fischer 2021; Saavedra-Rincón and Chaparro-Anaya 2022). Frente a esto, el diseño de sistemas de microdrenaje superficial se configura como una solución viable, especialmente en áreas con pendientes suaves donde el escurrimiento natural es insuficiente.

En la actualidad, el acceso a herramientas de software libre como QGIS y lenguajes de programación como Python abre nuevas posibilidades para la planificación del drenaje agrícola, mejorando la eficiencia en la gestión de los datos relacionados con el manejo del agua (Jumbo Castillo et al. 2024). Este trabajo tiene como objetivo proponer una metodología replicable para identificar zonas críticas y diseñar soluciones hidráulicas simples, a través de la integración de datos espaciales y modelación con código abierto.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología fue aplicada en el Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira (CEUNP), ubicado en el Valle del Cauca, Colombia (Figura 1). Para representar el relieve del terreno, se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) SRTM con una resolución de 30x30 m, obtenido a través del complemento Open Topography DEM Downloader en QGIS. La generación de curvas de nivel y el cálculo de gradientes negativos para simular las trayectorias del flujo superficial se realizó utilizando diversas librerías del ecosistema Python: Rasterio, NumPy, Matplotlib, GeoPandas, SciPy y Shapely.



Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Una vez definida el área de interés, se seleccionó la zona delimitada 2 para proponer alternativas de microdrenaje. Esta zona fue elegida debido a la presencia de una depresión topográfica e irregularidad en el relieve que, durante los eventos de precipitación, puede incrementar los tiempos de permanencia del agua sobre el suelo antes de que fluya naturalmente hacia los canales de drenaje colectores. Además, las características texturales arcillosas del suelo favorecen la retención y acumulación de humedad, agravando el riesgo de encharcamiento (Acosta *et al*. 1997).

Con la ayuda del complemento Profile Tool de QGIS, se generaron perfiles de elevación a lo largo de la zona de estudio, para identificar áreas propensas a acumulación y escurrimiento de agua. Finalmente, se diseñó un canal trapezoidal para el manejo del escurrimiento utilizando un modelo hidráulico basado en la fórmula de Manning. Para ello, se realizaron iteraciones numéricas en Python, empleando las librerías NumPy y SciPy. Los parámetros de diseño considerados fueron: un caudal de escorrentía de 0.005 $m^3\ s^{-1}$ (estimado mediante el método racional con la precipitación máxima registrada

en el primer semestre de 2025), una pendiente de 0.001 m m^{-1}, un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025, un talud de 1:1 y un ancho de solera de 0.3 m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis topográfico permitió identificar zonas deprimidas con riesgo de acumulación de agua (Figura 2A). La red de flujo superficial generada evidenció las trayectorias naturales del escurrimiento en el área de estudio, las cuales fueron delimitadas espacialmente y exportadas como shapefiles para facilitar su interpretación en QGIS (Figura 2B).



Figura 2. Zonas topográficamente deprimidas (A) y Red de escurrimiento superficial generada (B).

Con base en estas rutas, se propusieron tres alternativas de microdrenaje, siendo la opción 3 la más conveniente desde el punto de vista hidráulico y operativo (Figura 3). Esta alternativa fue seleccionada debido a que su trazo minimiza la interferencia con el tránsito de la maquinaria agrícola durante las operaciones de mecanización, lo cual reduce el riesgo de daños al canal y evita restricciones operativas en campo. Además, se alinea con el flujo superficial natural del área, lo que favorece la evacuación del agua.

La Figura 3 muestra también el perfil topográfico entre los puntos A y B, evidenciando un gradiente continuo y suave que respalda la funcionalidad del diseño hidráulico. En el recuadro superior derecho se destaca la zona de problema, donde se incrementa el tiempo de permanencia del agua sobre el suelo durante los eventos de lluvia, favoreciendo el encharcamiento y la saturación del perfil del suelo. Las opciones 1 y 2, en contraste, atraviesan zonas de uso activo que van en contravía del criterio de selección.

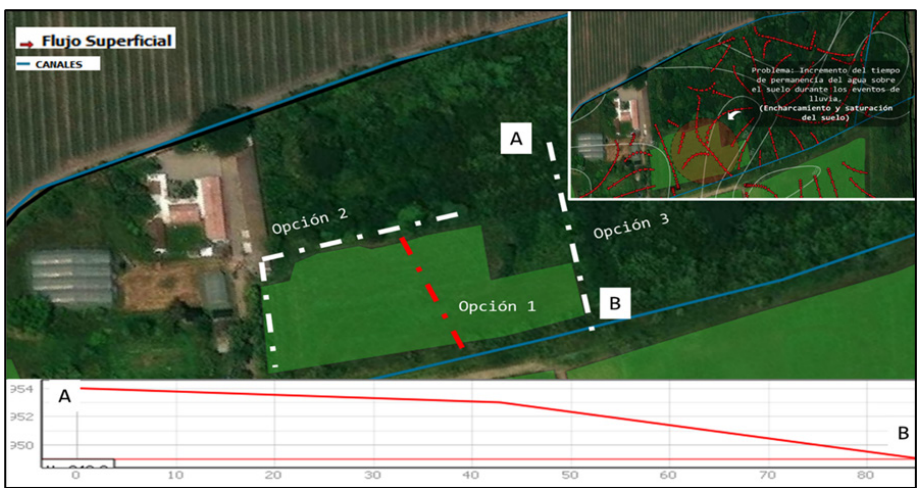


Figura 3. Propuesta de alternativas de microdrenaje - microdrenaje con perfil de elevación A–B.

El diseño del canal seleccionado arrojó una profundidad hidráulica de 0,16 m, obtenida mediante un modelo basado en la fórmula de Manning y resuelto con operaciones iterativas en Python. En la Figura 4, se observa la sección transversal del canal, donde se especifican el ancho de solera, el talud y la lámina de agua alcanzada bajo las condiciones de diseño, con una sobrealtura de 0.03 m para garantizar un margen de seguridad hidráulica.

La Figura 4 también señala la longitud total del canal (80 m), y resalta la aplicación del modelo hidráulico empírico como base del diseño. Este enfoque permitió generar una visualización clara y detallada de las dimensiones del canal.

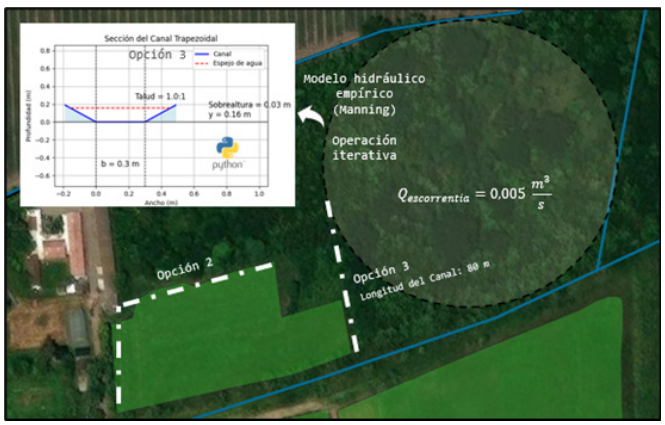


Figura 4. Diseño del canal trapezoidal para la opción 3.

CONCLUSIÓN

La integración de herramientas libres como QGIS y Python permite desarrollar procesos de diagnóstico y diseño de sistemas de microdrenaje agrícolas de forma accesible y replicable. La metodología implementada en el CEUNP mostró ser eficaz para identificar zonas críticas de acumulación de agua, simular trayectorias de escurrimiento y diseñar canales trapezoidales funcionales. Esta propuesta contribuye tanto al mejoramiento del manejo hídrico en campo de cultivos, como a la formación práctica de estudiantes de ingeniería agrícola.

REFERENCIAS

Acosta JR, del Carmen Aragón M, Llanos Y and Madero-Morales E (1997) Cartografía ultradetallada de suelos y evaluación de tierras del centro experimental de la Universidad Nacional de Colombia (CEUNP) sede Palmira. Acta Agronómica 47(1): 23-34 https://revistasunaleduco/indexphp/acta_agronomica/article/view/48226

Fischer G (2021) El aumento de las inundaciones generado por el cambio climático afectará nuestros cultivos. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 74(3): 9619-9620. http://wwwscieloorgco/scielophp?script=sci_arttextandpid=S0304-28472021000309619andlng=enandtlng=es

Jumbo Castillo FA, Zea Ordoñez MP, Redrovan Castillo FF and Valarezo Pardo MR (2024) Uso de herramientas de SIG en la definición de áreas de drenaje de la unidad 13949 - Río León. Journal of Science and Research 9(4): 84–100. https://revistasutbeduec/indexphp/sr/article/view/3238

Saavedra-Rincón S and Chaparro-Anaya Ó (2022) Compactación inducida durante cosecha mecánica de *Saccharum* spp y su relación con propiedades estructurales del suelo. Avances En Investigación Agropecuaria 26(1): 155–176. https://doiorg/1053897/RevAIA222623

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Modelo de permeámetro de cabeza constante tipo IPAZ

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

IPAZ-type constant head permeameter model

Sandro Nolan Ipaz Cuastumal[1]*, Juan Angel Toro Osorio [2] and Lady Laura Casas Sanabria[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Conductividad hidráulica saturada
Drenaje agrícola
Permeámetro de cabeza constante
Propiedades del suelo

El permeámetro de cabeza constante tipo IPAZ se desarrolló como una alternativa económica y funcional para la determinación de la conductividad hidráulica saturada (K_s) en suelos agrícolas. El equipo, construido con materiales locales y bajo los principios de la Ley de Darcy, permite procesar hasta 10 muestras simultáneamente en un área reducida, garantizando eficiencia en espacio y uso de agua. Su aplicación en suelos del corregimiento El Lauro (Candelaria) evidenció diferencias en K_s según la textura del suelo. El modelo resulta útil en investigación, docencia y prácticas agrícolas orientadas al diseño de drenaje y gestión hídrica.

ABSTRACT

Keywords:
Saturated hydraulic conductivity
Agricultural drainage
Constant head permeameter
Soil properties

The IPAZ-type constant head permeameter was developed as an economical and functional alternative for determining saturated hydraulic conductivity (K_s) in agricultural soils. Built with locally available materials and based on Darcy's Law, the device allows simultaneous processing of up to 10 samples in a reduced area, ensuring efficient use of space and water. Its application to soils from El Lauro (Candelaria) revealed differences in K_s related to soil texture. The model proves useful for research, teaching, and agricultural practices, providing valuable support for drainage design and water resource management.

[1]Docente Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
[2]Estudiantes. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
*Corresponding author: snipazc@unal.edu.co

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

La conductividad hidráulica saturada (K_s) mide la velocidad con que el agua pasa a través de una capa de suelo completamente saturado, y depende de factores como la textura, la estructura, la continuidad de los poros y la viscosidad del agua. La K_s se determina en laboratorio mediante el permeámetro de cabeza constante, y se expresa en unidades de velocidad (cm h^{-1}). La K_s se calcula mediante la Ley de Darcy, que relaciona el caudal con el área de flujo, la carga hidráulica y la longitud del medio poroso.

El modelo de Permeámetro de Cabeza Constante tipo IPAZ, responde a la necesidad de tener equipos de bajo costo y eficientes espacialmente, capaces de caracterizar las propiedades del suelo, y generar información clave en la eficiencia de uso del agua, en el diseño de sistemas de drenaje y riego, la gestión del recurso hídrico, la evaluación de la recarga de acuíferos y el análisis del riesgo de erosión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyó un permeámetro de carga constante con materiales disponibles localmente, y bajo los principios básicos del método Darcy para suelos saturados. El equipo mantiene constante el gradiente hidráulico a través del principio de la botella invertida sobre un almacenamiento de agua, y mediante mangueras y válvulas permite procesar 10 muestras simultáneamente.

Las muestras deben ser tomadas en cilindros de acero y saturadas evitando la formación de burbujas de aire. Una vez estabilizado el flujo, se mide el volumen de agua que atraviesa el cilindro de suelo en intervalos de tiempo iguales, y mediante la ecuación de Darcy (1), se calcula la conductividad hidráulica saturada K_s (2).

$$v = Ks * i \quad (1)$$

$$Ks = \frac{V}{t * A} * \frac{L}{h2 - h1} \quad (2)$$

Donde: Ks: conductividad hidráulica saturada [cm $día^{-1}$], i: gradiente hidráulico, L: longitud de la muestra de suelo [cm], h: carga hidráulica [cm], v: velocidad de flujo [cm h^{-1}], V: volumen de agua a través de la muestras de suelo [cm^3], t: intervalo de tiempo de medición de V [min].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La implementación del Permeámetro de Cabeza Constante tipo Ipaz permitió la estimación de la conductividad hidráulica saturada (K_s) en dos suelos representativos del corregimiento El Lauro, municipio de Candelaria. Los suelos identificados como ML01 (Franco limoso) y ML02 (Franco) mostraron diferencias en su capacidad de conducción de agua, evidenciando la influencia de la textura del suelo en la dinámica del flujo del agua.

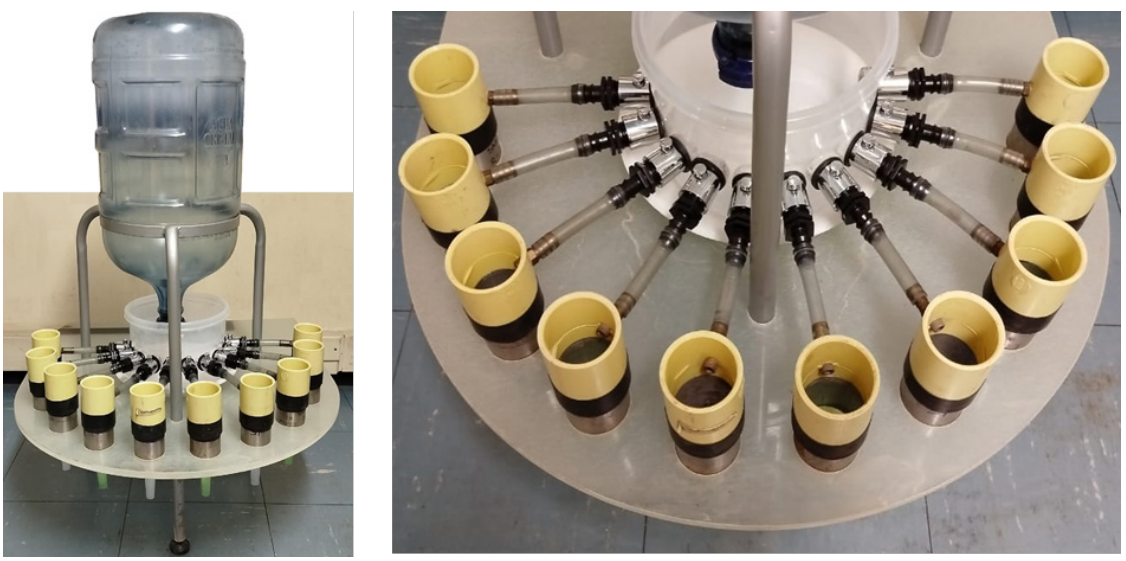


Figura 1. Permeámetro de cabeza constante Tipo Ipaz.

Tabla 1. Lecturas y cálculo de la Ks (cm h^{-1}).

Dato	Volumen (cc)	t (min)	Ks (cm/h)
0	0	0	
1	13,0	15	1,38
2	22,0	25	1,43
3	30,0	35	1,27
4	38,0	45	1,27
5	45,0	55	1,11
6	53,0	65	1,27
7	59,5	75	1,03

Dato	Volumen (cc)	t (min)	Ks (cm/h)
0	0	0	
1	4,0	15	0,42
2	7,0	25	0,48
3	9,0	35	0,32
4	12,0	45	0,48
5	15,0	55	0,48
6	17,0	65	0,32
7	20,5	75	0,56

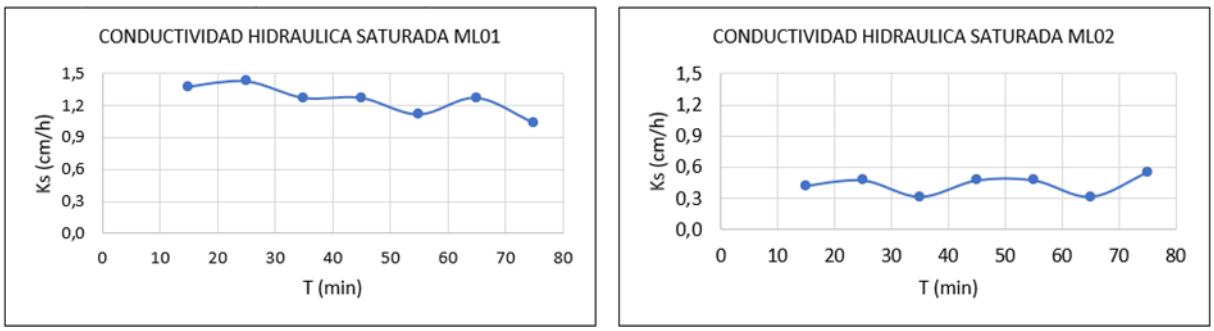


Figura 2. Curvas de Ks obtenidas con el permeámetro de cabeza constante Tipo Ipaz.

CONCLUSIÓN

El modelo actual permite determinar la Ks para aplicaciones académicas, investigación y prácticas agrícolas.

El permeámetro tipo IPAZ demuestra ser una alternativa económica, funcional y replicable para la medición K_s en el laboratorio permitiendo procesar hasta 10 muestras de forma simultanea, en un área de 0,5 m^2, y debido a que funciona con el sistema de botella invertida, usa unicamente el agua reuqerida, sin generar desperdicio de agua.

A Futuro

El equipo permeámetro de cabeza constante tipo Ipaz, se está automatización a apartir de sensores de nivel ultrasonicos, con el fin de que permita estimar el volumen de agua de manera automática, y con esto calcular el volumen de agua que pasa la columna de suelo.

AGRADECIMIENTOS

Al personal al Laboratorio de Maquinaria y Mecanización Agricola, Laboratorio de Materiales, Laboratotio de Física de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, por su apoyo en el aporte, corte y manipulación de materiales para llegar a obtener el modelo.

REFERENCIAS

Beltrano J and Giménez, D (2015) Cultivo en Hidroponía. Editorial de la Universidad de la Plata- EDULP, Buenos Aires, Argentina.

Gavande SA (1982) Física de suelos: principios y aplicaciones. Editorial Limusa-Wiley, México.

Hillel Daniel (1998) Environmental Soil Physics. San Diego, USA.

Lal R (2004) Principles of soil physics. M. Dekker, New York.

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Interacciones entre lombrices de tierra, porosidad y estabilidad de agregados en sistemas de pastura y cultivo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Interactions between earthworms, porosity and aggregate stability in pasture and cropping systems

Valentina Sánchez Porras[1]* and Nicolás Duarte Cano[1]

RESUMEN

Las lombrices de tierra son reconocidas como ingenieros del ecosistema por su capacidad de modificar propiedades físicas del suelo. Este estudio evaluó la relación entre la densidad de lombrices, la porosidad y la estabilidad de los agregados del suelo en dos sistemas de manejo: pastura (PT) y cultivo de papa (CP). Se tomaron muestras en cinco puntos elegidos al azar, evaluando propiedades físicas y biológicas del suelo. Los resultados mostraron diferencias significativas entre PT y CP en variables como densidad de lombrices, porosidad y estabilidad estructural. La densidad de lombrices fue mayor en PT, posiblemente por la cobertura vegetal y el aporte de materia orgánica, mientras que en CP prácticas como la labranza pueden afectar negativamente la fauna edáfica. El análisis de componentes principales reveló una correlación negativa entre densidad de lombrices y porosidad, y una positiva con índices de estabilidad estructural. Se recomienda realizar estudios a largo plazo para comprender mejor la dinámica temporal de estas propiedades bajo distintos sistemas productivos, incorporando una descripción de los tipos de comportamiento de bioturbación que exhiben las lombrices, así como variables hidráulicas adicionales.

Palabras clave:
Análisis de componentes principales
Bioturbación
Estabilidad estructural
Ingenieros del ecosistema

ABSTRACT

Earthworms are recognized as ecosystem engineers due to their ability to modify soil physical properties. This study evaluated the relationship between earthworm density, soil porosity, and aggregate stability in two management systems: pasture (PT) and potato cultivation (CP). Soil samples were collected from five random points per system, assessing both physical and biological properties. Results showed significant differences between PT and CP in variables such as earthworm density, porosity, bulk density, and aggregate stability indexes. Earthworm density was higher in PT, likely due to continuous plant cover and organic matter input, whereas conventional practices such as tillage in CP negatively affected soil fauna. Principal component analysis revealed a negative correlation between earthworm density and porosity, and a positive correlation with aggregate stability. Future research should focus on earthworm bioturbation behavior, incorporate additional hydraulic variables, and include long-term monitoring to better understand the temporal dynamics of soil properties under different land management systems.

Keywords:
Principal component analysis
Bioturbation
Soil structural stability
Ecosystem engineers

[1]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
*Corresponding author: vsanchezpo@unal.edu.co

CC BY NC SA

Las lombrices de tierra (Annelida: Oligochaeta) han sido ampliamente reconocidas por su papel como "ingenieros del ecosistema", gracias a actividades como la bioturbación, la creación de túneles, galerías, consumo y deposición de excretas crean condiciones favorables para la penetración de las raíces y *hotspots* de actividad microbiana (Capowiez et al. 2021a). No obstante, hasta hace relativamente poco el alcance de su actividad biológica para modificar propiedades, como la capacidad de retención de humedad e infiltración, ha sido el enfoque de las investigaciones relacionadas con la hidráulica del suelo (Wen et al. 2020; Sutri et al. 2024).

Especies de lombrices con comportamientos y ecología distinta impactan el suelo de manera variable. En el contexto de las propiedades hidrofísicas, se ha demostrado que el tratamiento con lombrices tiene un aumento significativo en la capacidad de retención de humedad y en el porcentaje de agregados estables al agua. Sin embargo, en los tratamientos con *Lumbricus terrestres*, una especie clasificada como anécica que excava túneles verticales profundos, sin ramificaciones y conectados a la superficie por un orificio, este efecto se evidenció principalmente en los primeros 6,5 cm del suelo, a diferencia de *Allolobophora chlorotica,* lombriz endogea que habita los primeros 30 cm y forma galerías horizontales que mostró un patrón diferente (Bottinelli et al. 2020; Hallam and Hodson 2020).

Aunque las lombrices influyen en la conectividad y formación de macroporos, así como en la agregación de las partículas del suelo por medio de los turriculos, no siempre se considera este factor biótico al momento de estudiar parámetros que representan el movimiento de agua en el suelo, en especial cuando los sistemas productivos y condiciones de manejo difieren (Sutri et al. 2024). En este sentido, el objetivo de este proyecto fue evaluar qué tipo de relaciones existen entre la densidad de lombrices de tierra, la porosidad y estabilidad de los agregados en dos sistemas de manejo distintos, pastoreo (PT) y cultivo (CP). Se hipotetizó (i) que debido a la labranza recurrente y menor cobertura se observa una menor densidad de lombrices en el cultivo; (ii) por el tipo de manejo, en el cultivo se presenta una mayor porosidad, independientemente de la densidad de lombrices; (iii) existe una relación positiva entre la densidad de lombrices, tanto con la porosidad, como con la estabilidad de los agregados en ambos sistemas

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo

El muestreo se realizó en una finca productora ubicada en el municipio de Suesca (5°04 '38.9 " N, 73°45' 21.5" W). El sistema de pastoreo corresponde a un potrero establecido sobre una matriz de pastos naturales, con predominancia de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), donde se implementa un sistema de pastoreo rotacional aproximadamente cada 45 días. El sistema agrícola corresponde a un cultivo de papa criolla (*Solanum phureja*). Para cada sistema, fueron seleccionados cinco puntos de muestreo en zig-zag. En cada punto se llevó a cabo el conteo manual de lombrices y se tomaron muestras disturbadas y no disturbadas para la determinación de propiedades físicas del suelo en laboratorio.

Caracterización biológica y física del suelo

Para determinar la densidad de lombrices (número de individuos por volumen de suelo), se extrajo un monolito de 20×20×20 cm por punto de muestreo. El suelo removido fue depositado en una bandeja y las lombrices fueron contadas manualmente. Posteriormente, los valores obtenidos fueron extrapolados al número de individuos por metro cuadrado (ind m^{-2}).

Los ensayos para la evaluación de las propiedades físicas del suelo se llevaron a cabo en el Laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. Se realizaron análisis de humedad gravimétrica (θg), textura mediante el método de Bouyoucos, densidad aparente por el método del cilindro (ρb), densidad real mediante picnometría (ρs), porosidad total (ϕ) e índices de estabilidad de agregados, como el diámetro ponderado medio (DPM) y el diámetro geométrico medio (DGM), utilizando la metodología propuesta por Yoder (IGAC 2006).

Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se realizaron con el objetivo de evaluar diferencias significativas entre los sistemas productivos y explorar las relaciones entre las variables biológicas y físicas analizadas. Se comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad por medio de las pruebas de Shapiro-Wilk y de Levene respectivamente. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba

post hoc de Tukey (HSD) y finalmente un análisis de componentes principales (PCA) para visualizar patrones de correlación entre las variables del suelo. Todos los análisis se realizaron en el entorno estadístico R Studio, y se consideró un nivel de significancia de $P \leq 0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables que mostraron una diferencia significativa entre sí para PT y CP fueron: la densidad de lombrices (P=0,0000637), la porosidad (P = 0,000634), la densidad aparente (P=0,00829), la humedad gravimétrica (P=0,0543) y DGM (P=0,0497). En cuanto a la clase textural, tanto en CP como en PT predominan los suelos franco arcillosos (FAr).

La densidad de lombrices fue significativamente mayor en PT que en CP. Este resultado puede explicarse por la presencia de cobertura vegetal continua con pasto y de excretas bovinas, que favorece el desarrollo de comunidades edáficas debido a la constante incorporación de residuos orgánicos (Capowiez et al. 2024). En contraste, el sistema CP está caracterizado por prácticas de manejo convencional, como la labranza y el aporque que pueden ocasionar un daño directo a las lombrices (Sutri et al. 2024).

El análisis de componentes principales (PCA) reveló que los dos primeros componentes (Dim1 y Dim2) explican en conjunto el 81,3% de la varianza total (Figura 1). Las variables que más contribuyeron a la dispersión de los datos fueron la porosidad, la humedad gravimétrica, la densidad aparente y la densidad de lombrices, mientras que la densidad real presentó la menor contribución.

A pesar de presentar una mayor densidad de lombrices, PT mostró una menor porosidad y una mayor densidad aparente en comparación con CP. Este resultado podría deberse al constante pisoteo del ganado, que incrementa la compactación del suelo.

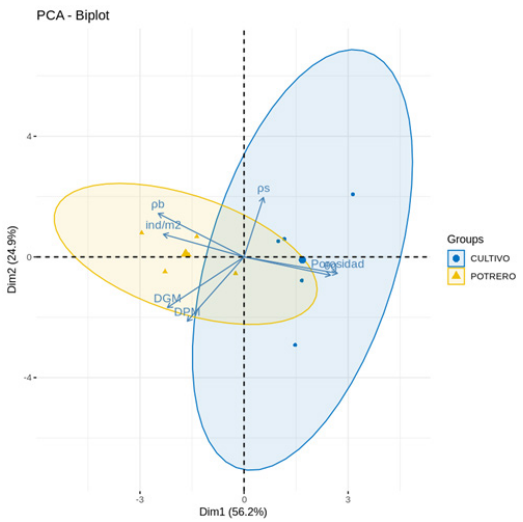


Figura 1. Análisis de componentes principales entre las variables.

Al contrario de lo esperado, el PCA (Figura 1) mostró una correlación negativa entre la densidad de lombrices y la porosidad, refutando la hipótesis propuesta. Si bien numerosos estudios han demostrado que la presencia de lombrices tiende a mejorar variables estructurales del suelo, como la conductividad hidráulica y la porosidad, mediante la creación de macroporos y la agregación de partículas (Hallam et al. 2020; Capowiez et al. 2021b), es importante considerar que la influencia en el suelo que las lombrices ejercen depende de la ecología de las especies presentes. Aunque el estudio no tuvo un enfoque funcional, durante el muestreo se observaron lombrices que podrían clasificarse como endogeas y epigeas, las últimas asociadas principalmente con la descomposición de residuos orgánicos en la superficie del suelo no tanto con la formación de túneles y galerías (Capowiez et al. 2024; Capowiez et al. 2021b). Las diferencias funcionales entre estos grupos, así como su proporción relativa en cada sistema podrían explicar la relación observada con la porosidad.

En cuanto a la relación entre la densidad de lombrices y los índices de estabilidad de los agregados, DPM y DGM, el PCA (Figura 1) señala una correlación positiva entre ambas variables. Diversos estudios han demostrado que las lombrices, a través de la excreción de turriculos, aportan materia orgánica al suelo y estimulan la actividad microbiana, lo que favorece la formación de agregados estables y mejora la estructura del suelo (Griffiths et al. 2021; Hallam et al. 2020).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian diferencias significativas en variables físicas y biológicas del suelo entre dos sistemas productivos. Estas diferencias reflejan el impacto del uso del suelo y las prácticas de manejo sobre la fauna edáfica y propiedades hidrofisicas. Los patrones encontrados entre la densidad de lombrices y variables como la porosidad y la densidad aparente evidencian la necesidad de un análisis más detallado de los grupos funcionales de lombrices presentes, dado que sus efectos sobre el suelo pueden diferir significativamente según su ecología. Para una evaluación más integral se recomienda incorporar el contenido de materia orgánica del suelo como una variable clave para entender los procesos de agregación y actividad biológica, así como otras variables hidráulicas.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a Norberto Perez por su guía durante la fase experimental de este proyecto. También a Camilo Bustos Linares, por su colaboración en la recolección de muestras y en el desarrollo de los análisis estadísticos. A la Universidad Nacional de Colombia por brindar los materiales y el espacio para los análisis de laboratorio. Los autores declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

REFERENCIAS

Bottinelli N, Hedde M, Jouquet P and Capowiez Y (2020) An explicit definition of earthworm ecological categories–Marcel Bouché's triangle revisited. Geoderma 372: 114361.

Capowiez Y, Marchán D, Decaëns T, Hedde M and Bottinelli N (2024) Let earthworms be functional-Definition of new functional groups based on their bioturbation behavior. Soil Biology and Biochemistry 188: 109209.

Capowiez Y, Lévèque T, Pelosi C, Capowiez L, Mazzia C, Schreck E and Dumat C (2021a) Using the ecosystem engineer concept to test the functional effects of a decrease in earthworm abundance due to an historic metal pollution gradient. Applied Soil Ecology 158.

Capowiez Y, Sammartino S, Keller T and Bottinelli, N. (2021b). Decreased burrowing activity of endogeic earthworms and effects on water infiltration in response to an increase in soil bulk density. Pedobiologia 85: 150728.

Griffiths HM, Ashton LA, Parr CL and Eggleton P (2021) The impact of invertebrate decomposers on plants and soil. New Phytologist 231(6): 2142–2149.

Hallam J, Hodson ME (2020) Impact of different earthworm ecotypes on water stable aggregates and soil water holding capacity. Biol Fertil Soils 56: 607–617.

Hallam J, Berdeni D, Grayson R, Guest EJ, Holden J, Lappage MG and Hodson ME (2020) Effect of earthworms on soil physico-hydraulic and chemical properties, herbage production, and wheat growth on arable land converted to ley. Science of the Total Environment 713: 136491.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006) Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6ª edition. IGAC.

Sutri M, Ivask M, Kuu A, Escuer-Gatius J, Reintam E and Shanskiy M (2024) The effects of agricultural practices on earthworm communities in Estonia. European Journal of Soil Biology 122: 103662.

Wen S, Shao MA and Wang J (2020) Earthworm burrowing activity and its effects on soil hydraulic properties under different soil moisture conditions from the Loess Plateau, China. Sustainability 12(21): 9303.

EJE TEMÁTICO 3
Ingeniería de procesos agroindustriales y biotecnológicos



http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Caracterización de la miel de abeja comercializada en el departamento del Huila

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Characterization of honeybee marketed in the department of Huila

Óscar Mauricio Barrera Bermeo[1] and Anayerly Lugo Moreno[2]

Palabras clave:
Adulteraciones
Azúcares
Humedad
Miel de abeja
Multifloral

RESUMEN

La miel de abeja es uno de los productos alimentarios más susceptibles a la adulteración a partir de la combinación de diferentes sustancias azucaradas. En consecuencia, se buscó determinar si las mieles del departamento del Huila presentan alguna adulteración. Para tal fin, se caracterizaron 23 muestras de miel de abeja del departamento, sometidas a pruebas físico-químicas. Los resultados mostraron valores fuera de los límites de humedad recomendados por las normativas del Codex Alimentario y la resolución 1057 de 2010 en las muestras M6, M7, M11 y M23. Las muestras M11 y M22 exceden los límites establecidos en los parámetros conductividad que se asocian con mieles adulteradas y/o multiflorales. Finalmente, las muestras M5, M6, M7, M11, M16 y M23 se consideraron adulteradas por presentar valores fuera de los límites establecidos en el Codex Alimentario y resolución mencionada. Además, los defectos identificados se han relacionado con posibles adulteraciones por azúcares añadidas, prácticas inadecuadas de cosecha, postcosecha y manufactura.

Keywords:
Adulterations
Sugars
Moisture
Honey
Multifloral

ABSTRACT

Honey is one of the food products most susceptible to adulteration from the combination of different sugary substances. Consequently, we sought to determine whether honey from the department of Huila presents any adulteration. To this end, 23 samples of honey from the department were characterized and subjected to physical and chemical testing. The results showed values outside the humidity limits recommended by the Codex Alimentarius regulations and Resolution 1057 of 2010 in samples M6, M7, M11, and M23. Samples M11 and M22 exceeded the limits established for conductivity parameters associated with adulterated and/or multifloral honeys. Finally, samples M5, M6, M7, M11, M16, and M23 were considered adulterated because they presented values outside the limits established by the Codex Alimentarius and the aforementioned resolution. Furthermore, the identified defects have been linked to possible adulteration by added sugars, inadequate harvesting, post-harvest, and manufacturing practices.

[1]Departamento de Ingeniería, Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana, Garzón, Huila, Colombia. Oscar.barrera@usco.edu.co
[2]Egresada. Universidad Surcolombiana, Garzón, Huila. Colombia. lugomorenoanna@gmail.com

CC BY NC SA

La miel es producida del néctar de las flores y contiene más de 200 sustancias: azúcares, proteínas, aminoácidos, enzimas, compuestos volátiles y polifenoles, que proporcionan propiedades antioxidantes y antibacterianas (Majtan et al. 2021; Ashraf et al. 2023; Faúndez et al. 2023). China es el principal productor de miel de abeja a nivel mundial con una producción de 551.000 toneladas y para Colombia la producción en el año 2022 fue de 6.376 toneladas (Minagricultura 2020; ICA 2023).

No obstante, la miel es susceptible a ser adulterada y/o contaminada (Cárdenas-Escudero et al. 2023); por azúcares o jarabes de azúcar concentrado (sacarosa, fructosa, glucosa, azúcar invertido, maltosa, jarabes de maíz alto en fructosa, entre otros) (Fakhlaei et al. 2025). Otras sustancias contaminantes como metales pesados tóxicos (zinc, cromo, mercurio, manganeso, etc.) (Sharma et al. 2023); además de los antibióticos, patógenos y algunos alérgenos que pueden provocar afecciones graves en los órganos internos, como el hígado graso, daño renal agudo y crónico y aumento de grasa corporal total (Sobrino-Gregorio et al. 2018; Fakhlaei et al. 2020; Cárdenas-Escudero et al. 2023), causando un aumento de azúcar en la sangre, liberación de insulina y diabetes tipo II, altos niveles de lípidos en la sangre y peso abdominal, obesidad y presión arterial alta en las personas (Sobrino-Gregorio et al. 2018; Ropciuc et al. 2023).

A pesar de la existencia del Codex Alimentario que establece límites máximos y mínimos permisibles aptos para su consumo, ésta no se impone en los países miembros de las Naciones Unidas (ONU) (FAO and WHO 2019; Zammit Young and Blundell 2023). En Colombia, existe la resolución 3168 de 2015 y la resolución 1057 de 2010 que establece que la miel no cuenta con registro y certificación de productos ante el INVIMA (Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos) considerada como un producto “natural”; por tanto, genera una problemática que relaciona la inocuidad y seguridad alimentaria, limitando la rigurosidad en la aplicación de estándares de calidad y seguimiento en niveles mínimos de adulterantes y/o contaminantes (Sharma et al. 2023). Por consiguiente, evaluar las características físico-químicas de la miel permite verificar la calidad y su autenticidad (Pascual-Maté et al. 2018) siendo estos factores determinantes para identificar o confirmar las cualidades específicas de este producto. Por lo anterior, se planteó la hipótesis, ¿las mieles del departamento del Huila cumplen con la resolución 1057 de 2010 y codex alimentario? En consecuencia, el objetivo de esta investigación consiste en evaluar la calidad fisicoquímica de la miel que se comercializa en el departamento del Huila.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron 23 muestras de miel (500 mL) obtenidas en los supermercados ubicados en los municipios seleccionados (Tabla 1) del departamento del Huila, como resultado del cálculo del tamaño de muestra según lo establecido por (Martínez Bencardino 2012). El contenido de sólidos solubles (°Brix) se determinó usando un refractómetro análogo (BRIXCO). La humedad a partir del índice de refracción de acuerdo a la norma internacional para la miel AOAC (969.38) (b) y las tablas de Chataway. El pH según la norma AOAC (962.19). La conductividad eléctrica en miliSiemens por centímetro (mS/cm) de acuerdo a la Comisión Internacional de la miel (ICH 2009). Todos los análisis se realizaron por triplicado y se realizaron ajuste por temperatura según norma AOAC mencionadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según la normativa del Códex Alimentario (FAO and WHO 2019) y la resolución 1057 de 2010, el pH debe encontrarse en un rango entre 3,5 y 4,5. De acuerdo a los resultados de la (Tabla 1), las variaciones en los datos se relacionan con múltiples factores, como: el origen geográfico, botánico y las condiciones climáticas(Olivero Verbel et al. 2018; Ortega-Bonilla et al. 2021). En cuanto al contenido de sólidos solubles (°Brix) los valores se encontraron dentro de las normativas mencionadas (>60). Con relación a la humedad, en la miel es un factor importante y puede afectar las propiedades físicas (viscosidad, cristalización, color y apariencia) además de estimar la pureza y frescura (Pacheco-López et al. 2017; Cabrera and Santander 2022), el contenido de humedad debe encontrarse por debajo del 20%; por lo cual, las muestras M6, M7, M11 y M23 se encuentran ligeramente fuera de los límites establecidos por las normativas, asociando este comportamiento con posibles fermentaciones y adulteraciones por adición de jarabes, donde, el nivel de adulteración es proporcional al contenido de humedad (Bose and Padmavati 2024;

Damto et al. 2024). Para la conductividad eléctrica las muestras que se encuentran bajo los límites establecidos corresponden a mieles de flores o néctar, mientras que, las dos muestras (M11 y M22) se consideran miel de mieladas (Ortega-Bonilla et al. 2021), otros estudios relacionan este comportamiento con adulteraciones por jarabes, donde la conductividad eléctrica aumenta a medida que aumenta la tasa de adulteración (Gün and Karaoğlu 2024). Sin embargo, existen diferentes factores: origen geográfico y botánico, especie de abeja, condiciones climáticas, trazabilidad en su comercialización, entre otros (Tosun and Keles 2021; Damto et al. 2024; Gün and Karaoğlu 2024) que influyen directamente en la composición tanto fisicoquímica como organoléptica de este producto. Además, otras características fisicoquímicas (el contenido de HMF, ácidos orgánicos, flavonoides, etc.) (Insha et al. 2024) son determinantes para identificar la autenticidad de la miel. Por esta razón, garantizar la pureza de la miel es una prioridad para productores y autoridades reguladoras (Novais et al. 2025) para evitar fraudes económicos y asegurar la salud pública, por lo que, agregar azúcares durante la producción o el procesamiento de la miel se ha utilizado ampliamente para aumentar los beneficios económicos, afectando a los productores de miel, procesadores, mercados minoristas, consumidores y autoridades reguladoras. Además, muchas de estas adulteraciones son difíciles de detectar e identificar respecto al contenido de azúcares presentes de forma natural de aquellos añadidos de forma intencional (Novais et al. 2025).

Tabla 1. Valores de sólidos solubles, pH, humedad y conductividad eléctrica.

Municipio	Cod.	Sólidos solubles*	PH	Humedad*	Cond. E.*
Oporapa	M1	79,933±0,115 ^{f}	3,380±0,010 ^{b}	18,461±0,452 ^{ab}	0,283±0,014 ^{d}
San Agustín	M2	79,667±0,577^{ef}	3,766±0,006 ^{l}	18,533±0,577^{ab}	0,370±0,010 ^{e}
Isnos	M3	78,633±0,550^{bcde}	3,573±0,006 ^{g}	19,603±0,533^{bcde}	0,436±0,02^{fg}
Algeciras	M4	79,667±1,527^{ef}	4,027±0,057 ^{n}	18,509±1,567^{ab}	0,480±0,015^{hi}
Garzón	M5	78,333±0,577^{abcd}	3,503±0,015 ^{e}	19,936±0,644 ^{cdef}	0,201±0,005^{bc}
Pital	M6	77,333±1,527 ^{a}	3,703±0,006 ^{k}	20,905±1,566^{f}	0,460±0,023^{gh}
Pitalito	M7	78,000±1,000^{abc}	3,610±0,020 ^{i}	20,215±1,018^{def}	0,497±0,010^{hi}
Rivera	M8	78,333±0,763^{abcd}	3,503±0,006 ^{e}	19,872±0,779^{cdef}	0,601±0,005^{j}
Santa María	M9	79,667±0,577^{ef}	4,076±0,006 ^{o}	18,533±0,577^{ab}	0,694±0,014^{kl}
Paicol	M10	78,667±0,577^{bcde}	3,380±0,000 ^{b}	19,536±0,581^{bcde}	0,206±0,001^{c}
Baraya	M11	78,000 ±0,000^{abc}	4,397±0,006 ^{p}	20,208±0,000^{def}	1,338±0,095^{n}
Iquira	M12	78,667±0,577^{bcde}	3,587±0,006^{gh}	19,536±0,581^{bcde}	0,582±0,015^{j}
Palestina	M13	80,000±0,000 ^{f}	3,406±0,006 ^{c}	18,200±0,000^{a}	0,395±0,005^{ef}
Tello	M14	79,000±1,000^{cdef}	3,906±0,006 ^{m}	19,203±1,004^{abcd}	0,731±0,004l
La Argentina	M15	80,000±0,000 ^{f}	4,077±0,006 ^{o}	18,200±0,000^{a}	0,676±0,024^{k}
Palermo	M16	79,667±0,577^{ef}	3,543±0,006 ^{f}	18,533±0,577^{ab}	0,131±0,003 ^{a}
Campoalegre	M17	80,000±0,000 ^{f}	3,677±0,006 ^{j}	18,200±0,000^{a}	0,159±0,025 ^{ab}
Nátaga	M18	79,667±0,577^{ef}	3,600±0,000^{hi}	18,533±0,577^{ab}	0,460±0,011 ^{gh}
Tarqui	M19	79,333±0,577 ^{def}	3,593±0,006^{h}	18,866±0,577^{abc}	0,511±0,018 ^{i}
Timaná	M20	79,333±1,154 ^{def}	3,383±0,006 ^{b}	18,869±1,159^{abc}	0,461±0,011 ^{gh}
Gigante	M21	79,333±0,577 ^{def}	3,457±0,006 ^{d}	18,866±0,577^{abc}	0,274±0,005 ^{d}
Hobo	M22	80,000±0,000 ^{f}	2,783±0,028 ^{a}	18,200±0,000^{a}	1,023±0,044 ^{m}
Altamira	M23	77,667±0,577 ^{ab}	3,503±0,006 ^{e}	20,550±0,593^{ef}	0,574±0,015^{j}
Total		79,082±1,012	3,627±0,318	19,133±1,023	0,502±0,273

*El contenido de sólidos solubles se expresa en °Brix, la humedad es expresada en (%) y la conductividad eléctrica (Cond. E.) en mS cm^{-1}. Diferentes letras en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$).

Es importante mencionar que, se omitió información como la evaluación sensorial y algunos parámetros fisicoquímicos debido a las normas de presentación.

CONCLUSIÓN

Las muestras consideradas como adulteradas M5, M6, M7, M11, M16 y M23 presentaron valores fuera de los límites establecidos por la normativa del Codex Alimentario y la resolución 1057 de 2010 relacionadas con posibles adulteraciones por azúcares añadidas, prácticas inadecuadas de cosecha, postcosecha y manufactura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al semillero de Investigación +Agroalimentario Surcolombiano y al Centro Surcolombiano de Investigación en Café (CESURCAFÉ).

REFERENCIAS

AOAC (1990). Official Methods of Analysis (15th edition). Washington, DC: Association of Analytical Chemists.

Ashraf SA, Mahmood D, Elkhalifa AEO, et al (2023) Exposure to pesticide residues in honey and its potential cancer risk assessment. Food Chem Toxicol 180: 114014. https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.114014

Bose D, Padmavati M (2024) Honey Authentication: A review of the issues and challenges associated with honey adulteration. Food Biosci 61: 105004. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105004

Cabrera M, Santander E (2022) Physicochemical and sensory analysis of honeys from eastern Formosa province (Argentina) and its relationship with their botanical origin. Food Chem Adv 1: 100026. https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100026

Cárdenas-Escudero J, Galán-Madruga D, Cáceres JO (2023) Rapid, reliable and easy-to-perform chemometric-less method for rice syrup adulterated honey detection using FTIR-ATR. Talanta 253: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123961

Damto T, Zewdu A, Birhanu T (2024) Impact of Different Adulterants on Honey Quality Properties and Evaluating Different Analytical Approaches for Adulteration Detection. J Food Prot 87: 100241. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100241

Fakhlaei R, Babadi AA, Ariffin NM, Xiaobo Z (2025) Development of FTIR-ATR spectra and PLS regression combination model for discrimination of pure and adulterated acacia honey. Food Control 169: 110996. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110996

Fakhlaei R, Selamat J, Khatib A, et al (2020) The toxic impact of honey adulteration: A review. Foods 9: 1–21. https://doi.org/10.3390/foods9111538

FAO, WHO (2019) Codex Alimentarius international food standards/ Standards for Honey CXS 12-1981. 561:S2–S3.

Faúndez X, Báez ME, Martínez J, et al (2023) Evaluation of the generation of reactive oxygen species and antibacterial activity of honey as a function of its phenolic and mineral composition. Food Chem 426. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136561

Gün R, Karaoğlu MM (2024) Detection of honey adulteration by characterization of the physico-chemical properties of honey adulterated with the addition of glucose–fructose and maltose corn syrups. Eur Food Res Technol 250: 2255–2272. https://doi.org/10.1007/s00217-024-04535-7

ICA (2023) Guia para el manejo, preservación, protección y conservación de la apicultura y otros polinizadores.

Insha RAN, Islam MN, Gomasta J, et al (2024) Comprehensive honey authentication in Bangladesh: Profiling physicochemical and bioactive compounds to distinguish floral sources and detect adulteration. Heliyon 10: e40203. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40203

Majtan J, Bucekova M, Kafantaris I, et al (2021) Honey antibacterial activity: A neglected aspect of honey quality assurance as functional food. Trends Food Sci Technol 118: 870–886. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.012

Martínez Bencardino C (2012) Estadística y muestreo.

Minagricultura (2020) Cadena de las abejas y la apicultura. Primer trimestre, 2020.

Novais LMR de, Santos M de FC, Marques ACQ, et al (2025) Combining analytical techniques to detect honey adulteration in Brazil – A case study. J Food Compos Anal 144: 1–7. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107716

Olivero Verbel RE, Villa-Engm KV, Mendoza JJ, et al (2018) Evaluación de la miel de abejas (*Apis mellifera*) producida y comercializada en el departamento del Atlántico.

Ortega-Bonilla RA, Morales-Hormiga CH, Chito-Trujillo DM (2021) Evaluación de características fisicoquímicas, compuestos fenólicos, contenido de minerales y color de mieles comerciales del Cauca (Colombia). Cienc Tecnol Agropecu 22. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1894

Pacheco-López N, Ayora-Talavera T del R, García-Cruz N, et al (2017) Características fisicoquímicas , sensoriales y técnicas analíticas en la calidad de la miel. Centro de Investigación y Estudios Avanzados. Cent Investig y Asist en Tecnol y Diseño del Estado Jalisco AC 1: 67–96.

Sharma A, Pant K, Brar DS, et al (2023) A review on Api-products: current scenario of potential contaminants and their food safety concerns. Food Control 145: 109499. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109499

Sobrino-Gregorio L, Bataller R, Soto J, Escriche I (2018) Monitoring honey adulteration with sugar syrups using an automatic pulse voltammetric electronic tongue. Food Control 91: 254–260. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.04.003

Tosun M, Keles F (2021) Investigation methods for detecting honey samples adulterated with sucrose syrup. J Food Compos Anal 101: 103941. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103941

Zammit Young GW, Blundell R (2023) A review on the phytochemical composition and health applications of honey. Heliyon 9: e12507. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12507

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Valorización de la cáscara de maracuyá: Caracterización y uso en matrices alimentarias

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Valorization of passion fruit peel: Flour characterization and use in food matrices

Estefanía Jiménez Gómez[1]*, Juan Felipe Murillo Ramírez[1], Edith Marleny Cadena Chamorro[1] and Ana María Orozco Vargas[1]

RESUMEN

La cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis*), subproducto agroindustrial, constituye una fuente prometedora de compuestos funcionales y bioactivos. En el contexto de valorización de la cáscara, se realizaron modificaciones enzimáticas sobre la harina con celulasa, bromelina y la combinación celulasa/bromelina, se evaluaron las propiedades tecno funcionales, contenido de pectina, actividad antioxidante y desempeño como sustituto de pectina en la elaboración de mermeladas. En los resultados de la investigación, se destaca que la harina de la cáscara de maracuyá presenta mayor absorción de agua y poder de hinchamiento frente a la harina modificada enzimáticamente. El tratamiento celulasa/bromelina genera una mayor solubilidad, absorción de aceite y una reducción significativa del contenido de pectina. Con respecto a la inclusión de la harina en matrices de mermelada, la harina que no presenta modificación enzimática sustituye eficazmente la pectina comercial sin afectar color ni aceptación sensorial, e incluso aportó mayor viscosidad, lo que evidencia un buen potencial gelificante. Estos hallazgos demuestran que la harina de cáscara de maracuyá no requiere modificación enzimática y puede valorizarse como ingrediente funcional sostenible y como alternativa parcial a la pectina comercial.

Palabras clave:
Actividad antioxidante
Pectina
Pretratamiento enzimático
Propiedades funcionales

ABSTRACT

The peel of passion fruit (*Passiflora edulis*), an agro-industrial by-product, constitutes a promising source of functional and bioactive compounds. As part of its valorization, enzymatic modifications were applied to the peel flour using cellulase, bromelain, and a cellulase/bromelain combination. The techno-functional properties, pectin content, antioxidant activity, and performance as a pectin substitute in jam formulations were systematically evaluated. The results highlighted that passion fruit peel flour exhibited higher water absorption and swelling power compared to the enzymatically modified flour. The combined cellulase/bromelain treatment significantly enhanced solubility and oil absorption capacity while markedly reducing pectin content. In jam matrices, the unmodified flour effectively replaced commercial pectin without adversely affecting color or sensory acceptance. Additionally, it conferred higher viscosity to the final product, indicating notable gelling potential. These findings suggest that enzymatic modification is not essential for the functional application of passion fruit peel flour. The native flour can be effectively valorized as a sustainable functional ingredient and presents itself as a viable partial alternative to commercial pectin.

Keywords:
Antioxidant activity
Pectin
Enzymatic pretreatment
Functional properties

[1]Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agrarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Medellín, Colombia. esjimenezg@unal.edu.co https://orcid.org/0009-0002-9754-9800; jumurillor@unal.edu.co https://orcid.org/0009-0002-8575-4129, emcadenac@unal.edu.co https://orcid.org/0000-0002-7143-2009, aorozcov@unal.edu.co https://orcid.org/0009-0001-8242-6528
*Corresponding autor: esjimenezg@unal.edu.co

ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

Los residuos agroindustriales, ricos en carbohidratos, proteínas y compuestos bioactivos, representan materias primas valiosas que, en el marco de la economía circular, pueden transformarse en ingredientes funcionales sostenibles (Scheibenzuber et al. 2025). En países tropicales como Colombia, la agroindustria de frutas genera grandes volúmenes de residuos, entre los cuales se destaca la cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis*). Este subproducto puede representar hasta el 50–60% del peso de la fruta, lo que dificulta su aprovechamiento y conservación por su alto contenido de agua (Liu et al. 2025). Sin embargo, posee entre 15% y 20% de pectina, más del 60% de fibra dietética, compuestos fenólicos y una capacidad antioxidante superior a 1500 µmol TE 100 g^{-1}, atributos que lo convierten en materia prima de interés para las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética (Muñoz et al. 2023).

La pectina, polisacárido estructural abundante en frutas y vegetales, es empleada como gelificante, estabilizador y espesante en alimentos. Sus principales fuentes comerciales son la cáscara de cítricos y la pulpa de manzana, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas locales más económicas como la cáscara de maracuyá. Entre las metodologías propuestas, la extracción asistida por enzimas ha mostrado ventajas sobre procesos químicos, favoreciendo la liberación de pectina y otros compuestos bioactivos (Xiang et al. 2024). En maracuyá, enzimas como celulasas y proteasas incrementan la disponibilidad de pectina, azúcares solubles y polifenoles (Urango-Anaya et al. 2018), aunque su escalamiento enfrenta limitaciones de costo y rendimiento. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la harina de cáscara de maracuyá nativa e incluir modificación enzimática para analizar su efecto sobre el contenido de pectina, actividad antioxidante y propiedades funcionales para su aplicación en matrices alimentarias como la mermelada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

La cáscara de maracuyá fue recolectada del proceso de elaboración de mermelada del emprendimiento Picaflor (Medellín, Colombia). El material se troceó en fragmentos de 4×4 cm y se almacenó en congelación durante 10 días. Posteriormente, se secó a 55 °C y una velocidad de flujo de 1 m/s hasta alcanzar peso constante. Las cáscaras secas se molieron y tamizaron (malla #30 - <600 µm), obteniéndose la harina control o sin tratamiento enzimático (M0).

Tratamientos enzimáticos

Sobre la harina de cáscara de maracuyá, se realizaron tres tratamientos enzimáticos M1, M2, M3. La harina se mezcló con agua destilada en proporción 1:12, se ajustó el pH a 5 y se adiciono Cellic® con una dosis de 20 U mg^{-1}, a 50 °C durante 18 h bajo agitación constante (M1). En un segundo tratamiento (M2), la mezcla se ajustó a pH 6 y se incorporó Bromelina al 1% p/p, manteniendo las mismas condiciones de temperatura y agitación durante 4 h. El tratamiento combinado (M3: Cellic® - Bromelina), la harina se sometió consecutivamente a M1 y M2 bajo las condiciones previamente descritas. Finalmente, todas las muestras se secaron a 55 °C, se molieron y tamizaron (malla #30 - <600 µm).

Evaluación fisicoquímica y tecno funcional de la harina

El contenido de humedad se determinó con una balanza OHAUS MB45. El índice de solubilidad en agua (WSI), el índice de absorción de agua (WAI), el poder de hinchamiento (SP) y la absorción de aceite (IAA) se evaluaron con metodología de Anderson et al. (1969). El pH se registró con un potenciómetro HANNA Edge en una suspensión harina:agua (1:9). El color se determinó con un espectrocolorímetro de esfera (SP60, X-Rite, EE. UU.), expresado en coordenadas CIELab y cálculo de croma (C*). Se extrajo pectina por el método de hidrólisis ácida. Finalmente, los polifenoles totales se cuantificaron por Folin–Ciocalteu, expresándose como equivalentes de ácido gálico (GAE), y la actividad antioxidante se midió con ABTS (µmol TE 100 g^{-1} de muestra).

Evaluación de la harina en una matriz alimentaria

La funcionalidad de la harina de cáscara de maracuyá se evalúo como sustituto de pectina en la formulación de mermelada. El tratamiento control (mermelada P1) sé preparó con 3 g de pectina comercial por cada 620 g de pulpa y 520 g de azúcar. El segundo tratamiento (mermelada M0) sustituyó la pectina por 6 g de harina de cáscara de maracuyá en la misma proporción de pulpa y azúcar. Las mezclas se sometieron a proceso térmico hasta alcanzar 65° Brix y posteriormente se envasaron en frascos de 250 mL. Las mermeladas obtenidas se analizaron en términos de coordenadas CIELab y croma;

viscosidad con viscosímetro Brookfield (modelo DV-III Ultra, husillo RV6) a 120 rpm; análisis sensorial (olor, sabor, textura, color y aceptación general) con prueba hedónica de 7 puntos con 26 panelistas no entrenados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades tecno funcionales y físico químicas de la harina

El tratamiento combinado Cellic®-Bromelina (M3) aumentó significativamente el índice de solubilidad en agua (Tabla 1), posiblemente como consecuencia de una mayor degradación estructural asociada a una ruptura de enlaces en polisacáridos y/o proteínas; el resultado coincide con un menor índice de absorción de agua y mayor absorción de aceite efecto asociado a una mayor presencia de grupos hidrofóbicos por posible desnaturalización de proteínas. El tratamiento con Bromelina (M2) también incrementó la capacidad de absorción de agua con respecto al control (M0), se evidencia una acción más marcada de la enzima proteolítica si se contrasta con el efecto de Cellic® (M1). Con respecto al poder de hinchamiento (SP), los tratamientos enzimáticos disminuyen ligeramente, el control reporta el valor más alto y se explica por la integridad estructural de la fibra y polisacáridos de la cáscara, capaces de retener mayor cantidad de agua al no haber sido hidrolizado por enzimas.

Tabla 1. Características tecno funcionales.

Harina	Agua			Aceite
	WSI (% bh)	WAI (g H_2O g^{-1}*)	SP (g gel g^{-1}*)	IAA (g Aceite g^{-1}*)
M0	27,22 ± 0,59	8,18±1,02	12,61±1,31	1,78±0,08
M1	22,94±0,04	7,91±0,25	11,56±0,32	1,53±0,09
M2	34,67±1,45	5,47±0,14	9,91±0,33	1,48±0,04
M3	55,85±0,43	3,03±0,15	9,13±0,25	2,04±0,61

M0: Harina sin tratamiento enzimático; M1: Harina con Cellic®; M2: Harina con Bromelina; M3: Harina con Cellic® - Bromelina. WSI: Índice de solubilidad en agua; WAI: Índice de absorción de agua; SP: Poder de hinchamiento; IAA: Índice de absorción de aceite. g*: gramo de muestra en base húmeda.

Con Respecto al contenido de polifenoles totales (Tabla 2), los tratamientos enzimáticos generan una reducción de polifenoles. No obstante, la capacidad antioxidante no se ve alterada con respecto al control, estos hallazgos concuerdan con otras matrices vegetales en los que, a pesar de una reducción en polifenoles ligados a la fibra, la actividad antioxidante se mantuvo estable gracias a la liberación de metabolitos secundarios (Puc-Santamaría et al. 2025).

Tabla 2. Polifenoles totales y actividad antioxidante (ABTS).

Harina	Polifenoles totales		Actividad Antioxidante (ABTS)	
	mg GAE L^{-1} extracto	mg GAE 100 g^{-1} muestra bs	% Inhibición	µmol TE 100 g^{-1} muestra bs
M0	169,9±7,3	72,7±3,1	17,1±1,6	134,2±18,6
M1	90,8±3,9	40,1±1,7	15,1±0,9	113,4±10,4
M2	61,6±5,1	27±6,6	15,2±3,1	113,8±37,9
M3	52,9±16,6	23,6±7,4	13,5±2	94,7±25

La cuantificación de pectina evidenció que la harina sin tratamiento (M0) conservó el mayor contenido (89,84±8,68%). En contraste, los tratamientos enzimáticos redujeron de forma marcada la cantidad disponible, lo que confirma la acción de las enzimas sobre la pared celular. El tratamiento combinado (M3) presentó valor de pectina de 16,55±0,14%, seguido por el tratamiento con bromelina M2 (28,94±3,73%), y celulasa M1 (34,21±1,31%). Estos resultados sugieren que la hidrólisis enzimática también degrada parcialmente la pectina estructural, lo que limita su recuperación directa en la harina.

Con respecto a la caracterización física de la harina, los tratamientos enzimáticos modificaron levemente el color. La harina control (M0) presentó mayor luminosidad (L* 45,38±0,93). Los valores de a* y b* aumentaron con los tratamientos enzimáticos, indicando una mayor intensidad de tonos rojizos y amarillos. El mayor croma (C*) en M3 (22,16 ±0,2) sugiere colores más saturados, posiblemente por liberación de pigmentos o reacciones de oxidación y Maillard durante el procesamiento (17,31±0,17). En relación con la humedad, la harina control (M0) presentó la menor humedad (6,54%), mientras que la harina con tratamiento combinado (M3) alcanzó el valor más alto (10,50%), lo que podría atribuirse a diferencias en los tiempos de secado. En el pH, se observaron incrementos en las harinas tratadas, desde 4,70 en M1 hasta 6,22 en M3, en comparación con el valor inicial de 4,25 en M0. Estos cambios responden principalmente a los ajustes necesarios para optimizar la actividad enzimática durante el tratamiento.

Evaluación de la harina en matrices alimentarias

Teniendo en cuenta la caracterización global de la harina y el porcentaje de pectina, se seleccionó la harina control (M0) para su evaluación como sustituto de pectina comercial en la elaboración de mermeladas. Al comparar los parámetros de color de la matriz alimenticia, no se observaron diferencias significativas entre la mermelada elaborada con harina M0 y la formulada con pectina comercial (P1). Los valores de L*, a*, b* y C* fueron similares (L*: 19,12 en M0 vs. 20,53 en P1), lo que indica que la sustitución no afectó perceptiblemente el color del producto final. En términos de viscosidad, la mermelada con harina alcanzó un valor considerablemente más alto (4610±500 cP) que la formulada con pectina comercial (2417±32 cP), lo que evidencia un mayor poder gelificante de la harina. Finalmente, el análisis sensorial mostró una aceptación equivalente entre ambas formulaciones, lo que confirma la viabilidad de la harina de cáscara de maracuyá como sustituto de la pectina comercial en matrices alimentarias como las mermeladas (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis Sensorial hedónico.

Harina	Aceptación	Cualidades			
		Color	Olor	Textura	Sabor
P1	147	163	153	136	157
M0	150	172	167	133	154

Los valores reportados son la sumatoria de puntajes después del análisis.

CONCLUSIÓN

La harina de cáscara de maracuyá se consolida como una alternativa viable para la valorización de subproductos agroindustriales, gracias a sus propiedades tecno funcionales y bioactivas. La harina nativa presentó un alto contenido de pectina, así como alta capacidad de absorción de agua y poder de hinchamiento, mientras que los tratamientos enzimáticos redujeron la pectina y modificaron las propiedades de solubilidad y absorción de aceite, destacándose el efecto combinado de celulasa y bromelina. Aunque los tratamientos enzimáticos disminuyeron el contenido de polifenoles, la actividad antioxidante se mantuvo estable, lo que indica la participación de otros compuestos en esta funcionalidad. En aplicaciones prácticas, la sustitución parcial de pectina comercial por harina de cáscara de maracuyá en mermeladas fue efectiva, manteniendo la aceptación sensorial y mejorando la viscosidad del producto.

REFERENCIAS

Anderson RA, Conway VF, Pfeifer VF & Griffin EL (1969) Gelatinization of corn grits by roll- and extrusion-cooking. Cereal Science Today 14: 4–12.

Liu Z, Wang X, Li Q, Kang X, Y Li, Gong C, Liu Y & Chen H (2025). Physiological functions of the by-products of passion fruit: Processing, characteristics and their applications in food product development. Foods 14(9): 1–20. https://doiorg/103390/foods14091643

Muñoz Murillo A, Rodríguez L, González M & Pérez J (2023) Chemical composition, dietary fiber, phenolic content and antioxidant activity of passion fruit (*Passiflora edulis*) peel. Journal of Food Composition and Analysis 115: 105–118. https://doiorg/101016/jjfca2023105118

Puc-Santamaría CG, Us-Camas R, Hernández-Núñez E, Can-Herrera LA, Dzib-Cauich DA, Cabal-Prieto A, Pensupa N & Oney-Montalvo JE (2025). Ultrasonic-assisted enzymatic extraction: An innovative technique for the obtention of betalains and polyphenols

from dragon fruit peel. Processes 13(7): 2307. https://doiorg/103390/pr13072307

Scheibenzuber S, Pucci E, Presenti O, Serafini G, Nobili C, Duta DE, et al (2025) Consumers acceptance of new food ingredients .from the food industry's by-products – a focus group study. Frontiers in Nutrition 12: 1509833. https://doiorg/103389/fnut20251509833

Urango-Anaya L, Hernández C, Rueda J & Flórez M (2018) Enzymatic treatments on passion fruit peel: Effects on phenolic release and pectin availability. Journal of Agricultural and Food Chemistry 66(11): 2831–2838. https://doiorg/101021/acsjafc7b05460

Xiang H, Yang R, Li L & Lin H (2024) Extraction of pectin from agro-industrial wastes: A review of emerging techniques and applications. Journal of Food Science 89(6): 2152–2167. https://doiorg/101111/1750-384117438

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Efecto de hidrocoloides sobre las propiedades físicas, sensoriales y físico químicas del chutney de mango (*Manguifera indica*)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Effect of hydrocolloids on the physical, sensory, and physical chemical properties of mango chutney (*Manguifera indica*)

Martín Manuel Gallego Pérez[1], Carlos Julio Márquez Cardozo[1] and Héctor José Ciro Velásquez[1]

Palabras clave:
Alimentos funcionales
Chutney
Hidrocoloides
Salsa de frutas

RESUMEN

Se evaluó el impacto de la aplicación de hidrocoloides en las propiedades físicas, sensoriales, fisicoquímicas y funcionales de un chutney de mango (*Manguifera indica*). Se emplearon tres hidrocoloides: pectina, goma xantana, almidón y una mezcla de los tres hidrocoloides en proporción 1:1:1, las concentraciones usadas fueron de 0,1%, 0,5% y 1%, una salsa sin hidrocoloides fue usada como control. Las propiedades reológicas (viscosidad, densidad aparente, extensibilidad), fisicoquímicas (pH, acidez titulable, sólidos solubles y color) y funcionales (capacidad antioxidante, contenido de fenoles totales y betacarotenos), se evaluaron durante un periodo de almacenamiento de siete semanas. La mezcla de hidrocoloides al 1%, denominada “mix al 1%”, se destacó por sus propiedades óptimas en términos reológicos y funcionales. Los análisis funcionales demostraron que la salsa “mix al 1%” presentó altos niveles de capacidad antioxidante, fenoles totales y betacarotenos, destacándose como un alimento funcional con potencial beneficioso para la salud de los consumidores.

Keywords:
Functional foods
Chutney
Hydrocolloids
Fruit sauce

ABSTRACT

The impact of hydrocolloid application on the physical, sensory, physicochemical, and functional properties of mango chutney (Mangifera indica) was evaluated. Three hydrocolloids were used: pectin, xanthan gum, starch, and a mixture of the three hydrocolloids in a 1:1:1 ratio. The concentrations used were 0.1%, 0.5%, and 1%. A sauce without hydrocolloids was used as a control. The rheological (viscosity, bulk density, extensibility), physicochemical (pH, titratable acidity, soluble solids, and color), and functional (antioxidant capacity, total phenol content, and beta-carotene content) properties were evaluated during a seven-week storage period. The 1% hydrocolloid mixture, called the “1% mix,” stood out for its optimal rheological and functional properties. Functional analyses showed that the “1% mix” sauce had high levels of antioxidant capacity, total phenols, and beta-carotene, standing out as a unctional food with potential health benefits for consumers.

[1]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mgallegop@unal.edu.co https://orcid.org/0009-0004-3155-4097; cjmarque@unal.edu.co. https://orcid.org/0000-0002-0106-6875; hjciro@unal.edu.co https://orcid.org/0000-0002-4398-0470

CC BY NC SA

El mango representa una fuente alimentaria estratégica, no solo por su perfil nutricional rico en vitaminas A y C, potasio y fibra, sino por su contenido en compuestos bioactivos con efectos fisiológicos comprobados, como carotenoides y polifenoles, asociados a propiedades antiinflamatorias y protectoras frente a enfermedades crónicas. Su aplicación en la industria va más allá del sabor: permite el diseño de alimentos funcionales que combinan palatabilidad con beneficios para la salud cardiovascular, digestiva e inmunológica. En formulaciones como salsas gourmet, el mango aporta un equilibrio sensorial único entre dulce y ácido, potenciado incluso mediante la fermentación (Saputra akinatul Qalbi & Kurniawan 2024). Su pectina, un hidrocoloide natural, cumple funciones tecnológicas como espesante y estabilizador, además de efectos metabólicos benéficos como fibra soluble, como la modulación del colesterol LDL (Wongkaew 2021). Importante destacar que más del 50% del fruto procesado se convierte en residuos, los cuales albergan alto potencial para la extracción de pectina, antioxidantes y fibra, favoreciendo modelos de economía circular (Veeranjaneya Reddy 2021). Los hidrocoloides, en general, son clave para optimizar propiedades reológicas y sensoriales en productos como mermeladas, aderezos y bebidas, impactando directamente en la aceptación del consumidor (Ospina Casas 2016). Este estudio tuvo como objetivo desarrollar un chutney de mango, evaluando el efecto de distintos hidrocoloides sobre sus atributos fisicoquímicos, reológicos y sensoriales. Se identificó la formulación óptima y se caracterizó microbiológica y funcionalmente, validando su estabilidad y valor agregado. El trabajo aporta evidencia aplicada para la industria, promoviendo innovación basada en ingredientes naturales y subproductos subutilizados. Se posiciona al mango como eje de desarrollo de alimentos saludables, tecnológicamente estables y ambientalmente responsables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales y materia prima

Se emplearon frutas y hortalizas frescas (mango variedad Tommy Atkins, cebolla, pimentón, ajo y jengibre), adquiridas en la Central Mayorista de Antioquia (Medellín, Colombia). Las especias se obtuvieron en Frutos & Semillas (Medellín), mientras que insumos como sal (Refisal, Cajicá-Zipaquirá) y azúcar (Ingenio Mayagüez) se adquirieron en establecimientos comerciales locales. Para envasado y evaluación sensorial, se utilizaron frascos de vidrio grado alimentario (250 mL, ref. EA3368BM; 35 mL, ref. EA4008BM), provistos por Discordoba (Medellín). El resto de materiales y equipos fueron suministrados por el Laboratorio de Frutas y Hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

La pulpa de mango Tommy se obtuvo mediante dos etapas: operaciones previas para la selección por madurez, lavado, desinfección con NaClO (100 ppm, 3 min) y secado, despulpado (Barcia Loor 2014) y (Cevallos Fernández 2016).

Despulpado. Los frutos fueron pelados manualmente y se licuaron (Oster®, 1750 rpm, 5 min). La pulpa obtenida se envasó en bolsas de polietileno de baja densidad (250 g) y conservó a 5 °C hasta su uso experimental. Adaptado de Barcia Loor (2014).

Formulación de la salsa de mango tipo chutney

Se estableció una matriz constante de 68% de pulpa de mango. Las especias (cebolla 2%, pimentón 1%, ajo 0,9%, canela, comino, cardamomo, jengibre y clavos 0,05% c/u) se deshidrataron por convección forzada (60 °C hasta 5% hb), molieron y añadieron como polvo fino. El contenido de sólidos solubles se ajustó a 25 °Brix mediante balance de masa; se incorporaron NaCl 1%, ácido acético 0,3% y agua. Los hidrocoloides (pectina, goma xantana, almidón y mezcla 1:1:1) se evaluaron en concentraciones de 0,1%, 0,5% y 1,0% (diseño factorial: 4 tratamientos × 3 niveles × 3 repeticiones),

Diseño experimental

Se aplicó un diseño factorial en bloques completamente al azar, metodología estadística que permite evaluar simultáneamente múltiples factores e interacciones, mientras controla una fuente conocida de variabilidad extrínseca. Su objetivo es aislar con precisión los efectos principales e interactivos de las variables estudiadas, minimizando la interferencia de factores de confusión no relevantes para el modelo.

Elaboracion del chutney

Para el procesamiento del chutney, se tuvo como base los cálculos de balances de masa, ingredientes se incorporaron secuencialmente: pulpa y especias, mitad del azúcar, y luego azúcar premezclada con hidrocoloide; agua se añadió al final. El producto se envasó en frascos

de vidrio (250 y 35 mL), previamente desinfectados (NaClO 100 ppm), agotados en túnel y sellados. Esterilización: 15 min a 121 °C en autoclave; despresurización controlada para preservar atributos organolépticos. Las muestras se almacenaron tras 12 h de enfriamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se aplicó un diseño factorial de dos vías con bloqueo para evaluar el impacto del tipo de hidrocoloide y su concentración en la viscosidad de las soluciones, controlando la variabilidad atribuible al día de medición. Los factores evaluados fueron: tipo de hidrocoloide (cuatro niveles: almidón, pectina, goma xantana y mezcla) y concentración tres niveles: Con1 (0,1), Con2 (0,5), Con3 (1). El día de medición (DO, D3, D7) se trató como bloque, con el fin de aislar su efecto sobre la respuesta.

Los resultados del ANOVA (Tabla 1) confirman que tanto el tipo de hidrocoloide (F=2790,0, P<0,001) como la concentración (F=7001,6, P<0,001) ejercen un efecto altamente significativo sobre la viscosidad. También se observó un efecto significativo, aunque menor en magnitud, del día de medición (F=5,9, P=0,009), lo cual valida su inclusión como factor de control. Particularmente relevante fue la interacción hidrocoloide × concentración (F=868,8, P<0,001), que indica que el efecto de la concentración sobre la viscosidad varía según el tipo de hidrocoloide utilizado, es decir, no existe un comportamiento uniforme.

Tabla 1. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de dos vías con bloqueo.

Fuente de Variación	Gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	P-valor
Hidrocoloide	3	33.967.393	11322464	2790,02	< 2e-16***
Concentración	2	56.827.41	28.413.70	7001,56	< 2e-16***
Día	2	47.815	23.907	5,891	0.00893**
Hidrocoloide×Concentración	6	21.154.60	3.525.767	868,802	< 2e-16***
Residuales	22	89280	4058		

Selección del mejor tratamiento con base en la viscosidad de las salsas

A partir de los resultados anteriores, se avanzó a una fase de selección práctica: se midió la viscosidad de una salsa comercial de consumo masivo y se utilizó como estándar de referencia. Sobre 36 formulaciones experimentales (excluyendo el control), se calcularon las diferencias absolutas frente a este referente en los días 0, 3 y 7. El criterio de selección priorizó aquellas combinaciones de hidrocoloide y concentración cuyo perfil viscoso en magnitud y estabilidad temporal mostró mayor proximidad al producto comercial. Este enfoque permitió identificar objetivamente las cuatro formulaciones más prometedoras para replicar el comportamiento reológico deseado en condiciones reales de uso, la Tabla 2 presenta las diferencias absolutas con respecto a la salsa comercial.

Tabla 2. Análisis de diferencias absolutas en viscosidad respecto al referente comercial.

Muestra	Hidrocoloide	Concentraciónn	Día	Viscosidad	Diferencia
1	Almidón	Con3	D0	2856	544
2	Almidón	Con3	D3	2750	650
3	Almidón	Con3	D7	2750	650
4	Pectina	Con3	D0	4450	1050
5	Pectina	Con3	D3	4267.	867.
6	Pectina	Con3	D7	4266	866
7	Gom_xan	Con2	D0	3808	408
8	Gom_xan	Con2	D3	3746	346
9	Gom_xan	Con2	D7	3746	346
10	Mix	Con3	D0	3395	5
11	Mix	Con3	D3	3396	4
12	Mix	Con3	D7	3410	10

A partir de la Tabla 2, se aplicó ANOVA (α=0,05) sobre las diferencias absolutas de viscosidad respecto al referente comercial, seguido de prueba post hoc Tukey HSD. Se identificó el tratamiento con comportamiento estadísticamente indistinguible del estándar en D0, D3 y D7, seleccionándose como óptimo aquel con menor desviación media y estabilidad temporal confirmada, El hidrocoloide Mix al 1% fue el único tratamiento estadísticamente indistinguible del referente comercial, con una diferencia media de solo 0,33 unidades de viscosidad. Mostró estabilidad durante el tiempo de evaluacion (D0, D3 y D7), superando claramente la goma xantana (366.67 u, *P*<0,01) y la pectina (9,276 u, *P*<0,001). La Mix se confirmó como la formulación óptima para replicar el comportamiento reológico del estándar comercial.

Análisis de las propiedades funcionales

La formulación de chutney de mango estabilizada con hidrocoloide Mix al 1% demostró un perfil funcional destacado, respaldado por análisis en sextuplicado. Presentó un contenido promedio de 2324,5 mg GAE 100 g^{-1} de base seca en fenoles totales, indicando una alta capacidad fenólica asociada a propiedades antioxidantes y bioactivas, consistentes con lo reportado en matrices frutales procesadas donde los compuestos fenólicos actúan como principales agentes funcionales (Shahidi and Ambigaipalan 2015).

Aunque la inhibición del radical DPPH varió entre 4,2% y 21,8%, el valor promedio refleja un aporte antioxidante moderado, coherente con sistemas complejos como salsas a base de fruta. Adicionalmente, el producto mostró un contenido promedio de β-caroteno de 4,44 mg 100 g^{-1} (base seca), lo que sugiere un potencial significativo como fuente dietética de provitamina A, cuya estabilidad y relevancia nutricional en alimentos procesados ha sido ampliamente documentada (Mercadante and Rodriguez-Amaya 2021). Estos resultados posicionan al chutney no solo como un producto con textura optimizada (gracias al Mix), sino también como un alimento funcional con aporte antioxidante y nutricional relevante, ideal para aplicaciones en alimentación saludable.

CONCLUSIÓN

La formulación de chutney de mango con Mix 1% mostró equivalencia reológica con el estándar comercial, garantizando estabilidad y aceptabilidad sensorial.

La salsa preservó un perfil bioactivo a partir de 2324,5 mg GAE 100 g^{-1} de fenoles totales, buena actividad antioxidante, y 4,44 mg 100 g^{-1} de β-caroteno (potencial provitamínico A).

El hidrocoloide Mix no comprometió los compuestos funcionales del mango y actuó como estabilizante compatible con la matriz bioactiva, la formulación fue tecnológicamente viable y funcionalmente aceptable.

REFERENCIAS

Veeranjaneya RL (13 de Febrero de 2021). Nutritional composition and bioactive compounds in three different parts of mango fruit. International journal of Environmental Research and Public Health 18(2): 741. doi:https://doi.org/10.3390/ijerph18020741

Barcia LC (2014) Efecto de la deshidratación sobre la capacidad antioxidante y contenido de polifenoles de la pulpa concentrada de tomate de árbol morado (*Solanum betaceum*). Obtenido de Universidad Tecnologica Equinoccial. Facultad: Ciencias de la Ingeniería: https://hdl.handle.net/20.500.13066/5126

Cevallos Fernández E (2016) Estudio de la incorporación de pulpa de penca de nopal *(Opuntia ficus indica)* en la elaboración de mermelada de mora de castilla *(Rubus glaucus)*. Obtenido de Ciencias de La Ingeniería e Industrias Facultad: Ingeniería de Alimentos: https://hdl.handle.net/20.500.13066/14345

Ospina Casas K (2016) Estudio de la interacción de hidrocoloides empleados en alimentos y su efecto en las propiedades reológicas y de textura sensorial e instrumental. Obtenido de Repositorio Institucional UNAL: https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/560562da-b29e-4a31-8d74-2a64001b0947/content

Saputra T, akinatul Qalbi N, & Kurniawan S (13 de Septiembre de 2024) Development and sensory evaluation of mango fruit- based dipping sauce. Journal of Toque and Apron (JOTA), 1(1). Obtenido de https://journal.poltekparmakassar.ac.id/index.php/JOTA/index

Wongkaew ME (Noviembre11 de 2021) Mango peel pectin: Recovery, functionality and sustainable uses. Polymers, 13(22). doi: doi:https://doi.org/10.3390/polym13223898

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Obtención y caracterización de almidón de semillas de mango (*Mangifera indica*) y mamón (*Melicoccus bijugatus*) para el desarrollo de películas biodegradables

Extraction and characterization of starch from mango (*Mangifera indica*) and mamón (*Melicoccus bijugatus*) seeds for the development of biodegradable films

Hilary Paola Monsalve Millan[1] , Yulieth Paola Mendivil Palencia[2], Jairo Guadalupe Salcedo Mendoza[3] and Alfredo Carlos Fernández Quintero[4]

RESUMEN

Palabras clave:
Almidón
Biopelículas biodegradables
Empaques
Semillas de frutas
Sostenibilidad

El aprovechamiento de semillas de mango y mamón como fuente de almidón representa una alternativa sostenible frente a polímeros sintéticos. En este estudio se obtuvo y caracterizó almidón nativo de ambas semillas con el propósito de evaluar su potencial en la elaboración de películas biodegradables. El almidón se extrajo por vía húmeda con modificaciones a métodos reportados y se analizó en sus propiedades fisicoquímicas, funcionales, estructurales y de empastamiento. Los resultados mostraron alto contenido de amilosa, adecuada capacidad de absorción de agua y solubilidad, además de comportamientos de viscosidad y estabilidad térmica comparables a otras fuentes convencionales. Las biopelículas obtenidas por casting presentaron espesores en rangos aceptables, con variaciones en translucidez y color que sugieren optimización. En conclusión, estas semillas constituyen una fuente promisoria de almidón para la producción de empaques biodegradables sostenibles.

ABSTRACT

Keywords:
Starch
Biodegradable films
Biodegradable packaging
Fruit seeds
Sustainability

The use of mango and mamón seeds as a starch source represents a sustainable alternative to synthetic polymers. In this study, native starch from both seeds was obtained and characterized to evaluate its potential for biodegradable film production. Starch was extracted by a wet method with modifications to reported protocols and analyzed for its physicochemical, functional, structural, and pasting properties. Results showed a high amylose content, suitable water absorption and solubility, as well as viscosity and thermal stability behaviors comparable to conventional sources. Biodegradable films obtained by casting presented thicknesses within acceptable ranges, with variations in translucency and color that suggest the need for optimization. In conclusion, these seeds are a promising starch source for the development of sustainable biodegradable packaging.

[1]Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8663-338X
[2]Programa de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8198-2757
[3]líder del Grupo de Investigación PADES, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9901-9793
[4]Profesor de planta, Universidad de Sucre, Sincelejo Colombia
*Corresponding author: hilary.monsalve@unisucrevirtual.edu.co

CC BY NC SA

El incremento en la producción y consumo de plásticos sintéticos genera graves problemas ambientales, lo que ha impulsado la búsqueda de materiales alternativos (FAO 2023). El almidón es un biopolímero natural abundante, renovable y biodegradable, con amplia aplicación en la elaboración de empaques sostenibles (Bangar et al. 2022; Kumar et al. 2020). Las semillas de frutas tropicales, como mango (*Mangifera indica*) y mamón (*Melicoccus bijugatus*), representan una fuente no convencional de almidón, usualmente desechada como subproducto agroindustrial. Estudios recientes destacan su potencial por el alto contenido de almidón y compuestos bioactivos, que favorecen el desarrollo de biopelículas con propiedades funcionales adecuadas (Jurado-Erazo et al. 2023). El objetivo de este trabajo fue obtener y caracterizar el almidón nativo de semillas de mango y mamón, evaluando sus propiedades tecnofuncionales y su aplicación en la elaboración de películas biodegradables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención del Almidón

El almidón se extrajo por vía húmeda con modificaciones aplicados al método de Monguí y Quintero (2021).

Caracterización del almidón

Tabla 1. Caracterización de almidones.

Propiedades / Características	Caracterización	Referencia
Estructurales	Contenido aparente de amilosa (CA)	(Li et al. 2017)
Morfológicas	Microscopia de campo claro y luz polarizada	(Figueroa-Flórez 2020)
Fisicoquímicas	Capacidad de Absorción de agua (CAA) Índice de solubilidad en agua (ISA) Poder de hinchamiento (PS)	(Salcedo-Mendoza et al. 2024)
De empastamiento	Perfiles de empastamiento	(Seña-Rambauth et al. 2024)

Elaboración y caracterización de películas a partir de los materiales amiláceos

Las películas biodegradables se elaboraron por el método de casting a partir de suspensiones de almidón (4% p/v) y glicerol (1,35 g), tratadas por ultrasonido a 80 °C durante 5 min y secadas a 35 °C por 20 h, con posterior almacenamiento en desecador, siguiendo el método descrito por Suárez-Castillo (2023) con ligeras modificaciones. El espesor de las películas se determinó con un micrómetro digital (±0,1 mm) a partir de 10 lecturas aleatorias, reportando el promedio ± desviación estándar. La translucidez se evaluó cualitativamente mediante observación visual, de acuerdo con la norma ASTM D1003 (2021) y los lineamientos de la ISO 6658 (2017). El color se midió en el espacio CIE 2000 L*a*b* con un espectro-colorímetro de esfera, realizando cinco lecturas al azar por muestra según el método 14-22 de la AACC (2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del almidón

Propiedades fisicoquímicas

Tabla 2. Resultados del análisis de las propiedades funcionales de los almidones.

Muestra	Humedad (%)	CAA (%)	ISA (%)	PS (%)
AMg	10,94	100,64±0,06	0,42±0,02 $^{a\ 60°C}$	2,09±0,01
AMm	10,95	74,89±0,82	0,28±0,02 $^{a\ 70°C}$	2,1±0,01

Todas las observaciones son valores evaluados por triplicados y se expresan como media aritmética±desviación estándar; AMg, Almidón de mango; AMm, Almidón de mamón, CAA, Capacidad de absorción de agua; ISA, Índice de solubilidad en agua, PS, Poder de Hinchamiento.

La solubilidad del almidón de mango fue similar a la reportada por Hassan Musa and Sagagi (2023), mientras que la de mamón, se aproximó a lo descrito por Moo-Huchin et al. (2020). El poder de hinchamiento de mango y mamón, coincidieron con lo reportado por De Dios-Avila et al. (2024). Estos parámetros, relacionados con absorción y disolución de agua, dependen del tamaño de gránulo, contenido de amilosa, estructura de amilopectina, cristalinidad y presencia de proteínas y lípidos (Fan et al. 2016).

Contenido de amilosa

Tabla 3. Porcentaje de amilosa de cada tipo de almidón.

Muestra	Contenido de Amilosa (%)
AMg	39,753±0,9
AMm	45,748±0,5

Todas las observaciones son valores evaluados por triplicados y se expresan como media aritmética±desviación estándar; AMg, AMg, Almidón de mango; AMm, Almidón de mamón.

El contenido de amilosa para estos almidones presentó valores por encima del 35%, valor superior a los promedios presentes en almidones de otras fuentes como el almidón de patata (21%) y maíz (28%) (Ai and Jane 2018). De acuerdo con Martins et al. (2022) este resultado es relevante porque cuanto mayor sea el contenido de amilosa, mejores serán las condiciones para la formación de películas y recubrimientos.

Propiedades de empastamiento

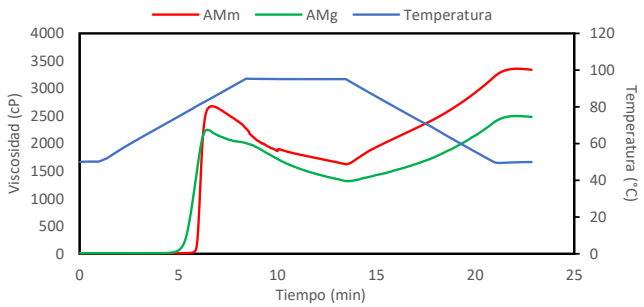


Figura 1. Perfiles de viscosidad de los almidones nativos. AMg, Almidón de mango; AMm, Almidón de mamón.

Tabla 4. Comportamiento de las viscosidades de empastamiento de almidones nativos.

Muestra	Propiedades de empastamiento					
	A	B	C	D	E	F
AMg	75,56±0,21	2247±2,52	1325±2,0	2485±1,0	922±4,04	1160±3,0
AMm	80,41±0,20	2673±3,46	1630±3,45	3339±1,73	1043±6,66	1709±2,0

Los valores se expresan como media aritmética±desviación estándar; AMg, Almidón de mango; AMm, Almidón de mamón; A, Temperatura inicial de empastamiento (°C); B, Viscosidad máxima (cP); C, Viscosidad a 95°C (cP); D, Viscosidad final; E, viscosidad de rompimiento; F, viscosidad de asentamiento.

Estos resultados (Tabla 4) que se encuentran cercanos a los de Mieles-Gómez et al. (2023), lo que sugieren una mayor tendencia a la retrogradación durante el proceso de enfriamiento, atribuida a la recristalización y al grado de reasociación de las moléculas de amilosa (Bashir and Aggarwal 2019).

Microscopia a campo claro y luz polarizada

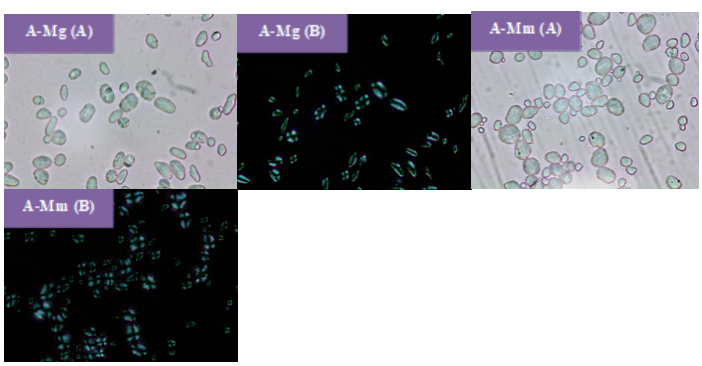


Figura 2. Fotografías de los gránulos de almidones de los almidones nativos evaluados mediante microscopia a campo claro (A) y luz polarizada (B) a 40X. AMg, Almidón de mango; AMm, Almidón de mamón.

Las microfotografías (Figura 2) muestran que los gránulos de almidón de mango y mamón presentan forma esférica, similares a los de papa, caracterizados por morfología ovalada a esférica. (Vargas et al., 2016). Las variaciones en tamaño y forma del almidón se atribuyen al origen biológico, influenciado por el genotipo, la bioquímica de cloroplastos y amiloplastos, y la fisiología de la planta (Barraza-Jáuregui et al., 2020).

Películas biodegradables.

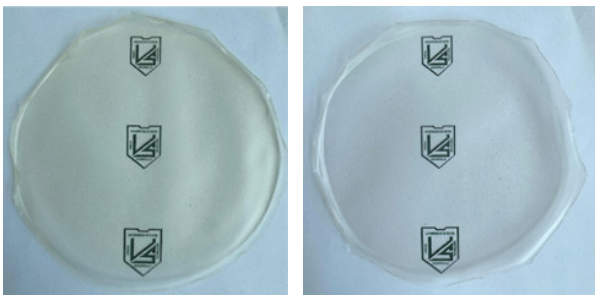


Figura 3. Fotografías de las películas de almidones nativos de AMg; Almidón de mango (*Mangifera Indica*) y AMm; Almidón de Mamón (*Melicoccus bijugatus*).

Tabla 5. Diámetros y coordenadas de color (L*, a*, b*) de los almidones.

Muestra	Espesor promedio (mm)	Translucidez	L*	a*	b*
AMg	0,023±0,01	4,0±0,06	45,46±0,11	-0,53±0,05	2,5±0,0
AMm	0,03±0,01	4,0±0,01	53,75±0,07	0,43±0,05	0,4±0,0

Los valores se expresan como media aritmética±desviación estándar; AMg, Almidón de mango; AMm; L*, Luminosidad; a*, coordenada rojo-verde; b*, coordenada amarillo-azul. Para la translucidez, se empleó una escala ordinal de 1 a 5 para clasificar el material evaluado, Donde 1; Opaco (no permite ver letras ni formas), 2; Muy baja translucidez (solo se perciben variaciones de luz), 3; Translucidez media (se distinguen siluetas y letras grandes), 4; Alta translucidez (se distinguen letras medianas con difuminado) y 5; Transparente (se distinguen claramente letras pequeñas).

El espesor de las biopelículas se ubicó dentro del rango común para almidones nativos obtenidos por casting y plastificados, coincidiendo con reportes previos en maíz (Alimi et al. 2021). El grosor de las películas es un factor clave, pues determina sus propiedades de barrera, especialmente la permeabilidad al vapor de agua y la resistencia a la penetración de otros gases (Vázquez-Luna et al. 2019).

CONCLUSIÓN

Las semillas de mango y mamón son fuentes no convencionales de almidón con alto contenido de amilosa y propiedades funcionales que permiten obtener biopelículas biodegradables. El almidón de mamón mostró mayor estabilidad térmica, mientras que el de mango presentó mejor capacidad de absorción de agua. Las películas elaboradas presentaron espesores en rangos convencionales, aunque con variaciones en color y translucidez que requieren optimización. Estos resultados confirman su potencial como alternativa sostenible para el desarrollo de empaques biodegradables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al PhD Jorge Figueroa Flórez por su orientación académica, así como al Programa de Ingeniería Agrícola y Agroindustrial de la Universidad de Sucre por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación

REFERENCIAS

Ai Y, and Jane J (2018) Understanding starch structure and functionality. In Starch in Food (pp 151–178) Elsevier https://doiorg/101016/B978-0-08-100868-300003-2

Alimi BA, Workneh TS and Femi FA (2021) Fabrication and characterization of edible films from acha (Digitalia exilis) and iburu (*Digitalia iburua*) starches *CyTA.* Journal of Food 19(1): 493–500 https://doiorg/101080/1947633720211917667

Barraza-Jáuregui G, Soriano-Colchado J, Obregón JMP et al (2020) Physicochemical, functional and structural properties of starches obtained from five varieties of native potatoes *(Solanum tuberosum* L) Buenos Aires, Argentina.

Bashir K and Aggarwal M (2019) Physicochemical, structural and functional properties of native and irradiated starch: a review. J Food Sci Technol 56: 513-523.

De Dios-Avila N, Morales-Ovando MA, Zamudio-Flores PB, Bustillos-Rodríguez JC et al (2024) Physicochemical, structural, thermal, and rheological properties of mango seed starch from five cultivars. Polysaccharides 5(4): 872–89.1 https://doiorg/103390/polysaccharides5040054

Fan X, Zhang S, Lin L, Zhao L, Liu A and Wei C (2016) Properties of new starches from tubers of *Arisaema elephas*, yunnanense and erubescens. Food Hydrocolloids 61: 183–190 https://doiorg/101016/jfoodhyd201605015

Hassan Musa S and Sagagi BS (2023) Extraction and some characteristics of mango seed kernel starch for industrial applications. Science Letters 17(2). https://doiorg/1024191/slv17i222719

Kumar R, Ghoshal G and Goyal M (2020) Development and characterization of corn starch based nanocomposite film with AgNPs and plant extract. Materials Science for Energy Technologies 3: 672–678. https://doiorg/101016/jmset202007004

Martins SHF, Pontes KV, Fialho RL and Fakhouri FM (2022) Extraction and characterization of the starch present in the avocado seed (*Persea americana* Mill) for future applications. Journal of Agriculture and Food Research 8: 100303 https://doiorg/101016/jjafr2022100303

Mieles-Gómez L, Quintana SE and García-Zapateiro LA (2023) Ultrasound-assisted extraction of mango (*Mangifera indica*) Kernel starch: Chemical, Techno-Functional, and Pasting Properties. Gels, 9(2). https://doiorg/103390/gels9020136

Monguí LM, and Quintero SS (2021) Generación de bioplástico a base del almidón producido por la semilla del aguacate. http://hdlhandlenet/11349/28699

Moo-Huchin VM, Ac-Chim DM, Chim-Chi YA, Ríos-Soberanis CR, Ramos G, Yee-Madeira et al (2020) Huaya (*Melicoccus bijugatus*) seed flour as a new source of starch: physicochemical, morphological, thermal and functional characterization. Journal of Food Measurement and Characterization, 14(6), 3299–3309 https://doiorg/101007/s11694-020-00573-3

Suárez-Castillo G (2023) Desarrollo de películas termoplásticas a partir de almidón modificado de yuca (*Manihot esculenta*) por procesos duales físicos y químicos con aplicaciones potenciales en la industria de los bioplásticos. Maestría en Ingeniería. Sincelejo, Colombia, 2023, 162 p.

Tan X, Sun A, Cui F, Li Q, Wang D, Li X and Li J (2024) The physicochemical properties of Cassava Starch/Carboxymethyl cellulose sodium edible film incorporated of Bacillus and its application in salmon fillet packaging. Food Chemistry: X 23: 101537. https://doiorg/101016/jfochx2024101537

Vargas G, Martínez P and Velezmoro C (2016) Functional properties of potato (*Solanum tuberosum*) starch and its chemical modification by acetylation. Scientia Agropecuaria 7: 223–230. https://doiorg/1017268/sciagropecu20160309

Vázquez-Luna A, Santiago M, Rivadeneyra-Domínguez E and Díaz-Sobac R (2019) Películas comestibles a base de almidón nanoestructurado como material de barrera a la humedad. CienciaUAT 152–164. https://doiorg/1029059/cienciauatv13i21105

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Recubrimientos a base de alginato de sodio y aloe vera: Impacto sobre la calidad de uvas 'Red Globe' (*Vitis vinifera*)

Coatings based on sodium alginate and aloe vera: impact on quality of 'Red Globe' grapes (*Vitis vinifera*)

Alejandro Molano-Castañeda[1], Esteban Largo-Ávila[1], Carlos Hernán Suárez-Rodríguez[1], Mario Fernando Muñoz-Vélez[2] and Alba Mery Garzón-García[1]*

Palabras clave:
Recubrimientos comestibles
Reología
Tratamiento postcosecha
Vida útil
Vitis vinifera.

RESUMEN

Las uvas cv. 'Red Globe' son frutos importantes para el consumo local como internacional. No obstante, se generan grandes pérdidas de estos frutos debido a los malos manejos postcosecha y durante su distribución, venta y consumo. Dado lo anterior, el objetivo de la investigación fue formular y caracterizar recubrimientos comestibles a base de alginato y aloe vera, y evaluar su aplicación en la calidad fisicoquímica y actividad antixodante de las uvas 'Red Globe'. Se analizó el comportamiento reológico de los recubrimientos a 25 °C. Adicionalmente, se evaluaron parámetros fisicoquímicos (pH, sólidos solubles totales y firmeza) y capacidad antioxidante por el ensayo ABTS de las uvas durante su almacenamiento por 21 días, a 6 °C y 70% de humedad relativa. Los recubrimientos mostraron un comportamiento característico de fluidos pseudoplásticos y contribuyeron a reducir la actividad metabólica de las uvas, lo cual permitió una maduración más controlada y la retención de compuestos antioxidantes hasta el final del almacenamiento.

Keywords:
Edible coatings
Reology
Postharvest treatment
Shelf-life
Vitis vinifera

ABSTRACT

The grapes cv. 'Red Globe' are widely consumed both locally and internationally, but they are highly susceptible to postharvest losses resulting from inadequate handling, as well as during distribution, marketing, and consumption. To address this issue, the present study aimed to develop and characterize edible coatings formulated with alginate and aloe vera, and to assess their effect on the physicochemical quality and antioxidant activity of 'Red Globe' grapes. The rheological properties of the coatings were examined at 25 °C. In addition, changes in physicochemical parameters (pH, total soluble solids, and firmness) and antioxidant capacity by ABTS assay) were monitored for 21 days of storage at 6 °C and 70% relative humidity. The coatings exhibited pseudoplastic fluid behavior and effectively reduced the metabolic activity of grapes, thereby promoting more controlled ripening and preserving antioxidant compounds throughout the storage period.

[1]Universidad del Valle, sede Regional Caicedonia, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6047-1523; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1304-3646; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5454-1000
[2] Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7074-4214
*Corresponding author: garzon.alba@correounivalle.edu.co

Dentro de las tecnologías emergentes aplicadas durante la postcosecha de frutas y hortalizas, se encuentran los recubrimientos comestibles como propuesta para reemplazar los conservantes de síntesis química que generan la extensión de la vida útil y la retención de compuestos de interés. El recubrimiento comestible consiste en una capa que cubre toda la superficie de un alimento, la cual es preparada mediante la mezcla de biopolímeros naturales (poliscáridos, lípidos y proteínas) (Adriani and Handayani 2023). El alginato de sodio es uno de los polisacáridos que actualmente se emplea para la producción de recubrimientos comestibles. Esta sustancia se extrae de algas marinas y tiene como principales atributos su biocompatibilidad, transparencia, y las propiedades de barrera contra gases y humedad (Sharma and Singh 2020).

Previamente, se ha reportado la aplicación de recubrimientos comestibles a base de alginato de sodio con aditivos de carácter antioxidante, antimicrobiano, agentes antipardeamiento, sabores, pigmentos y mejoras nutricionales (Senturk Parreidt et al. 2018). Salama and Aziz (2021) formularon un recubrimiento comestible activo de alginato y aloe vera enriquecido con aceite de incienso para retardar la senescencia de pimientos verdes. Para este caso, la adición de aloe vera permitió generar un aumento de la actividad antioxidante y antimicrobiana, ya que es una buena fuente de vitaminas que neutralizan los radicales libres (Farina et al. 2020).

Por otra parte, la uva es un fruto muy importante a nivel comercial alrededor del mundo y en nuestro país. En el año 2023, en Colombia se produjeron aproximadamente 33.993 ton y el departamento del Valle del Cauca aportó cerca del 60% de esta producción (Agronet 2025). No obstante, la uva es altamente perecedera y aunque no presenta un carácter climatérico, su manejo postcosecha, almacenamiento, distribución y venta se ven afectados por su corta vida útil, oscurecimiento, deshidratación y ataques fúngicos (Babalık et al. 2020). Dado lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la formulación de recubrimientos a base de alginato de sodio y áloe vera, y su efecto en uvas rojas durante su almacenamiento en frío.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Las uvas rojas (*Vitis vinifera*) cv. 'Red Globe' y el aloe vera (*Aloe barbadensis* Mill.) en cristales (La Giralda, Bogotá, CO) fueron obtenidos del mercado local del municipio de Caicedonia, Valle del Cauca, Colombia.

Formulación, caracterización y aplicación de los recubrimientos comestibles

Se prepararon dos recubrimientos variando la cantidad de alginato de sodio a incorporar, y se incluyeron las siguientes cantidades: aloe vera 20% (p/p), alginato de sodio 1% y 2% (p/p), glicerol 1,5% (p/p), polisorbato 80 0,1% (p/p) (MCKENNA GROUP S.A.S, Cota, CUN, CO), y el porcentaje restante correspondió a agua destilada. Inicialmente, se disolvió el alginato de sodio en el agua destilada a baño de maría, y posteriormente, se añadieron el plastificante y surfactante, y se homogenizó la mezcla manualmente por 5 min.

Para el análisis reológico, se empleó un reómetro Entry-level MCR 92 (Anton Paar, Graz, ST, AT) y se evaluaron tres soluciones adicionales para analizar la influencia del aloe vera en la viscosidad y el esfuerzo de corte de los recubrimientos a una temperatura de 25 °C. Estas dos soluciones contenían alginato de sodio al 1 y 2% (p/p) mantienendo los porcentajes del plastificante y surfactante, pero eliminando el aloe vera de la formulación. La última solución consistió en los cristales de aloe vera.

Los dos recubrimientos iniciales fueron aplicados en las uvas con una brocha y secados por convección forzada por 10 min. Adicionalmente, se consideró un control (sin recubrimiento comestible). Las uvas se almacenaron por 21 días a 6 °C y 70% de humedad relativa (RH).

Análisis fisicoquímicos de las uvas

Se evaluaron el pH con un potenciómetro (HI 991001, HANNA Instruments, Woonsocket, RI, USA), los sólidos solubles totales o SST (HI96800; HANNA Instruments) y la firmeza usando un penetrómetro digital con un cabezal de 7,9 mm de diámetro (GY-M30, Shenzhen, GD, CN).

Capacidad antioxidante de las uvas

Los extractos de las muestras se prepararon con 1 g de las uvas y 10 mL de etanol absoluto. Se llevaron a baño ultrasónico por 15 min y posteriormente, a centrifugación por 15 min a 3600 rpm (Z 206 A; Hermle Benchmark, Franklin, WI, USA) (Garzón-García et al. 2023). Los extractos

fueron diluidos considerando un factor de 50 antes de su uso en la prueba subsiguiente.

La capacidad antioxidante mediante la estabilización del radical ABTS (ácido 2,2′-azino-bis-(3 etilbenzotiazolin-6-sulfónico)) se determinó de acuerdo con lo reportado por Perez-Perez et al. (2020) con algunas modificaciones. Inicialmente, se preparó una disolución con el radical. Para ello, se tomaron 19,3 mg del radical catiónico ABTS y se disolvieron en 5 mL de agua destilada. Por separado, se adicionaron 0,0378 g de persulfato de potasio en 1 mL agua. Posteriormente, se tomaron 88 µL de la solución de persulfato y se agregaron en la solución inicial. Esta última solución se dejó en oscuridad por 12 h y luego se ajustó a una absorbancia de 0,7±0,01 a una longitud de onda de 734 nm. Para la cuantificación, se tomaron 250 µL del extracto de cada muestra y se le adicionaron 3375 µL de la solución preparada del radical catiónico. Se consideró el etanol como control. La inhibición del radical se calculó como se muestra a continuación.

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{\text{Absorbancia control} - \text{Absorbancia extracto}}{\text{Absorbancia control}} \text{ x } 100$$

Análisis estadístico y diseño experimental

Se empleó un diseño completamente al azar con dos factores y un arreglo factorial 3×4. El primer factor (A) consistió en los tratamientos con los recubrimientos considerados. El segundo factor (B) correspondió al tiempo de almacenamiento: 0, 7, 14 y 21 días. Se realizó un ANOVA de dos vías para evaluar el efecto de los factores sobre los parámetros medidos en las uvas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características reológicas de los recubrimientos comestibles

De acuerdo con la Figura 1A, el aumento del contenido de alginato generó que las soluciones tendieran a un comportamiento de un fluido pseudoplástico. Esto hace que la aplicación del recubrimiento sea más sencilla y provea al fruto de una capa consistente. Con los datos derivados de la viscosidad de las soluciones (Figura 1B), se confirmó que debido a su naturaleza, los recubrimientos fomentan la resistencia mecánica y pueden generar una buena barrera a gases a una baja humedad relativa (Liyanapathiranage et al. 2023).

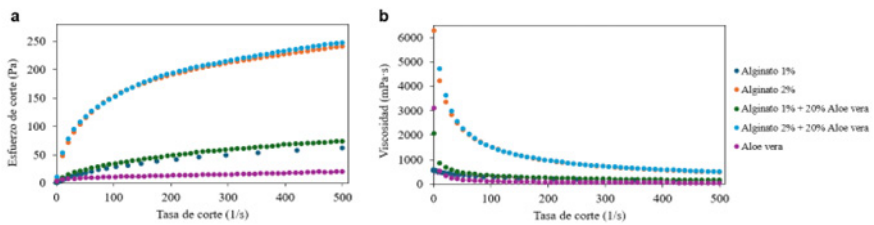


Figura 1. a) Reograma de esfuerzo de corte y b) viscosidad *versus* tasa de corte de los recubrimientos comestibles y sus controles.

Propiedades fisicoquímicas de las uvas

El pH de las uvas de los distintos tratamientos se mantuvo casi constante en un valor cercano a 3,5 durante todo el almacenamiento. Los sólidos solubles totales aumentaron conforme al tiempo de almacenamiento y al tratamiento (P<0,05). Los valores más altos de SST correspondieron a las uvas a las que se les aplicó el tratamiento Alginato 2% + 20% *Aloe vera*, lo que supone menor consumo de azúcares durante su actividad metabólica. Por otra parte, los valores de firmeza hasta el día 14 del almacenamiento fueron mayores en aquellas uvas con recubrimientos comestibles (>4 kgf cm^{-3}). Para el día 21, las uvas del tratamiento control mostraron mayor firmeza, debido a su pérdida de materia seca y deshidratación (Figura 2).

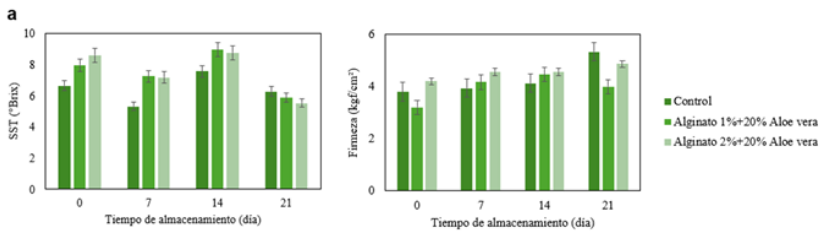


Figura 2. a) SST y b) firmeza de las uvas 'Red Globe' durante 14 días a 6 °C y 70% RH. Las barras hacen referencia al porcentaje de error.

Actividad antioxidante de las uvas

En general, las uvas inhibieron cerca más del 5% del radical mediante los métodos de transferencia de eletrones y de hidrógenos. Se notó mayor capacidad antioxidante en las uvas con recubrimientos comestibles, ya que estos sirvieron de barrera para durante la transpiración del fruto. Asimismo, los picos de los antioxidantes para las uvas con recubrimientos comestibles se dieron en períodos previos al día 14 de almacenamiento, lo que puede señalar que cerca de este período de almacenamiento se generó una actividad metabólica más elevada.

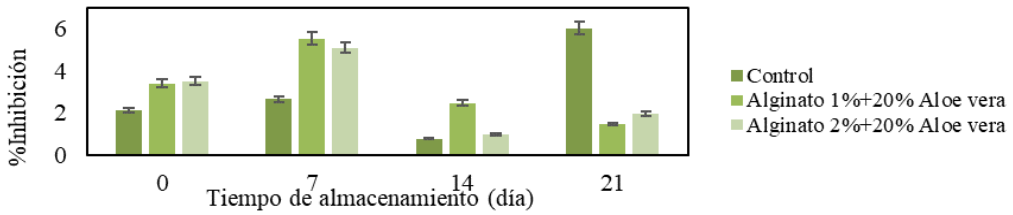


Figura 3. Capacidad antioxidante de las uvas 'Red Globe' durante 14 días a 6 °C y 70% RH. Las barras hacen referencia al porcentaje de error.

CONCLUSIÓN

La caracterización reológica de los recubrimientos comestibles a base de alginato y aloe vera mostró que estos tienden a comportarse como fluidos pseudoplásticos, lo que fomentó que su aplicación a la uva generara una capa estable y fuera una barrera efectiva durante los procesos metabólicos, tales como la transpiración o respiración, conservando la calidad y las actividades biológicas del fruto. Este estudio es importante porque permite comprender que las propiedades de los recubrimientos comestibles y su óptima formulación inciden sobre la calidad de las frutas no climatéricas y su actividad antioxidante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Roast Lab y al Laboratorio de Materiales Poliméricos por permitir el avance de esta investigación en sus instalaciones.

REFERENCIAS

Agronet (2025) Estadísticas Agropecuarias https://wwwagronetgovco/estadistica/Paginas/homeaspx

Andriani V and Handayani N A (2023) Recent technology of edible coating production: A review. Materials Today: Proceedings 87: 200-206.

Babalık Z, Onursal CE, Erbaş D and Koyuncu MA (2020) Use of carvacrol helps maintain postharvest quality of red globe table grape. JAPS: Journal of Animal and Plant Sciences 30(3): 655-662.

Farina V, Passafiume R, Tinebra I, Scuderi D, Saletta F, Gugliuzza G and Sortino G (2020) Postharvest application of *Aloe vera* gel-based edible coating to improve the quality and storage stability of fresh-cut papaya. Journal of Food Quality 2020(1): 8303140.

Garzón-García AM, Ruiz-Cruz S, Dussán-Sarria S, Hleap-Zapata JI, Márquez-Ríos E, Del-Toro-Sánchez C L and Ocaño-Higuera VM (2023) Effect of UV-C postharvest disinfection on the quality of fresh-cut 'Tommy Atkins' mango polish. Journal of Food and Nutrition Sciences 73(1): 39-49.

Liyanapathiranage A, Dassanayake RS, Gamage A, Karri RR, Manamperi A, Evon P and Merah O (2023) Recent developments in edible films and coatings for fruits and vegetables. Coatings 13(7): 1177.

Pérez-Perez LM, Toro Sánchez CLD, Sánchez Chavez E, González Vega RI, Reyes Díaz A, Borboa Flores J and Flores-Cordova MA (2020) Bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes de diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L) en México, mediante un sistema gastrointestinal *in vitro* Biotecnia 22(1): 117-125.

Salama HE and Aziz MSA (2021) Development of active edible coating of alginate and aloe vera enriched with frankincense oil for retarding the senescence of green capsicums. LWT 145: 111341.

Senturk Parreidt T, Müller K and Schmid M (2018) Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. Foods 7(10): 170.

Sharma A and Singh AK (2025) Sodium alginate: a green biopolymer resource-based antimicrobial edible coating to enhance fruit shelf-life: A review. Colloids and Interfaces 9(3): 32.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Análisis teórico de la transferencia de calor y masa durante el secado del café: Principios físicos y perspectivas de modelado

Theoretical analysis of heat and mass transfer during coffee drying: Physical principles and modeling perspectives

Eduardo Duque-Dussán[1]* and Juan R. Sanz-Uribe[1]

Palabras clave:
Conducción de calor
Difusión de humedad
Modelado matemático
Secado de granos
Simulación de proceso

RESUMEN

El secado del café es una etapa crítica en la postcosecha, orientada a reducir la humedad del grano para su conservación y calidad. Este estudio presenta un análisis teórico de la transferencia acoplada de calor y masa, modelando el grano como un sistema poroso anisotrópico con geometría variable. Se aplican las leyes de Fourier y Fick, junto con herramientas tensoriales y ecuaciones en derivadas parciales en coordenadas esféricas. Los resultados evidencian cómo la distribución espacial de temperatura y humedad condiciona la eficiencia del secado e identifica zonas críticas de reabsorción. Se concluye que una modelación rigurosa puede optimizar tecnologías de secado y apoyar el desarrollo de sistemas de simulación aplicables a diversos escenarios agroindustriales.

Keywords:
Heat conduction
Moisture diffusion
Mathematical modeling
Grain drying
Process simulation

ABSTRACT

Coffee drying is a critical postharvest stage aimed at reducing bean moisture to safe levels for preservation and quality. This study presents a theoretical analysis of coupled heat and mass transfer, modeling the bean as a porous, anisotropic system with variable geometry. Fourier's and Fick's laws are applied alongside tensor calculus and partial differential equations in spherical coordinates. Results show that spatial distributions of temperature and moisture strongly influence drying efficiency and reveal critical zones of reabsorption. The study concludes that rigorous modeling can support the optimization of drying technologies and the development of simulation systems for diverse agro-industrial contexts.

[1]Disciplina de Postcosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Manizales, Colombia.
*Corresponding author: Eduardo.Duque@cafedecolombia.com

CC BY NC SA

El secado del café pergamino (*Coffea arabica* L.) constituye una de las etapas más críticas y complejas en la postcosecha, ya que define la estabilidad del grano y la conservación de su calidad sensorial (Abreu et al. 2025). Durante este proceso, el grano experimenta transformaciones térmicas e higroscópicas altamente acopladas, particularmente en la fase en la que la almendra se contrae y se forma una capa de aire entre esta y el pergamino, lo que introduce nuevas resistencias al transporte de calor y masa (Duque-Dussán et al. 2022). A pesar de los avances en modelos unidimensionales, la geometría irregular y la anisotropía del grano real requieren enfoques más robustos. En este trabajo se desarrolla un modelo teórico tridimensional con formulación tensorial, coordenadas elipsoidales y condiciones dinámicas de frontera, para simular con mayor fidelidad la evolución de temperatura y humedad en un sistema multicapa. Este modelo busca aportar herramientas para optimizar el control térmico en tecnologías de secado adaptadas a condiciones tropicales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se formuló un modelo tridimensional para simular la transferencia acoplada de calor y masa en un grano de café pergamino durante el secado. El grano fue representado como un sistema multicapa con geometría elipsoidal: almendra, capa de aire intermedia y endocarpio (pergamino). La evolución térmica se modeló mediante la Ley de Fourier y el transporte de humedad mediante la Ley de Fick (Tian et al. 2021), ambos en formulación tensorial:

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T, \qquad \vec{j} = -Deff \cdot \nabla X \qquad (1)$$

Donde $\vec{q}$ y $\vec{j}$ son los vectores de flujo térmico y másico, T es la temperatura, X el contenido de humedad (b.s.), y k, D_{eff} son tensores de segundo orden que representan la anisotropía del medio. La matriz de conductividad térmica y difusión en coordenadas locales se representó como:

$$D_{eff} = \begin{pmatrix} D_r & 0 & 0 \\ 0 & D_\theta & 0 \\ 0 & 0 & D_\varnothing \end{pmatrix}, k = \begin{pmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_\theta & 0 \\ 0 & 0 & k_\varnothing \end{pmatrix} \qquad (2)$$

donde r, θ y $\varnothing$ son las componentes radiales y angulares del tensor, ajustadas según la estructura porosa y orientación del tejido vegetal. La dinámica térmica fue expresada también mediante la ecuación de conducción dependiente del tiempo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \qquad (3)$$

donde $\alpha = \frac{k}{\rho\, c_p}$, es la difusividad térmica, dependiente de la conductividad térmica k [W/m K], la densidad ρ [kg m^{-3}], y la capacidad calorífica c_p [J/kg K], todas las variables en función de la humedad local. Las condiciones iniciales se fijaron como homogéneas: T_0 = 35 °C, X_0=0,53 b.h. (Andrade et al. 2024). La capa de aire se modeló como una región interna con baja conductividad y densidad, cuya aparición ocurre cuando X<0,43. Las condiciones de frontera térmica y másica se expresaron:

$$-k\nabla T \cdot \vec{n} = h_T (T_\infty - T_s), \qquad -D_{eff} \nabla X \cdot \vec{n} = hm (X_\infty - X_s) \quad (4)$$

donde h_T y h_m son los coeficientes convectivos dependientes de la velocidad y humedad relativa del aire, y T_s, X_s corresponden a las condiciones superficiales del grano.

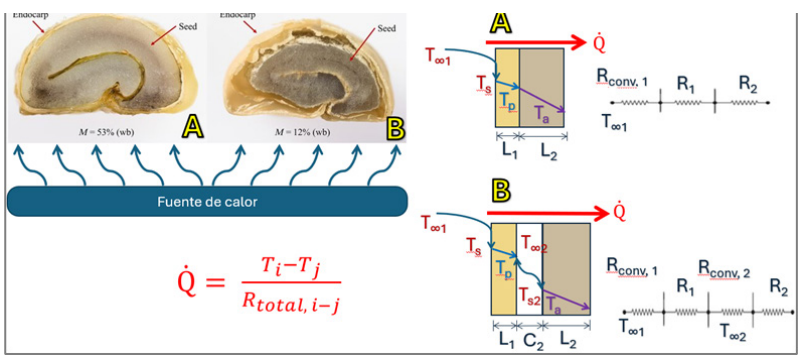


Figura 1. Evolución estructural del grano de café durante el secado. A: grano húmedo sin separación almendra-pergamino. B: grano seco con capa de aire intermedia.

La solución se implementó mediante el método de elementos finitos en ABAQUS® con acoplamiento térmico-higroscópico en MATLAB®, utilizando mallas refinadas en las interfaces aire–almendra y pergamino–aire (Figura 1). Las propiedades físicas se actualizaron dinámicamente en función del contenido de humedad por interpolación no lineal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones del modelo acoplado de transferencia de calor y masa permitieron visualizar la evolución térmica e higroscópica del grano de café pergamino durante el secado. Se identificó una fase crítica cuando la almendra alcanza una humedad cercana al 43 % (b.h.), lo cual genera su contracción volumétrica y la formación de una capa de aire entre ella y el pergamino. Esta transformación morfológica convierte al sistema en una estructura tricapa con nuevas resistencias térmicas y difusivas, alterando el flujo interno de energía y materia (Burmester & Eggers 2010). Durante esta etapa, los gradientes térmicos $|\nabla T|$ y de contenido de humedad $|\nabla X|$ alcanzan sus máximos valores:

$$|\nabla T|_{max} \approx 4.5 K/mm;\ |\nabla X|_{max} \approx 0.08 kg/kg.mm$$

ubicados en las interfaces aire–almendra y aire–pergamino. Esta configuración genera una acumulación energética localizada, donde más del 70 % del flujo térmico se concentra en menos del 25 % del volumen total, lo que incrementa el riesgo de tensiones internas y reabsorciones localizadas de humedad (Anokye-Bempah et al. 2023).

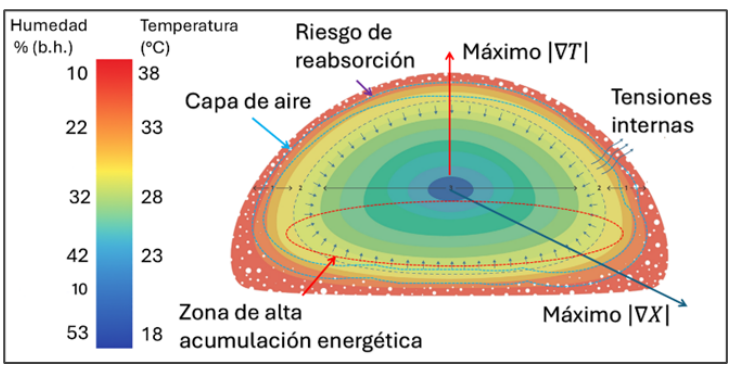


Figura 2. Distribución de temperatura y humedad en el grano de café durante el secado. Se destacan los gradientes máximos, la capa de aire y zonas críticas de acumulación energética.

La Figura 2 muestra un corte transversal del grano simulado, con vectores de flujo térmico y másico convergiendo en la región intermedia. El color indica simultáneamente temperatura y humedad (azul: frío/húmedo, rojo: caliente/seco), destacando zonas críticas de acumulación energética, reabsorción y tensión estructural como:

$$E_{acumulada}\ \alpha \int_V (|\tau_{térmica}|^2 + |\tau_{hídrica}|^2)\, dV \qquad (5)$$

donde los tensores de esfuerzo térmico e higroscópico se definieron como:

$$\tau_{total} = \nabla \otimes \vec{q} + \nabla \otimes \vec{j} \qquad (6)$$

Este análisis permitió identificar que la región más crítica se localiza en el borde interno de la almendra, donde la capa de aire intermedia actúa como un aislante térmico parcial debido a su baja conductividad y espesor reducido. Estos hallazgos respaldan la necesidad de implementar estrategias de secado con control dinámico de temperatura y humedad relativa. En particular, ajustar la velocidad del aire para incrementar el coeficiente convectivo superficial h_T podría mitigar las resistencias impuestas por la capa de aire, favoreciendo la homogenización térmica sin comprometer la integridad estructural del grano (Benlioğlu et al., 2023). Además, este modelo constituye una base para desarrollar sistemas predictivos de control que optimicen simultáneamente la eficiencia energética y la calidad final del café pergamino.

CONCLUSIÓN

El modelo teórico permitió representar con precisión la transferencia acoplada de calor y masa en un grano de café multicapa con geometría variable. Las

simulaciones identificaron una fase crítica del secado, donde se concentran los mayores gradientes térmicos e higroscópicos, reduciendo la velocidad de secado y elevando el riesgo de reabsorción. El análisis tensorial reveló zonas críticas de transporte, fundamentales para diseñar estrategias de control dinámico y optimizar tecnologías de secado adaptadas a sistemas multicapa y aplicaciones industriales.

REFERENCIAS

Abreu DJ M de, Lorenço MS, Machado GG L, Silva JM, Azevedo EC de and Carvalho EEN (2025) Influence of drying methods on the post-harvest quality of coffee: Effects on physicochemical, sensory, and microbiological composition. Foods 14(9): 1463. https://doi.org/10.3390/foods14091463

Andrade PS, Duarte CR and Barrozo MAS (2024) An innovative dryer for Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) drying: Investigating heat and mass transfer. Drying Technology 42(6): 1065–1076. https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2341399

Anokye-Bempah L, Han J, Kornbluth K, Ristenpart W and Donis-González IR (2023) The use of desiccants for proper moisture preservation in green coffee during storage and transportation. Journal of Agriculture and Food Research 11: 100478. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100478

Benlioğlu MM, Karaağaç MO, Ergün A, Ceylan İ and Ali İHG (2023) A detailed analysis of a novel auto-controlled solar drying system combined with thermal energy storage concentrated solar air heater (CSAC) and concentrated photovoltaic/thermal (CPV/T). Renewable Energy 211: 420–433. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.108

Burmester K and Eggers R (2010) Heat and mass transfer during the coffee drying process. Journal of Food Engineering 99(4): 430–436. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.021

Duque-Dussán E, Villada-Dussán A, Roubík H and Banout J (2022) Modeling of forced and natural convection drying process of a coffee seed. Journal of the ASABE 65(5): 1061–1070. https://doi.org/10.13031/ja.15156

Tian Y, Lin G and Guo J (2021) Analysis of mass diffusion theory and models for high-temperature multi-component gases. International Journal of Heat and Mass Transfer 181: 121994. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121994

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Evaluación del poliestireno expandido como aislamiento térmico en el secado mecánico de café con eficiencia energética

Evaluation of expanded polystyrene for thermal insulation in energy-efficient mechanical coffee drying

Valentina Cruz-Ospina[1]*, Eduardo Duque-Dussán[1] and Juan Rodrigo Sanz-Uribe[1]

Palabras clave:
Coffea arabica
Eficiencia térmica
EPS
Materiales aislantes
Transferencia de calor

RESUMEN

El secado mecánico de café representa una de las etapas más críticas del procesamiento, tanto por su influencia en la calidad del grano como por la demanda de energética. En este estudio se evaluó el uso de poliestireno expandido (EPS) como material aislante en un secador mecánico de capa estática alimentado con cisco de café. Se comparó el control vs. el secador con EPS bajo un diseño experimental completamente aleatorio con tres repeticiones. Se midieron variables operativas como consumo energético, tiempos de secado, tasas de remoción de humedad y parámetros de transferencia de masa y energía en el grano. El uso de EPS redujo las pérdidas de calor en un 37,7% y permitió un ahorro de 13,9% en combustible y 9,5% en energía eléctrica, con una reducción del 12,6% en el tiempo total de secado. Además, la eficiencia del sistema aumentó en un 6,7% y la tasa de secado fue un 11,76% mayor frente al control. A nivel del grano, se observaron mejoras en coeficiente de difusión, calor específico y conductividad térmica. Estos resultados demuestran que el EPS es una alternativa accesible y eficaz para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad del secado mecánico de café.

Keywords:
Coffea arabica
Thermal efficiency
EPS
Insulated materials
Heat transfer

ABSTRACT

Mechanical coffee drying is one of the most critical stages of processing, both because of its influence on bean quality and because of its energy requirements. This study evaluated the use of expanded polystyrene (EPS) as an insulating material in a static layer mechanical dryer fed with coffee husks. The control was compared with the EPS dryer under a completely randomized experimental design with three replicates. Operating variables such as energy consumption, drying times, moisture removal rates, and mass and energy transfer parameters in the bean were measured. The use of EPS reduced heat losses by 37.7 % and resulted in savings of 13,9 % in fuel and 9.5 % in electrical energy, with a 12.6% reduction in total drying time. In addition, the efficiency of the system increased by 6,7% and drying rate was 11.8 % higher than the control. At the grain level, improvements were observed in the diffusion coefficient, specific heat, and thermal conductivity. These results demonstrate that EPS is an accessible and effective alternative for improving the energy efficiency and sustainability of mechanical coffee drying.

[1]Disciplina de Postcosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Manizales, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7897-6632, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8045-6088, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9875-9426
*Corresponding author: valentina.cruz@cafedecolombia.com

El proceso de transformación del fruto maduro a café seco implica operaciones sucesivas cuyo objetivo es reducir la humedad del grano hasta 10-12% b.h. que garantizan su estabilidad microbiológica y sensorial (Peñuela-Martínez and Sanz-Uribe, 2025). A diferencia del secado solar, los secadores mecánicos permiten mantener condiciones controladas de temperatura y caudal de aire, favoreciendo una operación continua, menores tiempos de procesamiento y mayor eficiencia térmica. Sin embargo, su elevado consumo de energía, agravado por deficiencias de aislamiento en las cámaras, reduce la eficiencia y aumenta los costos de operación (Duque-Dussán et al. 2023).

El aislamiento térmico se plantea como estrategia para mejorar el rendimiento de estos equipos, el uso de materiales aislantes como el Poliestireno Expandido (EPS), con baja conductividad térmica (0.032–0.038 W m^{-1} K^{-1}), ha mostrado reducir pérdidas de calor en secadores de gramos y disminuir el consumo energético específico cerca de un 20% (Jokiniemi and Ahokas, 2014). No obstante, su aplicación en el secado de café bajo condiciones reales de operación aún no ha sido evaluada, especialmente en contextos donde se emplean biocombustibles como el cisco.

En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto del EPS como aislante térmico en un sistema de secado mecánico de café, analizando su influencia sobre el comportamiento térmico del equipo, la eficiencia energética global y la transferencia de masa entre grano y ambiente. Para ello, se realizó una evaluación experimental considerando variables como el tiempo de secado, consumo de combustible y electricidad, dinámica de secado, distribución de temperatura y humedad en la cámara, y parámetros de eficiencia energética.

MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación se realizó en el Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé (Manizales, Caldas a 1.306 m) durante julio y agosto del 2025, con temperaturas promedio de 21,6 °C y humedad relativa ambiental del 80,4% (Cenicafé, 2024). Se empleó *Coffea arabica* L. var. Cenicafé 1 procesado mediante beneficio húmedo. Fueron necesarios 70 kg de café pergamino húmedo por repetición, los cuales fueron distribuidos uniformemente sobre el compartimiento central del secador, considerando una altura de capa de 20 cm.

Equipo de secado mecánico

El equipo consistió en una estructura rectangular de acero al carbono con tres cámaras de secado (cada una con un volumen de 0,1103 m^3 y 0,4798 m^2 de área transversal). El aire de secado, impulsado por un ventilador a 50±2 °C con un caudal mínimo de 0,1 m^3 min^{-1} kg^{-1} CPS (Parra-Coronado et al., 2017), se calienta usando un intercambiador alimentado con cisco de café. La cámara plénum con un volumen de 0,0408 m^3, permitió la distribución del flujo hacia los compartimientos superiores. La temperatura de entrada fue controlada mediante una termocupla a la salida del ventilador y un sistema automático de dosificación de cisco.

Características del material aislante

Las paredes externas del equipo fueron recubiertas con una capa de 15 mm de EPS. La elección del material fue gracias a su amplio uso como aislante en distintos sectores industriales, gracias a sus propiedades aislantes como baja conductividad térmica y densidad, ligereza y facilidad de instalación, así como a su amplia oferta y bajo costo (Ali et al. 2024).

Procesamiento y variables medidas

El secado se controló hasta 11±1% en base húmeda (b.h.), midiendo temperatura y humedad relativa con termohigrómetros UNI-T UT330B-IP67 dentro y fuera de la cámara, un lente térmico FLIR Leptón 3.5 para la temperatura superficial del equipo y un sensor LM35 para la temperatura de grano. Los contenidos de humedad se determinaron con Gravimet SM®, Kett PM-600 ($\leq$25% b.h.) y método de estufa (ISO 6673:2003). La cámara se dividió en tres sectores (izquierda, centro y derecha), con mediciones cada hora, volteos cada 6 h y registro del tiempo total, consumo de combustible y energía

Evaluación del rendimiento térmico

Se evaluó la eficiencia térmica real del sistema (η_{HX}) a partir de la ecuación 1 (Parra-Coronado et al. 2017) usando los valores experimentales de ΔT y el consumo de combustible ($\dot{m}_f$), junto con las constantes de calor específico del aire ($C_{p_{air}}$) (1,005 kJ kg^{-1} K^{-1}) y el poder calorífico inferior del combustible (h_B) (18.550 kJ kg^{-1}) (Duque-Dussán et al. 2025), las pérdidas de calor hacia el ambiente por convección, radiación y conducción a través de la estructura se incluyeron de forma implícita en la eficiencia térmica calculada.

$$\eta_{HX} = \frac{\dot{m}_a \times C_{pair} \times \Delta T_a}{\dot{m}_f \times h_B} \quad (1)$$

El consumo de combustible fue registrado al finalizar cada ciclo, el balance energético se obtuvo a partir del consumo total de energía (*E*), considerando la potencia del motor (*P*) para el ventilador y el suministro automático de combustible, además del tiempo total del proceso (*t*).

Parámetros de grano

Se calculó el coeficiente de difusión (*D*), transferencia de calor (h_c), calor específico del grano (C_p)y conductividad térmica (K) según los modelos adaptados por (Duque-Dussán et al. 2022).

Diseño experimental y análisis de datos

Se planteó un diseño experimental completamente aleatorio, con tres repeticiones (*n* = 3), completando un total de seis ciclos de secado. Se realizaron análisis de varianza junto con test post hoc cuando se presentaron diferencias significativas. El procesamiento estadístico se realizó en R (v.4.3.0) y las gráficas en SigmaPlot (v.11.0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones ambientales

Como se esperaba, las temperaturas más altas se registraron en la cámara plénum, con valores mayores bajo condiciones de aislamiento (49,1±1,9 °C frente a 47,5±3,4 °C sin EPS). Posteriormente, una vez el aire de secado traspasó la cama de café, el lado izquierdo presentó las temperaturas más elevadas en ambos tratamientos (39,4±6,1 °C con EPS y 39,0±5,2 °C control); mientras que, las temperaturas más bajas se obtuvieron en el centro (39,0±5,9 °C control y 38,8±5,9 °C con EPS). En cuanto a la humedad relativa, ambos tratamientos presentaron mayores valores al lado derecho con 54,6±16,9% y 54,2±17,6% para control y EPS, respectivamente; y, los menores valores se registraron para el lado izquierdo en el control con 52,0±16,1% y en el centro para el tratamiento con EPS con 50,9±18,2%. La humedad promedio de la cámara plénum se redujo con el uso del aislamiento, pasando de 32,5±6,4% para el control a 30,0±2,4% mediante el EPS. El análisis estadístico mostró diferencias significativas (*P*<0,05) entre los tratamientos para los sectores centro, derecha y plénum. Estos resultados demuestran que el material aislante optimiza las condiciones de secado al aumentar la temperatura y reducir la humedad, promoviendo una mayor uniformidad del microclima en la cámara (Abueluor et al. 2023).

Rendimiento térmico del equipo

El análisis de eficiencia mostró que el aislamiento térmico redujo el consumo de combustible, energía y tiempo de operación en 13,9%, 9,5% y 12,6%, respectivamente. Esto generó un incremento en la eficiencia del sistema del 6,7% (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores eficiencia y consumo energético del secador de café bajo tratamientos con y sin aislamiento térmico.

Variable	Tto	Media	CV	Gl	F	p-value	NS
Eficiencia del Sistema (%)	**Control**	43,23	5,12 %	1,4	3,39	0,1390	ns
	EPS	46,14	6,40 %				
Tiempo de Secado (h)	**Control**	17,00	5,88 %	1,4	4,000	0,1160	ns
	EPS	15,67	3,69 %				
Consumo Eléctrico (kWh)	**Control**	14,31	5,68 %	1,4	6,249	0,0668	ns
	EPS	12,95	4,74 %				
Consumo Cisco (kg)	**Control**	52,07	7,86 %	1,4	4,791	0,0923	ns
	EPS	44,83	7,05 %				
Rendimiento (kgCisco kgCPS^{-1})	**Control**	1,49	9,16 %	1,4	3,991	0,1160	ns
	EPS	1,27	8,06 %				

Durante las pruebas control, las paredes internas y externas alcanzaron temperaturas promedio de 45,4±4,9 °C y 44,0±4,1 °C. Con el uso de EPS, la temperatura interna se elevó a 48,8±3,9 °C, mientras que la externa descendió a 30,4±4,7 °C, lo que representó una reducción del 37,7 % en pérdidas térmicas ($P \leq 0{,}0001$). Este comportamiento concuerda con estudios que evidencian cómo los materiales aislantes mejoran la eficiencia térmica, estabilizan las condiciones internas y favorecen la uniformidad del secado, además de contribuir al ahorro energético (Tyagi et al. 2024).

Desempeño del proceso de secado

Con EPS, la remoción de humedad fue 11,76 % más rápida, reduciendo el tiempo de secado de 17,0±1,0 h a 15,7±0,6 h, con contenidos finales de 11,58±0,4 % y 11,51±0,4 % (b.h.), respectivamente. Las mayores tasas de secado se registraron en el lado izquierdo, con 0,58±0,8% h^{-1} para el control y 0,61±0,9% h^{-1} con EPS. Valores similares fueron obtenidos por Duque-Dussán et al. (2023) usando un secador híbrido.

Propiedades térmicas del grano

El EPS mejoró significativamente el coeficiente de difusión, calor específico y conductividad térmica, indicando mayor capacidad del grano para almacenar energía y facilitar la migración de humedad. El coeficiente de transferencia de calor no presentó diferencias, aunque la mejora en las condiciones ambientales contribuyó indirectamente a su desempeño.

CONCLUSIONES

Los hallazgos del estudio demuestran que el poliestireno expandido (EPS) es una solución viable y efectiva para incrementar la eficiencia energética del secado mecánico de café. El aislamiento térmico proporcionado por el EPS optimiza las condiciones operativas, resultando en una reducción significativa del consumo de combustible y una disminución de los tiempos de secado. Estas mejoras, junto con la accesibilidad y el bajo costo del material, validan el EPS como una alternativa práctica para la optimización térmica en sistemas de secado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Disciplina de Poscosecha de Cenicafé por el acompañamiento técnico y la disponibilidad de las instalaciones, al Taller de Mecánica por el apoyo en la adecuación y mantenimiento del equipo experimental; y especialmente, a José Gilmar Carmona Villegas y Juan Sebastián Rivera Rodríguez por su colaboración durante el desarrollo de las pruebas y la recolección de datos. Esta investigación fue financiada por las acciones de investigación e innovación Horizonte EUSPA-2022-SPACE de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención n.º 101131859 (COMUNIDAD), en el marco del proyecto POS 103008.

REFERENCIAS

Abueluor AAA, Amin MT, Abuelnour MA and Younis O (2023) A comprehensive review of solar dryers incorporated with phase change materials for enhanced drying efficiency. Journal of Energy Storage 72: 108425. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108425

Ali A, Issa A and Elshaer A (2024) A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. Sustainability 16(20): Article 20. https://doi.org/10.3390/su16208782

Cenicafé (2024) Anuario (2023) Anuario Meteorológico Cafetero. https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/anuario_meteorologico/issue/view/2094

Duque-Dussán E, Bappah M, Sanz-Uribe JR and Nainggolan EA (2025) Thermo-Chemical Characterization of Coffee Husk from a New Variety (*Coffea arabica* L. var. Cenicafé 1) for Biofuel Production. Scientia Agriculturae Bohemica 56(1). https://doi.org/10.7160/sab.2025.560101

Duque-Dussán E, Sanz-Uribe JR and Banout J (2023) Design and evaluation of a hybrid solar dryer for postharvesting processing of parchment coffee. Renewable Energy 215: 118961. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118961

Duque-Dussán E, Villada-Dussán A, Roubik H and Banout J (2022) Modeling of Forced and Natural Convection Drying Process of a Coffee Seed. Journal of the ASABE 65(5): 1061-1070. https://doi.org/10.13031/ja.15156

Jokiniemi H, and Ahokas JM (2014) Effect of heat insulation on the energy consumption of recirculating mixed-flow batch grain dryer. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 16(3): 205-213.

Parra-Coronado A, Roa-Mejía G, Oliveros-Tascón CE and Sanz-Uribe JR (2017) Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino (Vol. 1). Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/libros/publicaciones_optimizacion_operacional_de_secadores_mecanicos_para_cafe

Peñuela-Martínez AE and Sanz-Uribe JR (2025) Evite el deterioro del grano manejando adecuadamente la temperatura del aire de secado. Avances Técnicos Cenicafé 1-8. https://doi.org/10.38141/10779/0576

Tyagi VV, Pathak SK, Chopra K, Saxena A, Kalidasan B, Dwivedi A, Goel V, et al (2024) Sustainable growth of solar drying technologies: Advancing the use of thermal energy storage for domestic and industrial applications. Journal of Energy Storage 99: 113320. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113320

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de la fermentación aerobia y anaerobia en el perfil sensorial del café (*Coffee arábica*) variedades Ombligón papayo, Bourbon rosado y Castillo

Evaluation of aerobic and anaerobic fermentation on the sensory profile of coffee(*Coffee arábica*) varieties Ombligón Papayo, Bourbon rosado and Castillo

Álvaro Fabian Molina Rivera[1], Fabian Aranda Yonda[2] and Edinson Mujica Rodríguez[3]

Palabras clave:
Café especial
Catacion
Perfil sensorial
Variedades de café

RESUMEN

Se realizó una comparación de 4 tratamientos en tres variedades de café (*Coffee arábica*) (Ombligón Papayo, Bourbon rosado y Castillo) con el fin de evaluar el perfil sensorial y el comportamiento de la fermentación aerobia y anaerobia de cada variedad; todos los tratamientos fueron sumergidos, el T1 aerobio, T2 anaerobio, T3 anaerobio con azúcar y el T4 anaerobio con levadura, lo cual correspondió a una unidad experimental factorial. Las cerezas fueron cosechadas en la finca La Palma (Pitalito, Huila), despulpadas, fermentadas y secadas en secadero solar. Posteriormente se realizó catación bajo el protocolo SCA El análisis estadístico de los datos arrojados por las pruebas de catación se realizó por medio del software STATGRAPHICS Centurion versión XVII, donde por medio de un análisis de varianza ANOVA simple con un nivel del 95,0% de confianza; se realizó la comparación individual de cada tratamiento con respecto a cada variedad, Para la variedad Ombligón Papayo, el tratamiento con mayor puntaje fue el T4 (85,62), mientras que en Bourbon Rosado y Castillo el tratamiento con mayor puntaje fue el T2 (85,79 y 85,54, respectivamente).

Keywords:
Specialty coffee
Cupping
Sensory profile
Coffee varieties

ABSTRACT

A comparison of 4 treatments was made in three coffee varieties (*Coffee arabica*) (Ombligón Papayo, Bourbon rosé and Castillo) in order to evaluate the sensory profile and the behavior of the aerobic and anaerobic fermentation of each variety; all treatments were submerged, T1 aerobic, T2 anaerobic, T3 anaerobic with sugar and T4 anaerobic with yeast, which corresponded to a factorial experimental unit. The cherries were harvested at the La Palma farm (Pitalito, Huila), pulped, fermented and dried in a solar dryer. Subsequently, cupping was carried out under the SCA protocol. The statistical analysis of the data obtained from the cupping tests was carried out using STATGRAPHICS Centurion version XVII software, where by means of a simple ANOVA analysis of variance with a 95.0% confidence level; An individual comparison was made of each treatment with respect to each variety. For the Ombligón Papayo variety, the treatment with the highest score was T4 (85.62), while in Bourbon Rosado and Castillo the treatment with the highest score was T2 (85.79 and 85.54, respectively).

[1]Semillero SIIBOASU, Universidad Surcolombiana, Garzon, Huila. Colombia. fabian16rivera20@gmail.com; fabiyonda@gmail.com; edinson.mujica@usco.edu.co

CC BY NC SA

Apesar de que la industria cafetera en Colombia cuenta con más de 76 años de generación de tecnologías y conocimientos aún persisten falencias en el control de los procesos postcosecha en finca, particularmente en el manejo de la fermentación del café. Esta etapa, esencial para la calidad sensorial del grano, se ve afectada por la falta de estandarización en tiempos, condiciones y técnicas, lo cual conlleva a defectos en taza, inconsistencias en el producto final, pérdidas económicas para los caficultores y desaprovechamiento de oportunidades en mercados especializados (Puerta 2015).

En este contexto, el departamento del Huila especialmente el municipio de Pitalito se consolida como un referente nacional e internacional en la producción de cafés especiales. Según La Alcaldía de Pitalito (2024) reporta que el municipio alberga más de 12.000 familias caficultoras, 13.000 fincas y 20.000 hectáreas cultivadas, lo que lo posiciona como el mayor productor de café del país y como la capital mundial del café especial. Esta relevancia regional resalta la necesidad de fortalecer y optimizar los procesos de fermentación, con el fin de obtener cafés con perfiles sensoriales más definidos y consistentes.

Por lo tanto, es indispensable definir procesos de fermentación estandarizados y diferenciados por variedad, que permitan obtener cafés de mayor calidad, con atributos sensoriales superiores y una producción más eficiente y sostenible. La falta de control sobre esta etapa genera una alta variabilidad en los resultados, afectando la calidad en cada lote de café. Por ello, es fundamental identificar los métodos de fermentación más idóneos que potencien las características sensoriales propias de cada variedad cultivada.

En este marco, el objetivo principal de esta investigación es determinar el comportamiento de la fermentación aerobia y anaerobia en las variedades de café Ombligón Papayo, Bourbon Rosado y Castillo, con el fin de establecer un método guía que permita aplicar un tratamiento específico para cada una de las variedades estudiadas y, así, mejorar la calidad sensorial y el valor comercial del producto final.

MATERIALES Y MÉTODOS

Basándose en el diseño experimental de Martínez Castro et al. (2022), se evaluó la calidad sensorial en taza para tres variedades de café: Ombligón Papayo, Bourbon rosado y Castillo, experimento realizado en la finca La Palma del municipio de Pitalito Huila. Donde se recolecto 5 kg de café cereza para cada tratamiento, dando un total de 20 kg cereza por cada variedad estudiada, esto con el fin de obtener cerca de 1 kg (café pergamino seco) por tratamiento para cada variedad. Estas cerezas fueron recolectadas en los meses de marzo, mayo y junio del 2025, recolectando 20 kg por pase para cada variedad. Partiendo de que cada recolección fue una repetición. Se recolectaron en total 36 muestras a las cuales se les realizó un análisis sensorial mediante dos catadores certificados Q grader. El diseño experimental comprendio un experimento multifactorial, donde los factores fueron 2: variedad (Ombligón papayo, Bourbon rosado y Castillo), con 4 niveles para el análisis: (T1, T2, T3 y T4). Los niveles corresponden a los tratamientos implementados para cada variedad donde el T1 corresponde al tratamiento testigo, el cual se benefició mediante prácticas tradicionales evaluando la fermentación aerobia, el T2 fue el mismo beneficio, pero se selló la caneca completamente dejando en la parte posterior una válvula para la expulsión de CO_2 evaluando la fermentación anaerobia, el T3, fue una fermentación anaerobia, con el mismo beneficio del T2 con fermentación anaerobia pero este fue alterado sus SST con azúcar hasta alcanzar los 10° Brix, y el T4 comprendido el mismo beneficio que el T2, con fermentación anaerobia, pero fue alterado con 20 gr de levadura (*Saccharomyces cerevisiae*). Los registros que se llevaron acabo en campo se realizaron al inicio y final por tratamiento, variedad y repeticion. Las variables que se midieron fueron temperatura, pH y Solidos Solubles Totales (Grados Brix). La evaluación sensorial de las muestras de café se realizó empleando el formato oficial de catación de la Specialty Coffee Association (SCA), el cual permite una valoración estructurada, objetiva y replicable del perfil en taza (Specialty Coffee Association, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Sensorial

Se compararon los atributos sensoriales de las 12 muestras de las tres variedades de café para cada uno de los 4 tratamientos. Se analizaron por medio de dos catadores profesionales los atributos de aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, uniformidad, balance, taza limpia, dulzor y un puntaje final de cada catador. Donde se obtuvieron

descriptores sensoriales por parte de cada catador, destacándose descriptores dulces, panela, melcocha, floral, con acidez y cuerpo medio.

Puntaje en taza

La Figura 1 muestra que, para la variedad Ombligón Papayo, el análisis de varianza (ANOVA) simple indicó que el tratamiento con mayor puntaje en taza fue el T4 (85,63), con límites de confianza del 95% entre 83,88 y 85,92. En la variedad Bourbon Rosado, se evidenció que el tratamiento T2 presentó el mejor desempeño, alcanzando un promedio de 85,79, mientras que el límite inferior se registró en el T3 (83,92) y el superior en T2 (86,08). Por su parte, en la variedad Castillo, el tratamiento T2 obtuvo el puntaje más alto (85,54), en contraste con el T1, que registró el menor valor T1 (83,81) y el maximo en T2 (85,31). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Flórez et al. (2016), quienes señalaron para la variedad castillo un puntaje cercano a 84,00, confirmando la consistencia de los valores obtenidos en esta investigación.

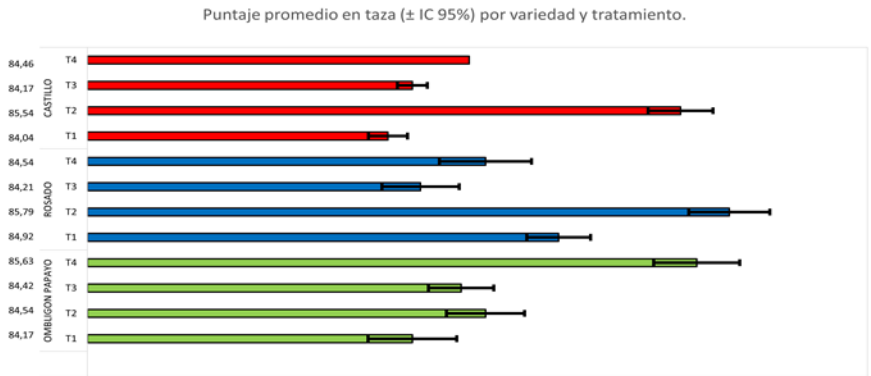


Figura 1. Puntaje promedio en taza (± IC 95%) por variedad y tratamiento.

CONCLUSIÓN

Se evidenció que las tres variedades (Ombligón Papayo, Bourbon Rosado y Castillo) presentaron condiciones iniciales similares de pH, °Brix y temperatura, pero mostraron comportamientos diferenciados durante la fermentación, influenciados por el tipo de tratamiento aplicado (aerobio o anaerobio) y la adición de levadura o azúcar.

Cada variedad expresó un perfil sensorial propio y coherente con sus características genéticas: Ombligón Papayo destacó por sus notas cítricas, florales y dulces, el Bourbon Rosado por sus matices florales, frutales y acidez brillante, y Castillo por su dulzor, equilibrio y complejidad aromática frutal y cítrica.

El tratamiento anaerobio sumergido con válvula sin aditivos (T2) fue estadísticamente superior ($P<0,05$) para las variedades Bourbon Rosado y Castillo, mientras que en la variedad Ombligón Papayo, el mejor desempeño se logró con el tratamiento anaerobio sumergido con levadura (T4), también con diferencias significativas.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería y a la Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social de la Universidad Surcolombiana, por el apoyo económico otorgado, el cual fue fundamental para la realización de este trabajo de investigación. Al señor José Ramiro Aranda, por abrirnos las puertas de su finca y permitirnos desarrollar la fase práctica de esta investigación. A la empresa Sequoias, por brindarnos el acceso a su laboratorio y por el respaldo técnico recibido. De manera especial, a su propietario y catador profesional Deiro García Botina, por compartir con nosotros su experiencia, conocimientos y consejos, convirtiéndose en un guía fundamental para alcanzar la calidad y solidez de este trabajo. Nuestro agradecimiento también para Ian Castañeda, asistente de laboratorio, por su apoyo constante y compromiso en cada etapa del análisis sensorial.

REFERENCIAS

Alcaldía Municipal de Pitalito. (2024, diciembre 4). Pitalito, un referente mundial en competitividad y café especial. Sede Electrónica de Pitalito. https://www.alcaldiapitalito.gov.co/publicaciones/4375/pitalito-un-referente-mundial-en-competitividad-y-cafe-especial/

Flórez R., C. P., Maldonado L., C. E., Cortina G., H. A., Moncada B., M. del P., Montoya R., E. C., et al (2016). Descripción de la variedad Cenicafé 1 (AVT0469). Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10779/0469

Martinez Castro, V. M., Rodríguez Valenzuela , J. J., and Roa Ramos , J. D. (2022). Evaluación del proceso de beneficio semiseco (Honey) en las variedades de Café (*Coffee arabica*) Castillo, Colombia y Caturra y su efecto en la calidad en taza. Ingeniería Y Región, 27, 6–11. https://doi.org/10.25054/22161325.3148

Puerta, G.I. (2015). Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad (Avance Técnico No. 2). Cenicafé.https://doi.org/10.38141/10779/0404

Specialty Coffee Association. (2024). What is Specialty Coffee? Recuperado de https://sca.coffee/research/what-is-specialty-coffee

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Evaluación del proceso de beneficio semiseco en las variedades de café (*Coffee arábica*) Castillo, Colombia y Caturra y su efecto en la calidad en taza

Semi-dry wet evaluation process in the varieties of coffee (*Coffee arábica*) Castillo, Colombia and Caturra and its effect on cup quality

Víctor Manuel Martínez Castro[1]*, John Jairo Rodríguez Valenzuela[1] and Juan David Roa Ramos[1]

Palabras clave:
Calidad sensorial
Frutos de café
Método de procesamiento

RESUMEN

Se realizó una comparación con respecto a la calidad en taza para tres variedades de café (*Coffee Arabica* L.), las cuales fueron procesadas mediante dos tipos de procesamiento de café: Húmedo (T1) y Semiseco (T2); lo cual correspondió a un experimento Factorial. Los frutos de café se cosecharon en dos diferentes pases con 20 días de diferencia. Las muestras se llevaron a una humedad dentro del rango de 10-12% en base húmeda, ubicadas en dos diferentes estructuras para el proceso de secado solar, donde las condiciones de humedad relativa y temperatura se monitorearon. Posteriormente, cada muestra se almacenó y luego se realizó el análisis sensorial. El análisis estadístico de los datos arrojados por las pruebas de catación se realizó por medio del software STATGRAPHICS Centurion XVII, donde por medio de un análisis ANOVA multifactorial con un nivel del 95,0% de confianza; se realizó la comparación de múltiples medias para todas las variables del experimento. La información registrada en esta investigación muestra que los tipos de beneficio del café estudiados no afectan el puntaje total en taza para las variedades estudiadas; por lo tanto, ambos tratamientos podrían definirse como cafés especiales según la clasificación propuesta por la SCAA.

Keywords:
Sensory quality
Coffee beans;
Processing method

ABSTRACT

A comparison was made of cup quality for three coffee varieties (Coffee Arabica L.), which were processed using two types of coffee processing: Wet (T1) and Semi-dry (T2); which corresponded to a Factorial experiment. The coffee berries were harvested in two different passes with 20 days apart. The samples were brought to a humidity within the range of 10-12% in wet base, located in two different structures for the solar drying process, where the relative humidity and temperature conditions were monitored. Subsequently, each sample was stored and then a sensory analysis was performed. The statistical analysis of the data yielded by the cupping tests was performed using STATGRAPHICS Centurion XVII software, where through a multifactorial ANOVA analysis with a 95,0% confidence level; the comparison of multiple means was performed for all the variables of the experiment. The information recorded in this research shows that the types of coffee processing studied do not affect the total cup score for the varieties studied; therefore, both treatments could be defined as specialty coffees according to the classification proposed by the SCAA.

[1] Universidad Surcolombiana, Pitalito, Huila, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7036-1376; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8706-4722; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7317-9310
*Corresponding author: victor.martinez@usco.edu.co

Desde la época en la cual se sembraron las primeras plantas de café en Colombia, hasta los tiempos contemporáneos, los caficultores se han preocupado por aumentar su producción y satisfacer la creciente demanda del grano colombiano. La especie (*Coffea arabica*. L) encontró en los suelos y el clima colombiano, y en la vocación agrícola de sus habitantes, el mejor lugar para adaptarse y así convertirse en la mejor aliada del desarrollo rural y en general, del país (Arcila et al. 2007). El procesamiento postcosecha define en gran medida la calidad del café, fundamentalmente en tres procesos diferentes: Seco o "Natural", Beneficio Húmedo y Semiseco "Honey". En el beneficio semiseco, la pulpa de la fruta es totalmente eliminada, dejando el grano cubierto con el mucílago, que se adhiere al grano durante el proceso de secado al sol o bajo techo (Parra *et al*. 2020). La bebida obtenida por esta ruta es suave, con intensos tostados, afrutados o aromas herbáceos dulces, amargor moderado, agradable acidez y una taza limpia. Sin embargo, si hay fallas en el despulpado, procesos de fermentación y secado del grano, la taza puede tener defectos como fermento, rancio, vinagre, mohoso, fenólico, terroso y sucio (Puerta, 2016).

El problema ambiental generalizado con el beneficio convencional del café, en términos de uso y contaminación del agua y producción de subproductos como la pulpa y el mucílago, ha venido generando investigaciones reflejadas en tecnologías, que buscan una producción sostenible y amigable con el ambiente, desarrollando investigaciones para optimizar el consumo de agua y aprovechamiento de los subproductos, sin embargo, el beneficio húmedo convencional del café (con todas las implicaciones) que ha sido arraigado por herencia, por costumbres y prácticas empíricas, se continua implementando, y lo que en gran parte se ha observado y refleja la realidad de las fincas cafeteras, específicamente con los pequeños y medianos agricultores, es que las tecnologías como aporte de la investigación, no son adoptadas, principalmente por los costos que representan y por otro lado por la falta de conciencia ambiental por parte del caficultor, y en general se ha podido observar temor a la adopción de nuevo conocimiento o falta de credibilidad, presentándose una gran oposición al cambio (Boyacá, 2018). En esta investigación se exploró la alternativa del tipo de procesamiento de café semiseco y su repercusión en la obtención de mayor puntuación taza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La ejecución del proyecto y la recolección de la materia prima se realizó en la finca Bellavista, ubicada en la vereda Pantanos del municipio Timaná Huila, con coordenadas geográficas 1°53'54,17" latitud norte y 75°58'8,92" longitud oeste y situado a 1.259 m.s.n.m.

Diseño del experimento

Se evaluó la calidad en taza de tres variedades de café: Castillo, Caturra y Colombia con edades de 2,0 2,3 y 2,0 años respectivamente, considerando1,0 kg de café pergamino seco (CPS) por variedad como unidad experimental obtenidas a partir de 5,0 kg de café cereza (CC) que se adquirió en 2 pases de cosecha, con diferencia de 20 días entre ellos, recolectando 10 kg/CC en cada pase por variedad, obteniendo 2 repeticiones por pase. Se recolectaron un total de 24 muestras a las cuales se le realizó un análisis sensorial. El diseño experimental para este trabajo se basó en un experimento multifactorial, donde los factores a tratar fueron 2: Variedad (F1) con 3 niveles, y tipo de beneficio (F2) con 2 niveles. Para el análisis de los atributos se emplearon 3 niveles, 2 ya mencionados y otro (F3) con 10 niveles. Para F2 los niveles corresponden a dos tipos de beneficio de café; denominado el tratamiento testigo (T1) describe las muestras de café a las cuales se beneficiaron mediante prácticas tradicionales según la metodología utilizada por el propietario de la finca (beneficio húmedo) y el tratamiento 2 (T2) describe a las muestras de café que se han secado con la totalidad o parte del mucílago (beneficio semiseco).

Diagrama de flujo metodológico

La variable de respuesta de esta investigación fue la calidad en taza, además se midieron otras covariables como pH, Sólidos solubles totales (SST) medidos en grados brix (°Brix), Temperatura de secado (°C) y Humedad relativa del secador solar como lo muestra el siguiente diagrama de flujo.

Análisis sensorial

Este proceso se llevó a cabo siguiendo la metodología (SCAA, 2015) para cata de cafés especiales, este fue llevado a cabo por un grupo de tres panelistas entrenados en las instalaciones del Centro Surcolombiano de Investigación de café CESURCAFE.

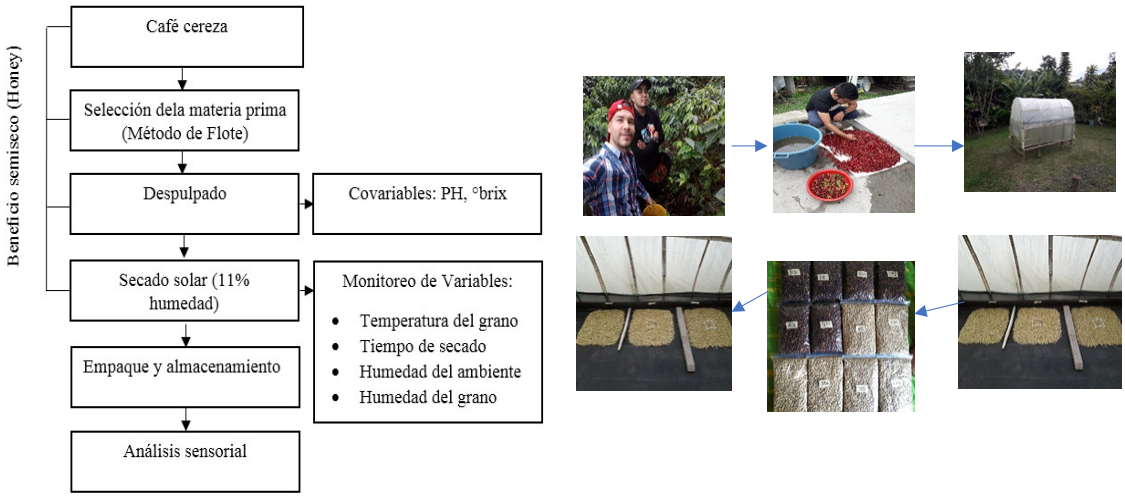


Figura 1. Diagrama de flujo ilustrativo para la metodología en el desarrollo del experimento.

Análisis FTIR

Se realizó un estudio de espectroscopia infrarroja (FTIR) mediante el espectrómetro ART-FTIR CARY 630 marca Agilent (santa clara, CA, EE. UU) de apertura óptica de 25 mm y reflectancia especular de 10 °, entre las longitudes de onda desde 3.200 hasta 600 (cm^{-1}) con una resolución de 4 cm^{-1} y 20 escáneres para café tostado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de covariables

En términos generales se encontró que los frutos de café cosechados de las tres variedades se encontraban en un estado de maduración óptimo, El promedio de pH se asemeja a los encontrados por (Córdoba and Guerrero, 2016) para las variedades Castillo y Caturra y por (Ramos and Criollo, 2017) para la variedad Colombia, además, en esta investigación se encontró que los valores de temperatura no alcanzaron temperaturas mayores a 45 °C y que para el T2 las temperaturas no alcanzaron los 40 °C que se recomienda para el secado de cafés especiales.

Análisis sensorial

Mediante un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial con 95% de confianza, se encontraron diferencias significativas para los atributos acidez, sabor, aroma, cuerpo y taza limpia (Figura 2), además, se obtuvieron algunos descriptores por parte del panel que destacan aromas dulces, cítricos y herbales, los cuales se interpretaron mediante el análisis FTIR (figura 3) donde el espectro puede atribuir a la presencia de lípidos y diferentes Grupos funcionales que incluyen ácidos alifáticos, aromáticos, aldehídos, cetonas y lactonas, todos los cuales son compuestos que dan diferentes aromas al café, convirtiéndolo en un importante región del espectro (Craig et al. 2012).

Puntaje en taza

Se analizó el puntaje final en taza de las muestras de café mediante ANOVA para las variedades Castillo, Colombia y Caturra para T1 y T2, este análisis arrojó que el valor-P es superior a 0,005 lo que significa que no se presentaron diferencias significativas entre las variedades y su tipo de tratamiento. La mejor puntuación de calidad en taza se obtuvo en la variedad Castillo como se expone en la figura 4, con un puntaje de 83,47, y con diferencias de 2,62 y de 1,47 para las otras variedades respectivamente. Para T2, se evidenció una diferencia numérica del puntaje de taza entre las variedades de café, mostrando que el mejor puntaje fue alcanzado por la variedad castillo con una puntuación de 82,87, con diferencias de 0,72 puntos con respecto a la variedad Colombia y de 0,31 puntos con respecto a la variedad caturra. Todas las muestras de esta investigación están dentro del rango de cafés especiales y se clasifican como Muy Bueno según la clasificación propuesta por la SCAA (2015).

FORMATO ECUACIONES, FIGURAS Y TABLAS

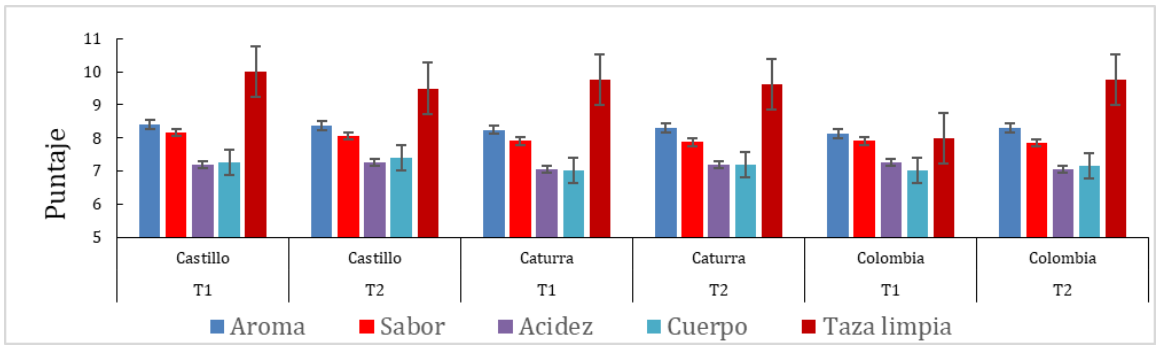


Figura 2. Atributos por tratamiento.

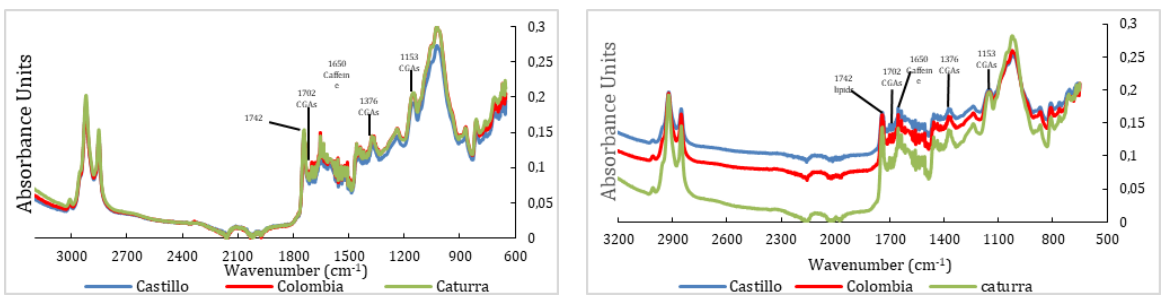


Figura 3. Datos arrojados por Análisis FTIR para T1 y T2.

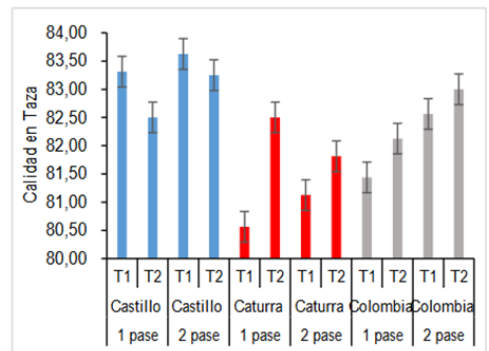


Figura 4. Diferencias entre tratamientos por variedad y pase.

CONCLUSIÓN

Entre los tratamientos de beneficio húmedo (T1) y semiseco (T2) el tipo de procesamiento del café empleado y la variedad cultivada, no tienen efecto estadísticamente hablando sobre la obtención de puntos en las pruebas de calidad en taza, sin embargo los datos obtenidos para las variedades Colombia y Caturra muestran numéricamente puntajes más altos en calidad en taza para T2 con respecto a T1, lo que puede llegar a ser representativo o determinante en diferentes escenarios como concursos, obteniendo un mayor valor económico.

Entre los tratamientos de T1 y T2 el tipo de procesamiento del café no tiene efecto sobre las propiedades químicas del café tostado, Se llegó a la conclusión que la mejor variedad para obtener mejor puntaje en taza aplicando cualquiera de los dos tipos de procesamiento de café es la variedad Castillo, ya que esta variedad obtuvo un mayor

puntaje numérico en las pruebas de calidad en taza con respecto a Caturra y Colombia.

Se observó que los puntajes más altos en las pruebas de taza se obtuvieron en el segundo pase de cosecha para la mayoría de las muestras. En cuanto al desarrollo del experimento realizado en la finca Bellavista se podría recomendar al caficultor, utilizar el tratamiento de postcosecha semiseco para optimizar la producción de café de buena calidad, debido que, al reducir el uso de agua en el lavado del grano, contribuye a la protección del recurso hídrico al disminuir la contaminación; ahorra labores, tiempo y dinero. De la misma forma con el productor tiene la oportunidad de participar en los mercados de cafés especiales. Esta investigación se puede replicar en otras fincas con el fin de incentivar a los cafeteros a mejorarla calidad de su café mediante estas prácticas de postcosecha para obtener cafés de alta calidad y comercializarlo a buenos precios.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social de la Universidad Surcolombiana por los recursos aportados. Al centro Surcolombiano de investigación de café CESURCAFE por la disposición y préstamo de sus instalaciones. Al señor Hermides Roa Triana y Esposa por la disposición de su finca para extraer la materia prima de este experimento.

REFERENCIAS

Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A., Salazar, L., and Hincapié, E. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia .Chinchiná, Caldas: FNC-Cenicafé

Boyacá, L. A. (2018). Estudio exploratorio de la obtención de café verde mediante beneficio Honey y la determinación de su calidad en tasa.Bogotá, Colombia : Universidad Nacional de Colombia

Córdoba, N., and Guerrero, J. (2016). Caracterización de los procesos tradicionales de fermentación de café en el departamento de nariño. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 75-81. https://doi.org/10.18684/BSAA(14)75-83

Craig, A. P., Franca, A. S., and Oliveira, L. S. (2012). Evaluation of the potential of FTIR and chemometrics for separation between defective and non-defective coffees. Food Chemistry 1368-1374. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.121

Parra, A., García, O., Vanegas, F., Gamboa, J., and Gonzalez, A. R. (2020). Preliminary study of drying of natural coffee by cyclical pressure changes. Revista DYNA, 53-60. DOI:10.15446/dyna.v87n214.83414

Puerta, G. (2016). Calidad física del café de varias regiones de Calidad física del café de varias regiones de Calidad física del café de varias regiones de. Cenicafé, 7-40

Ramos, L. J., and Criollo, H. (2017). Calidad física y sensorial de Coffea arábica L. variedad Colombia, perfil Nespresso AAA, en La Unión, Nariño. Revista de Ciencias Agrícolas, 83-97 https://doi.org/10.22267/rcia.173402.7

SCAA. (16 de Diciembre de 2015). Cupping Specialty Coffee .Obtenido de SCAA Protocols: http://www.scaa.org/PDF/resources/cupping-protocols.pdf. Consultado el 19 de Enero de 2022

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Análisis sensorial en café colombiano procesado por vía natural

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Sensory analysis of naturally processed colombian coffee

Nicolás García Rodríguez[1,2] and Robinson Osorio Hernández[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Azúcares
Café natural
Calidad sensorial
Caudal
Poscosecha
Secado

El presente estudio evaluó la influencia de los parámetros de secado sobre las propiedades del café natural, encontrando que cada variable responde de manera distinta a las condiciones aplicadas. El caudal se identificó como un factor crítico en la calidad sensorial y en la dinámica de concentración y formación de azúcares, con umbrales cercanos a 1.9 e^{-2} m^3 s^{-1} que marcan el inicio de la degradación de atributos relevantes. Sin embargo, los modelos explicaron solo entre el 32% y 42% de la variabilidad observada, lo que evidencia la incidencia de otros factores no controlados, como los procesos poscosecha previos o las características fisicoquímicas propias del fruto, relacionadas posiblemente con su variedad o lugar de origen. Estos resultados resaltan la necesidad de considerar el secado no como una operación aislada, sino como parte de una cadena integrada de manejo poscosecha que condiciona la calidad final del producto.

ABSTRACT

Keywords:
Sugars
Natural coffee
Sensory quality
Airflow
Postharvest
Drying

This study evaluated the influence of drying parameters on natural coffee properties, showing that each variable responds differently to the applied conditions. Airflow rate was identified as a critical factor for sensory quality and sugar concentration and formation, with thresholds around 1.9 e-2 m^3 s^{-1} marking the onset of key attribute degradation. Nevertheless, the models explained only 32–42% of the observed variability, highlighting the role of uncontrolled factors such as previous postharvest practices or the fruit's physicochemical characteristics, possibly linked to its variety or origin. These findings emphasize the need to address drying as part of an integrated postharvest management chain that determines the final quality of the product.

[1]Instituto Técnico Central (ETITC), Facultad de Mecánica, Bogotá, Colombia.
[2]Depto. de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. rosorioh@unal.edu.co

CC BY NC SA

El café colombiano es reconocido internacionalmente, pero enfrenta desafíos derivados del cambio climático, la degradación ambiental y la volatilidad de precios (Rodríguez et al. 2015). Como alternativa sostenible existe el beneficio seco o café natural que reduce significativamente el consumo hídrico y la contaminación frente al beneficio húmedo (Puerta Quintero 2013).

Este método consiste en secar la cereza completa, lo que disminuye el impacto ambiental y favorece perfiles sensoriales más complejos y con mayor dulzura, lo que mejora la diferenciación en mercados premium (Gallego et al. 2023).

En los procesos poscosecha, la fermentación y el secado son determinantes. La fermentación transforma azúcares y compuestos orgánicos en alcoholes, ácidos y volátiles que definen la calidad sensorial (Puerta Quintero and Echeverry Molina 2015). El secado es la etapa más crítica, en esta se reduce la humedad del grano al rango del 10–12% bh, lo que permite el almacenamiento seguro y la preservación de atributos sensoriales (Puerta Quintero 2013).

En Colombia, este proceso se realiza por medio del secado natural o solar, frecuente en fincas menores de 5 ha (Puerta Quintero 2008a); o de manera mecánica, que es propio de fincas medianas o grandes, con mayor uniformidad y menor tiempo; se destacan los silos secadores y, más recientemente, equipos con deshumidificación (Largo-Avila et al. 2023).

El control de temperatura y flujo de aire resulta determinante en la calidad final. El secado por convección forzada requiere mantener temperaturas menores a 60 °C para evitar daños en el grano, siendo 50°C o menos el rango recomendado para conservar compuestos aromáticos y prevenir micotoxinas (Santos and Santana 2024).

Además de su efecto sensorial, estos procesos influyen en parámetros como pH y grados Brix, asociados a acidez y dulzura: cafés de alta calidad alcanzan hasta 25 °Brix frente al promedio de 15 (Silva et al. 2014). La calidad se determina principalmente mediante el puntaje de taza —evaluación sensorial certificada según protocolo SCAA— (ConCafé 2023), aunque se propone complementarla con la medición de grados Brix en la bebida.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó café variedad Caturra de la finca Las Piñas (Municipio de Ibagué), seleccionado tras la mitaca en estado subóptimo, lo que permitió evaluar el potencial del beneficio seco para mejorar su perfil sensorial y agregar valor a cultivares usualmente considerados fuera del rango de cafés especiales. El experimento se estructuró con un Diseño Factorial 2^2, considerando como factores la temperatura (45 y 55 °C) y el flujo de aire (0.016 y 0.022 m^3h^{-1}) en el secador, con tres réplicas por tratamiento para un total de 12 corridas.

La estructura experimental se presenta en la Tabla 1, de acuerdo con lo mencionado sobre el tema en (Montgomery 2001).

Tabla 1. Diseño experimental.

#	x	y	T (°C)	Q (m^3h^{-1})
1	-1	-1	45	0.016
2	1	-1	55	0.016
3	-1	1	45	0.022
4	1	1	55	0.022

Fuente: Propia

Las variables respuesta fueron el puntaje de taza (evaluado por catador certificado bajo protocolo SCAA), y los grados Brix según Puerta Quintero (2008b). El café se sometió a fermentación sólida durante 72 horas, y posteriormente se secó y tostó. Todos los procesos poscosecha, a excepción de la prueba sensorial, se realizaron en el Laboratorio de Poscosecha de Granos y Semillas de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá con los equipos necesarios (secador por convección forzada y refractómetro).

El análisis estadístico incluyó ANOVA y regresión, donde el coeficiente de determinación (R^2) cuantificó la varianza explicada (Haaland 1989). Además, se aplicaron comparaciones múltiples y validaciones de supuestos de independencia, normalidad y homocedasticidad para garantizar la robustez de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta la tabla con los resultados obtenidos del diseño experimental y cada una de sus variables en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del experimento.

#	T (°C)	Q (m^3h^{-1})	x	y	Taza	°B
1					86.0	0.9
2	45	0.016	-1	-1	86.3	1.1
3					84.5	1.2
4					84.5	0.9
5	55	0.016	1	-1	84.3	1.0
6					85.0	0.9
7					83.3	0.9
8	45	0.022	-1	1	86.0	0.8
9					83.8	0.8
10					81.0	0.7
11	55	0.022	1	1	83.8	0.9
12					83.5	0.9

Fuente: Propia

Los resultados sensoriales (Figura 1) evidencian que una temperatura de 45 °C y un caudal de 1.6×10^{-2} m^3 s^{-1} favorecen perfiles de taza superiores, con menor dispersión en los puntajes. En contraste, los niveles altos de ambos factores reducen la calidad, probablemente por degradación térmica de compuestos aromáticos o defectos derivados de una deshidratación acelerada. No obstante, las diferencias entre medias son poco marcadas, sobre todo en el caso de la temperatura, y el café mantiene su clasificación como de especialidad.

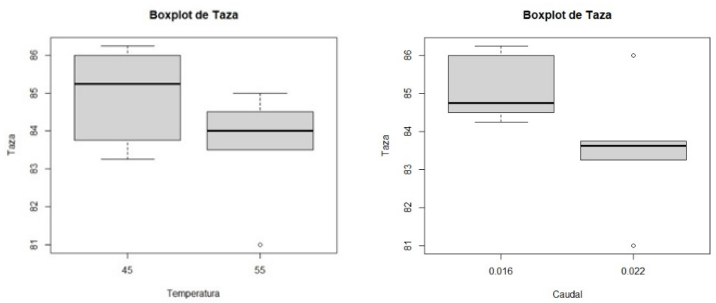


Figura 1. Boxplot de puntaje de taza por a) Temperatura y b) Caudal (Elaboración propia).

Por su parte, la temperatura mostró un efecto limitado sobre las medianas de la concentración de Grados Brix (Figura 2), aunque con mayor variabilidad a 45 °C, lo que sugiere una preservación diferencial de azúcares según las condiciones de secado. El caudal presentó un efecto más definido, con mayores concentraciones de sólidos solubles a 0.016 m^3 s^{-1}, pero con amplia dispersión, frente a valores más estables, aunque inferiores a 0.022 m^3 s^{-1}. En conjunto, los resultados indican que el caudal influye principalmente en la cinética de transferencia de masa, sin alterar de manera significativa el equilibrio final de humedad.

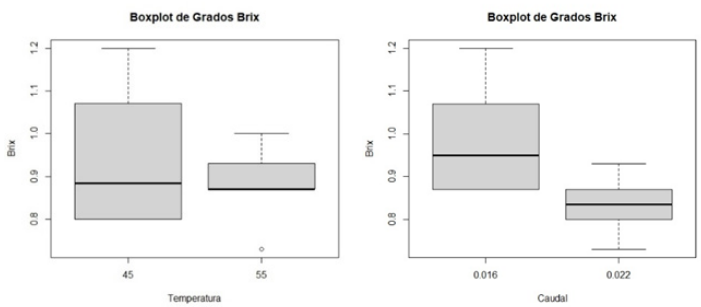


Figura 2. Boxplot de grados Brix por a) Temperatura y b) Caudal (Elaboración propia).

A partir de la se calcularon los ANOVA, evidenciando que el puntaje de taza presentó incidencia significativa solo por el caudal (p-valor = 0.0523), mientras que los grados Brix también se vieron afectados únicamente por este factor (p-valor = 0.031), en concordancia con los boxplot previos. La prueba de Tukey confirmó este resultado, indicando efecto significativo únicamente del caudal. Las pruebas de hipótesis arrojaron p-valores >0.05 en normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (Bartlett), mientras que los gráficos de Residuos vs. Ajustados no mostraron tendencias, validando los supuestos estadísticos. Con ello fue posible proceder al modelado mediante ANOVA, cuyos resultados de parámetros y análisis de varianza se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4 y las superficies de respuesta en la Figura 3 ya que los modelos tienen significancia (p-valor <0.05).

Tabla 3. Estimación de parámetros para prueba de taza.

Factor	Estimado	Error Estándar	t	p-valor
Intercepto	84.31250	0.32282	261.1723	< 2e-16***
X_1	-0.64583	0.32282	-2.0006	0.07648
X_2	-0.77083	0.32282	-2.3878	0.04070*

Fuente: Propia
R^2: 0.5188, R^2 ajustado: 0.4119
Ecuación del modelo: Puntaje de taza (y_1) = 84.31250 – 0.77083 X_2

Tabla 4. Estimación de parámetros para grados Brix.

Factor	Estimado	Error Estándar	t	p-valor
Intercepto	0.909167	0.030562	29.7484	2.677e-10***
X_1	-0.030833	0.030562	-1.0089	0.33938
X_2	-0.075833	0.030562	-2.4813	0.03492*

Fuente: Propia.
R^2: 0.4436, R^2 ajustado: 0.3199
Ecuación del modelo: Grados Brix (y_2) = 0.909167 – 0.075833 X_2

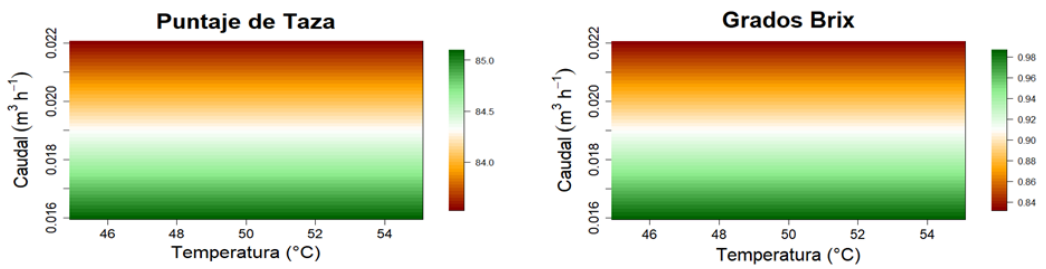


Figura 3. Superficies de respuesta para a) Puntaje de taza y b) Grados Brix (Elaboración propia).

El modelo de regresión evidencia que solo el caudal de aire tiene un efecto significativo sobre el puntaje de taza, mostrando que su incremento reduce de manera sistemática la calidad sensorial, aunque el café aún se clasifica dentro de las categorías de "muy bueno" (ConCafé 2023). El R^2 ajustado de 0.4119 indica que el modelo explica aproximadamente el 42% de la variabilidad de los datos experimentales, lo que sugiere la influencia de otras variables no consideradas, como los procesos poscosecha previos o las condiciones ambientales.

El modelo para grados Brix mostró que solo el caudal de aire (X_2) tuvo efecto significativo, mientras que la temperatura no influyó. Esto coincide con ANOVA y Tukey, donde un mayor caudal redujo levemente los sólidos solubles. El R^2 ajustado fue 0.3199, indicando que el 32% de la variabilidad se explicó por el caudal.

El valor moderado sugiere influencia de otros factores, como tipo y tiempo de fermentación. La concentración de azúcares resultó menor a la reportada por Puerta Quintero (2013) para la variedad Caturra.

CONCLUSIÓN

El estudio demuestra que los parámetros de secado afectan de manera distinta cada propiedad del café. El caudal es determinante para la calidad sensorial y concentración y formación de azúcares, con umbrales críticos en aproximadamente 0.019 $m^3 s^{-1}$ que marcan la degradación de atributos clave. Estas variables explican solo parcialmente los resultados (R^2: 32-42%), revelando la influencia de factores externos como procesos poscosecha previos o características fisicoquímicas del fruto que podrían estar asociadas a su variedad o lugar de origen. El hallazgo de la influencia del caudal en ambas variables demuestra la importancia de este parámetro y los niveles seleccionados para el desarrollo de modelos de secado para café natural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Técnico Central y a la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

ConCafé (2023) Calificación SCA: Así se evalúa un café de especialidad. In: ConCafé. https://concafe.es/calificacion-sca-cafe-de-especialidad/. Accessed 27 Aug 2024

Gallego CP, Imbachí LC, Osorio V (2023) Influencia del proceso de secado del café natural en las características físicas del grano y la calidad sensorial. Revista Cenicafé 74:e74107. https://doi.org/10.38141/10778/74107

Haaland PD (1989) Experimental Design in Biotechnology. Marcel Dekker, New York

Largo-Avila E, Suarez-Rodríguez CH, Montero JL, et al (2023) The influence of hot-air mechanical drying on the sensory quality of specialty Colombian coffee. AIMS Agriculture and Food 8:789–803. https://doi.org/10.3934/AGRFOOD.2023042

Montgomery DC (2001) Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, New York

Puerta Quintero GI (2013) Calidad del café

Puerta Quintero GI (2008a) Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado

Puerta Quintero GI (2008b) Calidad en taza de mezclas preparadas con granos de Coffea arabica L. y C. canephora. Cenicafé 59:183–203

Puerta Quintero GI, Echeverry Molina JG (2015) Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor al café. Ciencia, tecnologia e innovación para la caficultura colombiana 12

Rodríguez N, Sanz J, Oliveros C, Ramirez C (2015) Beneficio del café en Colombia. Prácticas y estrategias para el ahorro y el uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café

Santos LD, Santana RC (2024) Physicochemical and sensory properties of Arabica Coffee beans of Arara cv. Dried using different methods. Foods 1–17

Silva S de A, de Queiroz DM, Pinto F de AC, Santos NT (2014) Coffee quality and its relationship with Brix degree and colorimetric information of coffee cherries. Precis Agric 15:543–554. https://doi.org/10.1007/s11119-014-9352-y

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Desarrollo de productos agroindustriales de mora (*Rubus glaucus*), fresa (*Fragaria ananassa*), mortiño (*Vaccinium meridionale*) y auyama (*Cucurbita maxima*)

Development of agroindustrial products of blackberry (*Rubus glaucus*), strawberry (*Fragaria ananassa*), mortiño (*Vaccinium meridionale*) and squash (*Cucurbita maxima*)

Leidy Johana Gómez Urrego[1] and Carlos Julio Márquez Cardozo[2]

RESUMEN

Se evaluó el potencial de la mora, fresa, mortiño (frutos rojos) y auyama para el desarrollo de productos agroindustriales innovadores. Se formularon tres desarrollos principales: vino de frutos rojos endulzado con panela, mermeladas con distintas proporciones de auyama y frutos rojos, y galletas de mantequilla elaboradas con harinas de estas frutas deshidratadas. Los resultados evidenciaron que, en mermeladas adicionar el 10% de pulpa fresca antes del envasado refuerza el aroma y la calidad sensorial; destacó el tratamiento con una participación del 90% de auyama ya que presentó una textura más firme debido a su alto contenido de fibra. En galletas los tratamientos con mayor participación de mora presentaron acidez moderada, mientras que los de auyama presentaron más dulzor. Para la formulacion de vinos se reemplazo el azúcar por panela la cual aporto minerales y polifenoles que enriquecieron la complejidad sensorial. El vino semidulce alcanzó un mayor contenido de etanol (13%), mientras que el vino seco obtuvo un 11%.

Palabras clave:
Acidez
Galletas
Mermelada
Polifenoles
Vino

ABSTRACT

The potential of blackberries, strawberries, mortiño berries (red fruits), and pumpkin for the development of innovative agro-industrial products was evaluated. Three main developments were formulated: red fruit wine sweetened with panela, jams with different proportions of pumpkin and red fruits, and butter cookies made with flours from these dehydrated fruits. The results showed that, in jams, adding 10% fresh pulp before packaging enhances the aroma and sensory quality. The treatment with 90% pumpkin stood out, as it had a firmer texture due to its high fiber content. In cookies, the treatments with a higher proportion of blackberry had moderate acidity, while those with pumpkin were sweeter. For the formulation of wines, sugar was replaced by panela, which provided minerals and polyphenols that enriched the sensory complexity. The semi-sweet wine achieved a higher ethanol content (13%), while the dry wine obtained 11%.

Keywords:
Acidity
Cookies
Jam
Polyphenols
Wine

[1]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. email: legomezu@unal.edu.co
[2]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. email: cjmarque@unal.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0106-6875

CC BY NC SA

El creciente interés por alimentos de calidad y con beneficios para la salud ha impulsado la demanda de productos funcionales, aquellos que además de aportar nutrientes contienen compuestos bioactivos, antioxidantes, vitaminas y fibra (Mathew T Baker, 2022). En este contexto, frutas como la mora de castilla (*Rubus glaucus* B.), el mortiño (*Vaccinium meridionale* Sw.) y la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.), junto con la auyama (*Cucurbita moschata* Duch.), representan materias primas promisorias para la agroindustria gracias a su riqueza nutricional y versatilidad en la transformación.

Las mermeladas, los vinos artesanales y las galletas constituyen productos de amplia aceptación que al incorporar estas materias primas, pueden ofrecer alternativas innovadoras y más saludables. Por ejemplo, la auyama aporta carotenoides y fibra, mientras que los frutos rojos son ricos en antocianinas y compuestos fenólicos, lo que potencia sus características funcionales (Franco, 2022). En este marco, surge la pregunta de investigación: ¿es posible formular productos transformados a base de mora, mortiño, fresa y auyama que conserven sus propiedades funcionales y resulten atractivos para el consumidor? La hipótesis plantea que su incorporación en mermeladas, galletas y vinos, permite obtener alimentos innovadores con potencial de aceptación. Por tanto, el objetivo general es formular y evaluar estos productos resaltando sus características organolépticas y nutricionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en los laboratorios de Frutas y Hortalizas y Panificación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, bajo condiciones de higiene y cumpliendo con las buenas prácticas de manufactura. Se emplearon como materias primas moras, fresas, mortiño y auyama.

Para los 3 desarrollos se emplearon: cuchillos, tabla de picar, jarras, cucharas, recipientes de cocina.

Formulación y desarrollo de mermeladas

Se emplearon: Estufa, balanza de precisión, refractómetro, bureta, beaker, hidróxido de sodio (NaOH), fenolftaleína, pectina, termómetro, medidor de pH, tamiz, agitador y frascos para almacenamiento.

Se formularon cuatro tratamientos de mermeladas (750 g de pulpa cada uno), variando las proporciones de frutos rojos y auyama (Tabla 1).

Tabla 1. Participación y formulación de cada tratamiento.

Tratamiento	Frutos Rojos	Auyama (g)	Total Pulpa	Pectina (g)	°Bx Objetivo
Mermelada con 90% de Auyama 10% de Frutos Rojos	75 g	675 g	750 g	11.02 g	68 °Bx
Mermelada con 90% de Frutos Rojos y 10% de Auyama	675 g	75 g	750 g	11.02 g	68 °Bx
Mermelada con 50% de Frutos Rojos y 50% de Auyama	375 g	375 g	750 g	11.02 g	68 °Bx
Mermelada con 85% de Frutos Rojos y 15% de Auyama	637.5 g	112.5 g	750 g	11.02 g	68 °Bx

Cada tratamiento incluyó 11,02 g de pectina (1,2% de la pulpa total) y azúcar para alcanzar un °Bx final de 68.

Cocción inicial: se calentó el 90% de la pulpa (675 g) durante 15 min a temperatura controlada, con agitación constante.

Adición de azúcar: se incorporó la primera mitad del azúcar (551 g), alcanzando 45 °Bx tras 20 min de cocción.

Adición de pectina y azúcar restante: se agregaron 11,02 g de pectina y 551 g de azúcar hasta alcanzar 68 °Bx.

Adición de pulpa reservada (10%): se incorporaron 75 g de pulpa para preservar frescura y mejorar el perfil sensorial.

Envasado: el producto final se envasó en bolsas plateadas herméticas, con el fin de protegerlo de la luz y el aire.

Formulación y desarrollo de galletas de mantequilla con adición de harina de mora y auyama

Se empleó: harina de trigo, harina de mora, harina de

auyama, azúcar refinada, margarina, huevos, sal y polvo de hornear. Se utilizaron además batidora eléctrica, bandejas, moldes, horno, rodillo y papel film.

Se elaboraron cuatro tratamientos variando la proporción de harinas de frutas. Cada tratamiento mantuvo constantes los demás materiales según la formulación estándar (Tabla 2).

Tabla 2. Formulación y porcentaje de ingredientes por tratamiento.

Materiales	Tratamiento 1 (10% harina de mora)	Tratamiento 2 (3% harina de auyama, 7% harina de mora)	Tratamiento 3 (10% harina de auyama)	Tratamiento 4 (5% harina de auyama, 5% harina de mora)
Huevo	1 unidad	1 unidad	1 unidad	1 unidad
Sal	1 g	1 g	1 g	1 g
Polvo para hornear	1 g	1 g	1 g	1 g
Harina de mora	10 g	7 g	0 g	5 g
Harina de auyama	0 g	3 g	10 g	5 g
Harina de trigo	190 g	190 g	190 g	190 g
Azúcar triple X	100 g	100 g	100 g	100 g
Margarina	100 g	100 g	100 g	100 g

Batido inicial: se mezcló margarina a temperatura ambiente con azúcar durante 5 minutos, incorporando aire a la masa.

Incorporación de huevos: se añadieron de manera individual, batiendo hasta lograr homogeneidad.

Mezcla seca: se tamizó harina de trigo, sal y polvo de hornear, reemplazando una fracción de harina de trigo por harina de frutas según el tratamiento.

Formación de masa: se incorporó la mezcla seca gradualmente hasta obtener una masa uniforme.

Reposo: la masa se cubrió y refrigeró por 1 hora para mejorar consistencia y manejabilidad.

Moldeo y horneado: la masa se extendió a 5 mm de grosor, se cortaron galletas con moldes y se hornearon a 180 °C por 15 minutos.

Enfriamiento y almacenamiento: las galletas se dejaron reposar en rejillas y se envasaron en recipientes herméticos.

Se registraron los pesos de ingredientes, proporciones de formulación y condiciones de horneado. Posteriormente, las galletas fueron evaluadas en sus características organolépticas (textura, sabor, color y aroma), lo que permitió comparar la influencia de cada formulación.

Vino de frutos rojos (mora, fresa y mortiño), endulzado con panela.
Se empleó: Panela, agua y levadura, además licuadora, microondas, refractómetro y envases con trampa de CO_2.

Vino seco: 1,5 kg de fruta, 0,625 kg de panela, 0,875 kg de agua y 9 g de levadura.

Vino semidulce: 1,5 kg de fruta, 0,725 kg de panela, 0,725 kg de agua y 9 g de levadura.
Ambos tratamientos se ajustaron para alcanzar valores óptimos de °Brix y pH antes de la fermentación.

Preparación de materia prima: las frutas se seleccionaron, lavaron, trocearon y licuaron para obtener la pulpa.

Formulación del mosto: la pulpa se mezcló con agua y panela previamente disuelta. Se midieron °Brix y pH, realizando ajustes si era necesario.

Activación de la levadura: se hidrató en una porción de mosto y se activó con calor suave (30 segundos en microondas). Posteriormente se incorporó al mosto.

Fermentación primaria: el mosto se depositó en envases con trampa de CO_2 y se dejó fermentar durante 3 semanas, evitando el ingreso de oxígeno.

Trasiego y clarificación: una vez finalizada la fermentación, se separó el vino del sedimento y se transfirió a un segundo recipiente, donde se dejó reposar varias semanas para facilitar la sedimentación residual.

Se registraron las cantidades de ingredientes, pH inicial, ° Brix y parámetros de fermentación. Posteriormente se caracterizó cada vino en términos de pH y contenido de alcohol, obteniendo valores de 3,2 y 11% para el vino seco (25° Brix) y de 3,3 y 13% para el vino semidulce (30° Brix) (Tabla 3).

Tabla 3. Caracterización de vinos.

Tipo de Vino	pH	Alcohol
Vino Seco (25° Brix)	3.2	11%
Vino Semidulce (30° Brix)	3.3	13%

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mermeladas. Se elaboraron cuatro formulaciones de mermeladas a base de pulpa de frutos rojos y auyama, ajustadas a 68 °Brix con adición de pectina y azúcar en dos etapas (Tabla 1). La pectina permitió una gelificación adecuada, favorecida por el pH y el azúcar. El tratamiento con mayor proporción de auyama (90 %) presentó textura más firme, atribuida a su alto contenido de fibra (Cardozo, Gutierrez, & Hernandez, 2019) mientras que las formulaciones con más frutos rojos mostraron coloraciones rojo-vinosas intensas por el aporte de antocianinas, especialmente de mora y mortiño (Mathew T Baker, 2022).Los tonos variaron entre anaranjados (mayor auyama) y violáceos (más frutos rojos), aspecto relevante en la aceptación del consumidor (Franco, 2022), donde la mermeladas que presentaron tonos violaceos tuvieron mayor aceptación en terminos de color. Nutricionalmente, la combinación de carotenoides y compuestos fenólicos confiere alto contenido antioxidante, posicionando el producto como funcional. La adición de 10 % de pulpa fresca antes del envasado reforzó aroma y calidad sensorial, esto siendo una de las principales innovaciones en la formulación de mermeladas; adicionalmente incluir productos poco convecionales como la auyama brinda una mayor diversidad en el mercado de productos gelificados. En conclusión, se obtuvieron mermeladas estables con diferencias notables en color y textura, evidenciando el potencial innovador de la auyama en productos procesados.

Galletas. Se elaboraron cuatro tratamientos de galletas sustituyendo hasta un 10% de harina de trigo por harina de mora y/o auyama (Tabla 2), horneadas a 180 °C durante 15 min. El tratamiento 1 (10% mora) presentó tono violáceo y aroma frutal; el 2 (3% auyama, 7% mora), un color intermedio y sabor equilibrado; el 3 (10% auyama), color claro y notas dulces; y el 4 (5% auyama, 5% mora), un color mixto con balance sensorial, ya que tanto el dulzor de la auyama como la acidez de la mora tuvieron proporciones iguales, que garantizaron un equilibrio sensorial . Los cuatro tratamientos conservaron humedad similar y buena estructura. La adición de harinas de frutas enriqueció nutricional y funcionalmente el producto con fibra, antocianinas y betacarotenos, aportando colores atractivos tal y como lo mencionan (Cardozo, Gutierrez, & Hernandez, 2019). Los tratamientos con más mora ofrecieron acidez moderada y tonalidades violáceas, mientras que la auyama aportó dulzor y tonos anaranjados. Destacaron los tratamientos 2 y 4 por su armonía sensorial. El control de horneado fue clave para preservar compuestos termo-sensibles y asegurar textura desmenuzable, la cual fue clave para poder garantizar la calidad y homogeneidad de las galletas. Así, la incorporación de estas harinas resulta viable para innovar en panificación con productos funcionales, saludables y atractivos para todo tipo de consumidor.

Vinos. Se elaboraron dos tipos de vino a partir de frutos rojos, diferenciados por la concentración inicial de azúcares: el vino seco comenzó con 25 °Brix y el semidulce con 30 °Brix. Esta variación determinó diferencias en el contenido alcohólico y el perfil sensorial final (Jackson, 2020). El pH final fue de 3.2 en el vino seco y 3.3 en el semidulce, valores dentro del rango óptimo (3.0–3.5) según (Cárdenas, 2022) para vinos de frutas ácidas, lo que garantiza estabilidad microbiológica y realce del perfil aromático. En cuanto al etanol, el vino seco alcanzó 11%, mientras que el semidulce llegó a 13%, coherente con la mayor concentración inicial de azúcares fermentables . La adición de panela como

fuente de azúcares aportó no solo fermentables, sino también minerales y polifenoles que enriquecen la complejidad sensorial frente a endulzantes refinados.

CONCLUSIÓN

La selección de las frutas garantizó un mosto adecuado y una fermentación sin contaminaciones. Se evidenció que el °Brix inicial influye directamente en el grado alcohólico del vino, mientras que la panela aportó dulzor natural y nutrientes, afectando tanto la graduación como el perfil sensorial. En las mermeladas, el equilibrio entre azúcar y pectina permitió una buena gelificación y estabilidad. En las galletas, la incorporación de harina de mora y auyama mejoró el color, la textura y el sabor, lo que evidenció el potencial de estos ingredientes alternativos para diversificar productos con valor agregado.

Incluir la auyama en productos de consumo cotidiano, como galletas y mermeladas, resulta de gran valor comercial para un alimento tan rico en características nutritivas. Además, presenta la ventaja de que puede cultivarse en diferentes tipos de suelo, lo cual la convierte en un producto altamente rentable. Cabe añadir que la auyama puede implementarse en mayor medida en la poscosecha e integrarse en nuevas transformaciones tanto de frutas como de hortalizas. Sin duda alguna, este trabajo abre la brecha para la apropiación e incorporación de la auyama en diversos productos a futuro.

REFERENCIAS

Cárdenas, L. N. (2022). Identificación y caracterización de los productos bioactivos presentes en los vinos cubanos de alta gama. Universidad de cordoba, 262.

Cardozo, C. J., Gutierrez, B. L., & Hernandez, D. M. (2019). Características poscosecha de la auyama (cucurbita máxima) y desarrollo de snacks. Revista Gipama, 150.

Franco, D. (15 de 11 de 2022). *Jaleas Y Mermeladas.* Obtenido de Alimentos Argentinos: https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/revista/ediciones/53/productos/r53_08_JaleasMermeladas.pdf

Jackson, R. S. (2020). *Wine Science: Principles and Applications*. Academic Press.

Mathew T Baker, P. L. (2022). Aceptación del consumidor hacia los alimentos funcionales: una revisión del alcance. National library of medicine, 40.

Münchow, M. (2019). *Fermentation and Clarification in Winemaking*. Brewers Publications.

Revista de la Asociación Hortifrutícola de Colombia, Asohofrucol - FNFH. (2023). Balance del sector hortifrutícola en Colombia.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Evaluación de técnicas de secado de productos agrícolas como estrategia para generar valor agregado

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluation of drying techniques for agricultural products as a strategy for generating added value

Victor Manuel Martinez Castro[1]* Iván Andrés Quiñones Navia[2] Angie Natalia Ortiz[3]
Chelsi Toro[3] and Karla Julieth Figueroa[3]

Palabras clave:
Aprendizaje basado en problemas
Curvas de secado
Deshidratación osmótica
Harina de achira

RESUMEN

El presente trabajo muestra el potencial de productos agroalimentarios en el departamento del Huila explorando técnicas para generar valor agregado, implementando el método de Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) con estudiantes del programa de Ingeniería Agrícola. El objetivo fue evaluar y comparar técnicas de secado para mejorar la conservación y transformación de la mora de Castilla (*Rubus Glaucus Benth*) y la achira (*Canna edulis, Ker*). Se realizaroon dos experimentos: 1) para la mora, se evaluó el efecto de la deshidratación osmótica al vacío como pretratamiento al secado por convección forzada, realizando curvas de secado y midiendo la conservación del ácido málico; 2) para la achira, se comparó el secado tradicional a libre exposición con un secadero convencional tipo capilla, evaluando la cinética de secado y la calidad final del almidón. Los resultados demostraron que el pretratamiento osmótico en la mora no afectó significativamente la concentración de ácido málico (P>0,05). Para la achira, el secadero convencional en bandeja el tiempo de secado fue 18 horas con humedad de 14%, donde el el almidon presentó mejor aspecto para la comercialización. Se concluye que el ABP es una estrategia efectiva que fomenta la investigación aplicada y desarrolla competencias técnicas y analíticas en los estudiantes de Ingeniería Agrícola.

Keywords:
Problem-based learning
Drying curves
Osmotic dehydration
Achira flour

ABSTRACT

This study shows the potential of agri-food products in the department of Huila by exploring techniques to generate added value, implementing the Problem-Based Learning (PBL) method with students from the Agricultural Engineering program. The objective was to evaluate and compare drying techniques to improve the preservation and processing of blackberries (Rubus Glaucus Benth) and achira (Canna edulis, Ker). Two experiments were conducted: 1) for blackberries, the effect of vacuum osmotic dehydration as a pretreatment to forced convection drying was evaluated, creating drying curves and measuring malic acid preservation; 2) for achira, traditional drying by free exposure was compared with a conventional chapel-type dryer, evaluating the drying kinetics and final starch quality. The results showed that osmotic pretreatment in blackberries did not significantly affect the concentration of malic acid (P>0.05). For achira, the drying time in the conventional tray dryer was 18 hours with 14% humidity, where the starch had a better appearance for commercialization. It is concluded that PBL is an effective strategy that promotes applied research and develops technical and analytical skills in agricultural engineering students.

[1]Profesor Asistente, Programa de Ingeniería Agrícola. Universidad Surcolombiana, Pitalito, Huila. Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7036-1376
[2]Ingeniero Agricola. Universidad Surcolombiana.Pitalito, Huila, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3017-3052
[3]Ingenieras Agrícolas. Universidad Surcolombiana, Pitalito, Huila, Colombia.
*Corresponding author: victor.martinez@usco.edu.co

CC BY NC SA

El departamento del Huila posee un alto potencial agrícola que se limita por las altas pérdidas postcosecha, un desafío central destacado en la agenda interna de competitividad regional (Cámara de Comercio de Neiva, 2015). Para abordar estos desafíos desde la academia, es fundamental formar ingenieros agrícolas con capacidades para innovar y optimizar procesos agroindustriales. El Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) emerge como una metodología pedagógica ideal, ya que centra el proceso formativo en la solución de problemas reales, promoviendo la creatividad, el pensamiento crítico y la innovación (Parra et al. 2016). De esta manera los estudiantes escogieron productos como la mora de Castilla (*Rubus Glaucus Benth*) y el achira (*Canna edulis, Ker*) los cuales son emblemáticos de la economía local, pero su alta perecibilidad y los métodos de procesamiento artesanal limitan su escalabilidad y rentabilidad. La mora, con un contenido de humedad cercano al 87,68%, es susceptible a una rápida descomposición microbiana (Jaramillo Pelaez, 1984), mientras que el secado artesanal del almidón de achira es un proceso lento y expuesto a contaminantes, afectando su calidad y generando pérdidas económicas.

En una estrategia para la formación en investigación que se aplicó en el curso de secado de productos biológicos en periodos diferentes 2019 -1 y 2022 -2, en este trabajo recopila los resultados de una metodología formativa basada en ABP, donde estudiantes del Programa de Ingeniería Agrícola asumieron el reto de explorar y comparar técnicas de secado para el almidón de achira y la mora de Castilla respectivamente, con el objetivo de proponer soluciones tecnológicas que contribuyan a la conservación y generar valor agregado de estos productos agrícolas en el departamento del Huila.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia Pedagógica de Aprendizaje Basado en Problemas (ABP)

Los estudiantes se organizan en equipos de trabajo y se asigna un documento guía don de se plantea la pregunta: ¿Cómo puede el secado como operación unitaria transformar productos agrícolas perecederos del Huila en bienes de mayor valor agregado, conservando la calidad, utilizando tecnologías apropiadas y accequibles? Con este postulado se orientó a los estudiantes para que realizaran con la mora de castilla y la extracción del almidon de achira: el Análisis del problema, planteamiento de objetivos, realizaran el diseño experimental y en funcion de las variables medidas se dispusieran procesaron los datos registrados para elaboración de curvas de secado, midiendo la humedad y propiedades fisicoquímicas, que en conjunto a herramientas estadísticas, discutieron los hallazgos soportados en literatura científica

Caso de Estudio 1: Secado de Mora de Castilla (*Rubus Glaucus Benth*)

Los frutos de moras de castilla (*Rubus Glaucus*) frescas con semillas, se obtuvieron de la vereda la Guajira del municipio de Palestina-Huila, se clasificaron según la norma técnica colombiana NTC-4106 (Instituto de Normas Técnicas de Certificación, 1997); para esta investigación se utilizaron moras con un calibre A, B, C, D y E y un grado de madurez entre 3 y 6.

En el diseño experimental para evaluar el efecto de un pretratamiento de deshidratación osmótica. Se definieron tres tratamientos con dos repeticiones cada uno:

Tratamiento Control: El fruto de mora de castilla fue troceada sometida únicamente a secado por convección forzada a 70 °C.

Tratamiento MVC-1: La fruta fue pretratada con deshidratación osmótica al vacío (solución de sacarosa al 85% p/v) durante 4 horas, luego troceada y sometida a secado por convección forzada a 70 °C. (MVC: mora de castilla con osmosis al vacío)

Tratamiento MVC-2: Mismo pretratamiento que MVC-1, pero con una duración de 8 horas, luego troceada y sometida secado por convección forzada a 70 °C.

Caso de Estudio 2: Secado de Almidón de Achira (*Canna edulis, Ker*)

Para este estudio se compararon dos sistemas de secado. Se prepararon 4 kg de almidón húmedo, de achira de la especie *Canna edulis Ker* de la variedad morada de San Agustín, extraída y procesada en la finca La Esperanza localizada en la vereda Alto del Obispo del municipio de San Agustín, y se dispuso en bandejas con un espesor de capa de 3 cm en secador solar. El diseño experimental consistió en:

Sistema 1 (Secado Natural): Las bandejas se expusieron al aire libre en condiciones ambientales.

Sistema 2 (Secado Convencional): Las bandejas se introdujeron en un secadero solar tipo capilla, que ofrece condiciones controladas de temperatura y flujo de aire.

El proceso de secado se monitoreó durante 5 días, registrando la pérdida de peso a intervalos regulares para construir las curvas de secado.



Figura 1. Diagrama de flujo del proceso metodológico para el secado de mora de castilla y achira.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados indicaron que el pretratamiento de deshidratación osmótica acelera la pérdida de agua inicial, reduciendo el tiempo posterior en el secador de convección forzada para alcanzar la humedad final de equilibrio. Como se observa en la Figura 2, la muestra control requirió 22 horas para alcanzar una humedad del 19,2%, mientras que los tratamientos MVC-1 y MVC-2, a pesar de tener humedades más altas después de la ósmosis, mostraron cinéticas de secado diferentes.

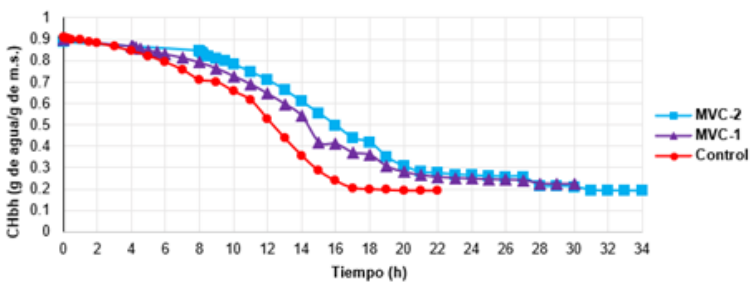


Figura 2. Curvas de secado para la mora de Castilla en los tres tratamientos en secado a 70°C. Pretratamiento MVC-1: osmosis al vacío por 4 horas y MVC-2: osmosis al vacío por 8 horas.

En cuanto a la conservación del ácido málico, un compuesto clave en la calidad sensorial de la mora, el análisis estadístico mediante ANOVA de un factor (con $\alpha = 0,05$) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($P = 0,68$). Esto sugiere que la deshidratación osmótica, bajo las condiciones estudiadas, no degrada este compuesto. Sin embargo, los tratamientos osmóticos (MVC-1 y MVC-2) presentaron una mayor retención porcentual del ácido málico: 95,69% y 91,66%, en comparación con el control con valor de 72,63%, indicando que la combinación de métodos es más eficiente en la conservación de este atributo.

El producto final, un polvo de mora, tiene un alto potencial para la industria alimentaria como saborizante natural, colorante o ingrediente para productos de panadería,

bebidas instantáneas y confitería. Luego de terminar el proceso de osmodeshidratación, el jarabe adquiere y conserva algunas características de aroma, color y sabor propios de la mora de castilla, lo cual está de acuerdo con lo que menciona Farinango Taipa (2010). El jarabe resultante del proceso de ósmosis, enriquecido con el sabor y color de la fruta, puede ser reutilizado como edulcorante en otros productos.

Caso de Estudio 2: Secado de Almidón de Achira

La comparación de los dos sistemas de secado reveló una clara ventaja para el secadero convencional. correspondiente a una humedad del 14% en 18 horas de operación, mientras que el secado natural al aire libre fue más lento y susceptible a las fluctuaciones climáticas (nubosidad, viento), lo que causa un riesgo en la inocuidad del producto. La humedad del producto esta acorde a lo reportado por Rodríguez et al. (2003) quien relaciona una condicion favorable para almacenamiento del harina hasta de 12 meses.

El almidón secado en el secadero convencional presentó un color más blanco y una apariencia más homogénea, características deseables para su comercialización, Este productos es deseable para la elaboración de los tradicionales bizcochos de achira. En contraste, el almidón secado al aire libre adquirió una tonalidad más opaca, atribuida a contaminación con el polvo y material particulado del ambiente.

CONCLUSIÓN

La estrategia de Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) demostró ser altamente efectiva para la formación en investigación de los estudiantes de Ingeniería Agrícola. Al enfrentarlos a un problema real y pertinente para su región, se logró una alta motivación y un aprendizaje significativo, se evidencio que el experimento desarrollado en el periodo 2022-2 que utilizó métodos de análisis de laboratorio en el caso de la mora, fue el que presento información mas precisa sobre los usos potenciales del producto seco en polvo. Los estudiantes desarrollaron competencias en diseño experimental, análisis de datos, pensamiento crítico y comunicación científica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el compromiso y la dedicación de los estudiantes del curso de secado de productos biológicos que desarrollaron las investigaciones base de este trabajo, a la Universidad Surcolombiana por facilitar los espacios y equipos de laboratorios de ciencias básicas, y en especial a los campesinos que cultivan y procesan el achira en el municipio de San Agustín y los productores de mora en la vereda la Guajira del municipio de Palestina en el departamento del Huila.

REFERENCIAS

Cámara de Comercio de Neiva. (2015). Agenda Interna para la Productividad y la Competitividad del Departamento del Huila. Neiva, Colombia.

Farinango Taipe, M. E. (2010). Estudio de la fisiología postcosecha de la mora de castilla (Rubus Glaucus Benth) y de mora variedad Brazos (Rubus sp.) (Tesis de pregrado). QUITO/EPN.

INCOTEC. (1997). Frutas Frescas. Mora de Castilla. Especificaciones. Norma Técnica Colombiana (NTC 4106).

Jaramillo Pelaez, J. A. (1984). El cultivo de mora de castilla. Repositorio Agrosavia. Recuperado de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/20964/23285_4812.pdf

Parra, J. E., Amariles, M. J., & Castro, C. A. (2016). Aprendizaje basado en problemas en el camino a la innovación en ingeniería. Ingenierías USBMed, 7(2), 96-103. https://doi.org/10.21500/20275846.2486

Rodríguez, G., García, H., Camacho, H., & Arias, F. (2003). El Almidón de Achira o Sagú (Canna edulis, Ker). Corpoica, 1, 1–36. Recuperado de http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/3744/1/Almidon%20de%20achira%20o%20sagu.pdf

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Obtención de productos deshidratados en función del estado de madurez de mango Tommy Atkins

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Production of dehydrated products based on the ripening stage of Tommy Atkins mango

Yenni Alejandra Durán Villamil[1] and Claudia Patricia Pérez Rodríguez[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Caracterización fisicoquímica
Deshidratación
Estados de madurez
Subproductos de mango
Valor agregado

Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas de mango Tommy Atkins proveniente de San Joaquín, Cundinamarca almacenados a 11±0,5 °C, buscando generar productos de valor agregado en diferentes estados de madurez. Para esto, se determinaron parámetros como pH, acidez, sólidos solubles, firmeza, color de la cáscara y color de la pulpa y se obtuvieron tres productos deshidratados: polvo, chips y rollos, mediante un proceso de secado en una estufa de convección forzada a 60 °C. Los productos obtenidos presentaron valores finales de contenido de humedad inferiores al 10% y actividad de agua de 0,4 lo cual se presenta como una alternativa segura para el consumidor. Estos resultados muestran el potencial del aprovechamiento del mango en distintas fases de maduración como estrategia para reducir desperdicios poscosecha y diversificar la oferta agroindustrial en la región.

ABSTRACT

Keywords:
Physicochemical chacterization
Dehydration
Ripening stages
Mango by-products
Value-added

The physicochemical properties of Tommy Atkins mangoes from San Joaquín, Cundinamarca, stored at 11 ± 0.5 °C, were characterized with the aim of developing value-added products at different ripening stages. Parameters such as pH, acidity, soluble solids, firmness, peel and pulp color were evaluated. Based on these analyses, three dehydrated products—powder, chips, and rolls—were obtained through a drying process in a forced convection oven at 60 °C. The resulting products showed final moisture contents below 10% and a water activity of 0.4, ensuring safe consumption. These findings highlight the potential of utilizing mangoes at different ripening stages as a strategy to reduce postharvest losses and diversify agro-industrial offerings in the region.

[1]Ingeniera Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
[2]Profesora asociada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

CC BY NC SA

El mango (*Mangifera indica L.*) es una fruta tropical originaria de Asia con gran relevancia a nivel mundial apreciada por su sabor dulce y su valor nutricional, dado que contiene carbohidratos, aminoacidos, lípidos, ácidos orgánicos, vitaminas C, A, E y B (Maldonado-Celis, y otros, 2019). En Colombia, este cultivo se ha consolidado como una actividad agrícola de importancia, gracias a su adaptabilidad y valor económico. La mayor concentración de áreas sembradas se ubica en Cundinamarca, Tolima y Magdalena, que representan el 68 % del total nacional (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021), en 2021. No obstante, la cadena productiva enfrenta pérdidas significativas asociadas a la sobreoferta y a la limitada demanda en determinados periodos (Tribín Rivera, 2014).

El mango al ser un fruto climatérico, continúa su proceso de maduración después de la cosecha, una vez alcanzado el punto de madurez fisiológica. Este comportamiento implica variaciones en sus propiedades físicas y químicas conforme avanza el estado de madurez, reflejadas en cambios notables en el color, firmeza, acidez y azúcares (National Mango Board, 2017). Asimismo, su elevado contenido de agua, cercano al 82%, lo convierte en un producto altamente perecedero, con una vida útil limitada de entre 14 y 28 días, dependiendo de la variedad y las condiciones de almacenamiento (Slaughter, 2009).

La variedad *Tommy Atkins* es una de las más cultivadas a nivel mundial y en Colombia se destina tanto al consumo en fresco como a la exportación, debido a sus características de color, alto contenido de azúcar y fibra (PROAGROCAFE, s.f.); (Rojas, y otros, 2004). Diversos estudios han establecido valores de referencia que permiten diferenciar sus estados de madurez con base en parámetros fisicoquímicos. Por ejemplo, Rojas et al. (2004) definieron una tabla de color con cinco estados de madurez, a los cuales asociaron un rango de sólidos solubles totales entre 7,4 y 12,4 °Brix y una disminución de la acidez de 1,06 a 0,51 % de ácido cítrico. Además, Villamizar, Quiceno y Giraldo (2019) reportaron durante la maduración poscosecha valores entre 11 y 15,3 °Brix, acidez de 2,2 a 0,14 % de ácido cítrico, humedad de 82,4 a 89,52 % y firmeza de 2,4 a 3,9 kgf, confirmando que los cambios en el color de la cáscara están estrechamente relacionados con el avance de la maduración.

Considerando la alta perecibilidad del mango y la necesidad de reducir las pérdidas poscosecha, una de las técnicas más efectivas para prolongar la vida útil de alimentos es la deshidratación, que puede realizarse mediante diferentes métodos como la solar, osmótica o por aire caliente (Pérez Valadez & Martínez Alvarado, 2010). Este proceso ofrece la ventaja de reducción del contenido de humedad y de la actividad de agua a valores inferiores al 20 % y 0,6, respectivamente, condiciones que inhiben el crecimiento de microorganismos (Costa Celestino, 2010), extendiendo la vida útil, permitiendo la obtención de productos con valor agregado y aportando en la disminución de pérdidas durante la poscosecha.

Este proyecto busca, a partir de los cambios que presenta el mango en sus propiedades fisicoquímicas durante el proceso de maduración, identificar estados óptimos de madurez que permitan la elaboración de productos deshidratados de alta calidad, contribuyendo así a la reducción de pérdidas poscosecha y al desarrollo de valor agregado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de identificar tres estados de madurez diferenciados como base para la elaboración de productos deshidratados, se realizó una caracterización fisicoquímica por triplicado durante un período de almacenamiento de 27 días a 60 mangos variedad Tommy Atkins, suministrados por Asomefrut (San Joaquín), provincia del Tequendama. En el laboratorio de Poscosecha de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, los frutos seleccionados fueron lavados, desinfectados con hipoclorito de sodio (200 ppm), secados y almacenados a 11 ± 0,5 °C.

Acidez titulable (% de ácido cítrico). Se emplearon 20 mL de jugo en un medidor de acidez titulable con el método de referencia de pH de 8.2 de NaOH, utilizando la ecuación [1].

$$\% \text{ ácido cítrico} = \frac{V_1 Nk}{V_2} \times 100\% \quad (1)$$

Donde: V_1: volumen en ml de NaOH utilizado en la titulación. V_2 : volumen en ml de la muestra de jugo de mango diluido (20 ml). *N*: normalidad del NaOH (0.1 meq/ml). *k*: Peso equivalente del ácido cítrico (0.064 g/meq).

Textura: Se retiró parte de la cáscara para medir la resistencia a la compresión de la pulpa, empleando el texturómetro *Analizador de Texturas Brookfield CT3*,con punta de 3mm en un ciclo de compresión.

Color: Se determinó tanto en el exocarpio como en la pulpa, mediante un colorímetro Konica Minolta cr-410, en el espacio de color cielab donde L* (luminosidad), a* (verde-rojo), y b* (azul-amarillo).

Para el exocarpio se seleccionaron tres mangos para hacer seguimiento al cambio de color durante el almacenamiento, a los que se le realizaron tres mediciones a lo largo del diámetro longitudinal como se muestra en la Figura 1a, mientras que para la pulpa se realizaron mediciones en dos zonas como se muestra en la Figura 1b.

Para realizar la comparación de color para cada caso se empleó la ecuación [2] (cambio de color).

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (2)$$

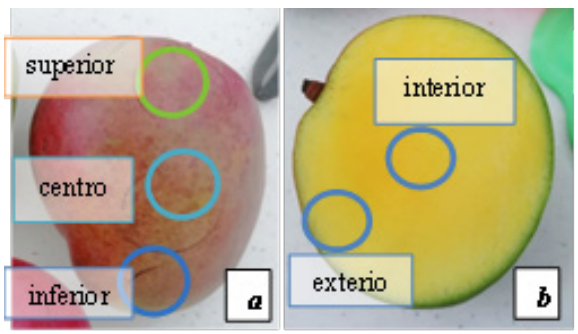


Figura 1. Puntos de medición de color en a. cáscara. b. pulpa.

Sólidos Solubles: Medidos con un refractómetro de 0-32 °Brix, se midió la temperatura de la muestra y se realizó la corrección para estandarizar a 20 °C.

Elaboración de productos deshidratados

La deshidratación se realizó empleando una estufa de convección forzada a una temperatura constante de 60 °C. Se registró la pérdida de peso por método gravimétrico y la actividad de agua cada 15 min hasta alcanzar el equilibrio, estableciendo la relación entre humedad y aw para cada producto en curvas de secado. Se procedió a la elaboración de los productos en función de diferentes estados de madurez.

Chips de mango: Para frutos verdes y maduros, cuya firmeza permite la manipulación y corte en láminas uniformes de aproximadamente 3 mm de grosor, garantizando un secado homogéneo.

Polvo de mango: A partir de chips elaborados con mango verde -con altos cotenidos de almidones- se trituran en un procesador de alimentos hasta obtener partículas finas o medianamente finas.

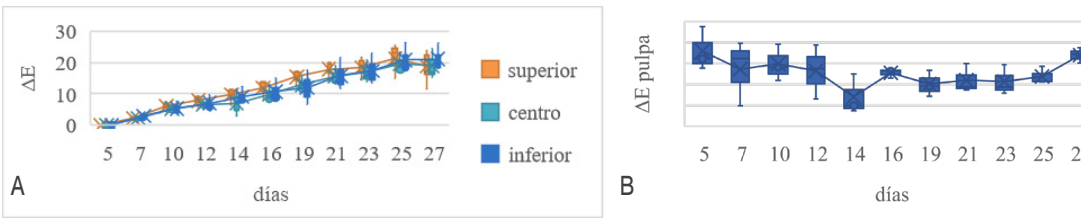
Rollos de mango: Para partir frutos sobremaduros cuya firmeza es menor se usa la pulpa macerada, se extende en capas de 5 mm de espesor sobre papel pergamino de grado alimenticio (0.043 mm de grosor) y deshidratada, se obtiene una película flexible que fue enrollada junto con el pergamino y cortada en tiras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cambio de color en la cáscara (Gráfica 1A) mostró un incremento progresivo y uniforme en las tres zonas evaluadas (superior, central e inferior), evidenciando el cambio de color a lo largo de la maduración. Estos resultados confirman que el color es un indicador confiable del estado de madurez del mango, en concordancia con lo reportado por Villamizar, Quiceno y Giraldo (2019) y (Gómez Ávila, Bayona De Joya, & Goenaga Quiroga, 2005). Estos cambios se explican por la síntesis de carotenoides y antocianinas y degradación de la clorofila. En frutos

maduros se han identificado al menos 16 carotenoides, siendo el β-caroteno el más abundante; en estado verde predominan las xantofilas (Maldonado-Celis, y otros, 2019).

El color en la pulpa (Gráfica 1B), varía entre zonas cerca a la semilla, al comparar entre el centro y periferia, los primeros días (5 a 10) el valor de cambio de color (ΔE) fue alto, reflejando diferencias marcadas en el color interno. Entre los días 12 y 21, ΔE disminuyó, lo que sugiere una homogeneización en la distribución de pigmentos durante la maduración. Posteriormente, a partir del día 23, se observó un ligero aumento de ΔE, posiblemente asociado a procesos de sobre-maduración y degradación de pigmentos.

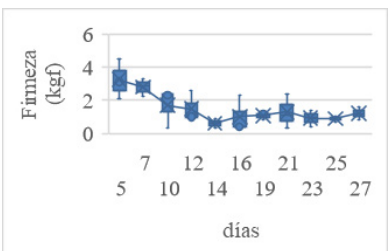


Gráfica 1. Cambio de color en la A. cáscara y B. Pulpa de mango en el período de almacenamiento.

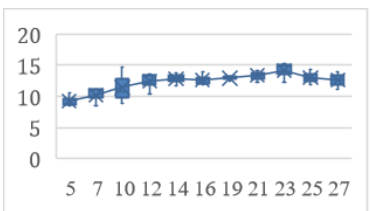
En la gráfica 2 se muestran los resultados de la firmeza, con valores entre 4,9 y 0,6 kgf, con un rango más amplio que el reportado por Villamizar en su caracterización, hasta el día 14 se muestra una tendencia decreciente, esto puede deberse al ablandamiento de los tejidos por degradación de almidones en sustancias pécticas (Rojas, y otros, 2004).

Por otra parte, con respecto a los sólidos solubles totales, en la gráfica 3 se muestra el aumento de azúcares desde 9 hasta 14,5 °Brix, ya que los almidones presentes en las células de frutos inmaduros se hidrolizan durante el período de maduración, enzimas como la amilasa y pectinasa los convierten en azúcares simples como la fructosa, sacarosa y glucosa (Megha, y otros 2022).

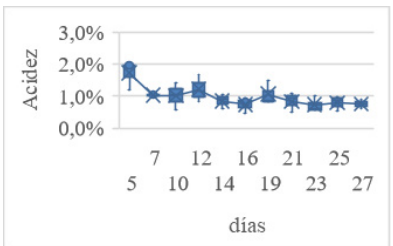
Así mismo la acidez del mango tiende a disminuir durante la maduración como se muestra en la gráfica 4, debido a la degradación de los ácidos orgánicos presentes, como el ácido cítrico el ácido málico (Gómez Ávila, Bayona De Joya, & Goenaga Quiroga, 2005).



Gráfica 2. Firmeza de mango Tommy Atkins en el período de almacenamiento.



Gráfica3. Sólidos solubles totales de mango Tommy Atkins en el período de almacenamiento.

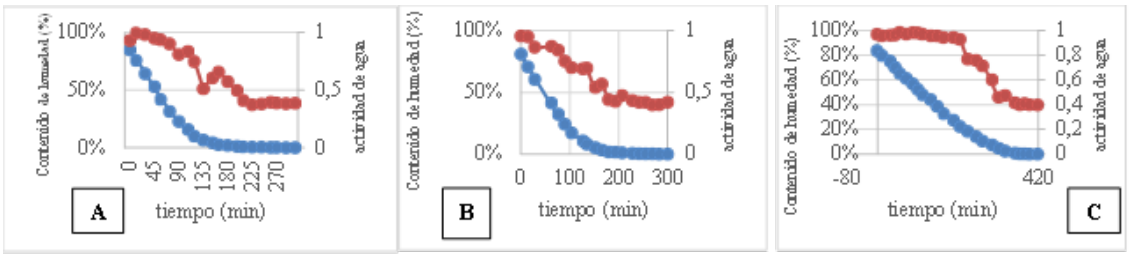


Gráfica 4. Porcentaje de acidez de mango Tommy Atkins en el período de almacenamiento.

La variabilidad mostrada en la desviación estandar se relaciona con diferencias entre los frutos.

A partir de los resultados, se establecieron tres estados en función de la firmeza, %acidez y sólidos solubles como estado 0-1 verde, 2-3 maduro y 4 sobremaduro, de acuerdo a los valores indicados por Rojas et. al. (2004).

Las gráficas 5A, 5B y 5C, se presentan las curvas de secado de mango en tres estados de madurez asociados con un producto en específico: verde y maduro en tajadas, sobremaduro pulpa extendida en superficie. En cada estado, se correlaciona el contenido de humedad (representado por la línea azul) y la actividad de agua (línea roja) a lo largo del tiempo de secado expresado en minutos.



Gráfica 5. Curvas de secado para tres estados de madurez de mango A. Verde (estado 0-1). B. Maduro (estado 2-3) y C. Sobremaduro (estado 4).

Se puede observar que a medida que el contenido de humedad disminuye durante procesos como la deshidratación, también se reduce la actividad de agua, la cual es crucial para inhibir el crecimiento de microorganismos y ralentizar las reacciones químicas que deterioran el producto. Dependiendo de cómo esté ligada el agua en el alimento, el contenido de humedad puede reducirse más rápidamente que la actividad de agua, pero alcanzando niveles seguros antes de que el alimento pierda toda su humedad (Costa Celestino, 2010).

Para la actividad de agua el mango verde y maduro, con cortes y grosores similares, se muestran curvas con tendencias similares, mientras que para el mango sobremaduro con mayor grosor y área superficial expuesta, se observa que se requieren hasta 235 minutos para disminuir de 0.9, que siguen siendo valores altos y luego ocurre un descenso rápido.

Para alcanzar el contenido de humedad de equilibrio, en los dos primeros casos se puede alcanzar en menos de 300 minutos, mientras que el mango sobremaduro, requiere hasta 420 minutos. Esta observación sugiere que los mangos sobremaduros, con mayor contenido inicial de azúcares y compuestos solubles, retienen agua más eficientemente y por lo tanto necesitan períodos más largos para alcanzar niveles adecuados de deshidratación.

CONCLUSIÓN

El proceso de maduración del mango Tommy Atkins en almacenamiento durante 27 días poscosecha fue caracterizado, identificando como parámetros clave la firmeza, el color de la pulpa, los sólidos solubles y la acidez, a partir de los cuales fue posible establecer identificar el estado de madurez con respecto a límites inferiores que permiten diferenciar estados de madurez y orientar la selección de productos.

La elaboración de tres presentaciones de mango deshidratado (polvo, chips y rollos) según el estado de madurez constituye una estrategia para reducir pérdidas poscosecha, prolongar la vida útil y diversificar el aprovechamiento del fruto. Este enfoque representa una alternativa viable para los productores, ya que permite ajustar los productos a las condiciones locales, optimizar costos y generar valor agregado en la cadena productiva.

En las curvas de secado evidenció que la geometría, el área de exposición y el estado de madurez influyen de manera determinante en la cinética de deshidratación. Estos hallazgos resaltan la importancia de ajustar los parámetros de secado en función del tipo de presentación, con el fin de mejorar la calidad del producto final y la eficiencia energética de los procesos.

REFERENCIAS

Aranda Camacho, Y. (2019). Procesos de gobernanza territorial: un análisis para la provincia de Teuqendama - Cundinamarca. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

ASOHOFRUCOL. (2019). Desfase de cosecha de mango en las provincias del Tequendama y Alto Magdalena de Cundinamarca. Bogotá.

Maldonado-Celis, M., Yahia, E., Bedoya, R., Landazuri, P., Loango, N., Aguillon, et al. (2019). Chemical Composition of Mango (*Mangifera indica* L.) Fruit: Nutritional and Phytochemical Compounds. Frontiers in plant science.

Megha, R., Sanjay, K., Srivastav, M., Prakash, J., Saha, S., & Pradhan, S. (2022). Physico-chemical characterization and biochemical profiling of mango genotypes during different fruit development stages. South African Journal of Botany, 476-486.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Cadena del mango. Indicadores e instrumentos.

National Mango Board. (2017). Protocolo para el manejo y la maduración del mango.

Pérez Valadez, L., & Martínez Alvarado, C. O. (2010). Técnicas para el deshidratado de mango. Sinaloa: Fundación Produce Sinaloa.

Rojas, J. M., Peñuela, A. E., Gómez, C. R., Aristizábal , G. E., Chaparro, M. C., & López, J. A. (2004). Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

Slaughter, D. C. (Enero de 2009). Métodos para el manejo de la maduración en mango. Biological and agricultural engineering.

Tribín Rivera, J. P. (Enero-junio de 2014). Provincia del Tequendama-Cundinamarca: Prospectiva de la cadena productiva de mango. Revista de la Facultad de Ciencias Económics Y Administrativas, 187-211.

Vergara Peña, D. J. (2023). Contexto de cadena mango. AGROSAVIA.

Villamizar, V. R., Quiceno, G. C., & Giraldo, G. G. (2019). Cambios fisicoquímicos durante la maduración del mango Tommy Atkins en la poscosecha. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Comportamiento reológico de una bebida vegetal a base de arroz integral (*Oryza sativa* L.) germinado

Rheological behaviour of a beverage based on germinated brown rice (*Oryza sativa* L.)

Manuel Guillermo Mora Urueña[1], Angélica Piedad Sandoval Aldana[1] and Henry Alexander Váquiro Herrera[1]

Palabras clave:
Arroz integral germinado
Bebida vegetal
Cizallamiento
Índice de omportamiento de flujo

RESUMEN

La constante crisis a través de los años recientes en la cadena productiva del arroz en Colombia, debe tener una respuesta que podría estar en una aplicación de la agroindustria más allá de la molienda del grano. Se determinó el análisis proximal (contenido de proteína, humedad, grasa y cenizas) de un arroz integral germinado (AIG) (*Oryza Sativa* L.), el cual se incorporó en forma de polvo a una formulación de bebida vegetal. Las bebidas mostraron el comportamiento típico de un fluido pseudoplástico, donde la viscosidad dinámica disminuyó con el esfuerzo cortante, de acuerdo con los parámetros índice de comportamiento de flujo, (n), que alcanzaron valores de 0,2718 y 0,2875 para tratamientos térmicos de 80 y 90 °C, respectivamente. Se concluye que las bebidas son fluidos no-Newtonianos debido a sus viscosidades determinadas.

Keywords:
Germinated brown rice
Plant-based beverage
Shear
Flow behavior index

ABSTRACT

The ongoing crisis in Colombia's rice production chain in recent years requires a response that may be found in an agroindustry application beyond grain milling. Proximate analyzes was determined (including protein, moisture, fat, and ash contents) in germinated brown rice (GBR) obtained from brown rice (*Oryza sativa* L.), which is incorporated in powder form into a plant-based beverage formulation. Flow behaviour type shown by beverages is called "shear-thinning", according to parameters flow behavior index, n, whose values reached 0,2718 y 0,2875 for thermal treatments of 80 y 90 °C, respectively. It is concluded that beverages are non-Newtonian fluids due to their determined viscosities.

[1]Universidad del Tolima. Ibagué (Colombia). mgmorau@ut.edu.co; apsandovala@ut.edu.co; havaquiro@ut.edu.co

CC BY NC SA

De acuerdo con cifras de NielsenIQ – empresa de inteligencia del consumidor, en Colombia por cada 57 litros de leche larga vida vendidos, solo se vende un litro de bebidas vegetales. No obstante, la categoría de bebidas a base de plantas ha crecido un 198,9% entre 2019 y 2024 y crecerá 83,2% de aquí a 2029, mientras que el mercado de la leche de vaca crecerá apenas 31,8% en el mismo periodo (Arenales, 2024). Estos productos prometen no solo deleitar el paladar, sino también ofrecer beneficios como mejora del sueño, reducción del estrés y apoyo al estado de ánimo (IFIC, 2023). La viscosidad es una propiedad fisicoquímica asociada con las fibras dietéticas, particularmente las fibras dietéticas solubles (Dikeman y Fahey, 2006). Distintas bebidas de origen vegetal tienen diferentes viscosidades y esto puede influir en la aceptabilidad del consumidor (Frühauf *et al.*, 2023, como se citó en Moss *et al.*, 2023). El presente trabajo condujo a una alternativa de agroindustria del arroz para el Tolima, aportando a procesos de investigación en nuevos productos de la tendencia plant-based, conociendo sus parámetros reológicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó material vegetal adquirido en el mercado local (Ibagué, Colombia) y procesado en el Laboratorio de Poscosecha y Control de Calidad de la Universidad del Tolima, sede Central. El grano integral de arroz secado fue caracterizado según métodos de la AOAC: 952.45 para humedad; 979.09 nitrógeno total, con el factor 6,25 para la proteína hallada; 2003.05 grasa cruda; 923.03 cenizas. Los mismos protocolos se aplicaron en un AIG, el cual fue previamente a lavado e higienizado, sometido a remojo durante 6 h en relación 1:4 p/v con agua potable a temperatura de 28 °C y una fase de germinación de 24 h a 28 °C y 95% de humedad relativa sobre papel filtro húmedo en las bandejas de una cámara climática. Finalmente se redujo tamaño con molienda continua a partículas menores de 1 mm.

La bebida vegetal de arroz se preparó a partir de harina de arroz (8,30% p/p), goma xantana (0,25% p/p) y agua potable. La harina de arroz se mezcló a 50 °C por 20 min. La goma xantana se adicionó a las muestras y entonces estas fueron calentadas a dos temperaturas (80 y 90 °C) en 5 min y mantenidas por 15 min en baño maría. Las muestras fueron homogeneizadas a 7.200 rpm por 10 min. Luego de este paso, fueron enfriadas a temperatura ambiente y después almacenadas a 4 °C (Karimidastjerd & Kilic-Akyilmaz, 2021). La viscosidad de las bebidas se determinó a 25 °C con un viscosímetro rotacional equipado con husillo LV #64 (Lee y Rhee, 2003). El análisis estadístico y gráfico del trabajo se desarrolló con Microsoft Excel® (Microsoft Corporation).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de proteína encontrada en el arroz integral fue mayor (Tabla 1.) comparado con la composición del AIG. El porcentaje de grasa en el AIG indica que es un ingrediente con bajo contenido de este nutriente y, sumado a ello, es libre de colesterol, gluten, sodio y lactosa (Parra-Peña, Flórez y Rodríguez, 2022; Verma y Srivastav, 2017). Lo anterior, es resultado de la reactivación del metabolismo que ocurre durante el proceso de germinación de las semillas (Kim, Hwang et al., 2012).

Tabla 1. Análisis proximal[+] de arroz integral y AIG.

Material	% Humedad	% Proteína	% Grasa cruda	% Cenizas
Arroz integral	10,06±0,06	7,98±0,11	2,76±0,03	1,15±0,50
AIG	6,32±0,23	6,99±0,25	0,74±0,16	0,70±0,03

[+]Porcentaje en peso húmedo (Media ± Desviación estándar). (n = 3)

El índice de comportamiento de flujo, *n*, y el índice de consistencia, *k*, son parámetros útiles para describir el comportamiento reológico de suspensiones de AIG. Los resultados de este estudio se muestran en la tabla 2. La relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo cortante en las condiciones descritas, siguieron la ecuación de ley de potencia.

$$\alpha = k\gamma \quad (1)$$

Donde; σ: Esfuerzo cortante [Pa], γ: Velocidad de corte [s^{-1}], k: Índice de consistencia [$Pa \cdot s^n$], n: Índice de comportamiento de flujo.

Tabla 2. Índice de consistencia (*k*) e índice de comportamiento de flujo (*n*) de bebidas vegetales a base de AIG a 80 °C (120) y 90 °C (130).

Bebida	*k* (Pa·s)	*n*
120	3,2223	0,2718
130	1,7530	0,2875

Todas las bebidas de AIG exhibieron comportamiento de adelgazamiento al cizallamiento (pseudoplástico) con un valor de *n* menor a 1,0 (Figura 1).

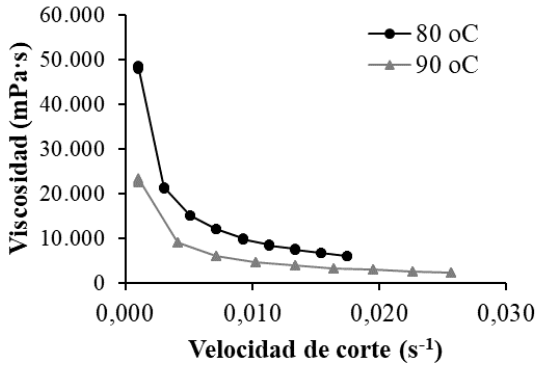


Figura 1. Relación de viscosidad aparente y velocidad de corte de bebidas vegetales a base de AIG a dos temperaturas de calentamiento utilizando un viscosímetro rotacional.

La viscosidad disminuyó con la velocidad de corte y la temperatura. El índice de consistencia (*k*) se encontró mayor a 80 °C en comparación con 90 °C. A más calor, los gránulos eran más frágiles y se hinchaban más fácilmente, lo que daba lugar a una alta viscosidad y un mayor comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento (Banchuen, 2010).

CONCLUSIÓN

Se pudo establecer los parámetros reológicos para bebidas vegetales con AIG a dos temperaturas, lo cual derivó en relaciones entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte no constante, mostrando un patrón de fluidos de tipo pseudoplástico, el cual es más común dentro de este comportamiento de flujo. También la composición del arroz integral y AIG, indicaron que son materiales que cuentan con alto valor proteico que pueden ser aprovechados con el objeto de maximizar su utilización y, en consecuencia, innovar en la tendencia de las bebidas a base de plantas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Tolima, por su colaboración económica a través de la *Convocatoria No. 01-2022* del Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Arenales Garavito, J. V. (2024, noviembre 123). ¿El vaso medio vacío o medio lleno? La realidad sobre la crisis del sector lechero. Forbes Colombia–Negocios. https://forbes.co/2024/11/12/negocios/el-vaso-medio-vacio-o-medio-lleno-la-realidad-sobre-la-crisis-del-sector-lechero

Banchuen, J. (2010). Bio-active compounds in germinated brown rice and its application (Doctoral dissertation, Prince of Songkla University).

Dikeman, C. L., & Fahey Jr, G. C. (2006). Viscosity as related to dietary fiber: a review. Critical Reviews In Food Science And Nutrition, 46(8), 649-663.

International Food Information Council – IFIC. (2023). Food & Health Survey. 23 May 2023. https://foodinsight.org/2023-foodhealth-survey/

Karimidastjerd, A., & Kilic-Akyilmaz, M. (2021). Formulation of a low-protein rice drink fortified with caseinomacropeptide concentrate. Food and Bioproducts Processing, 125, 161-169.

Kim, H. Y., Hwang, I. G., Kim, T. M., Woo, K. S., Park, D. S., Kim, J. H., ... & Jeong, H. S. (2012). Chemical and functional components in different parts of rough rice (*Oryza sativa* L.) before and after germination. Food chemistry, 134(1), 288-293.

Lee, S. W., & Rhee, C. (2003). Processing suitability of a rice and pine nut (*Pinus koraiensis*) beverage. Food Hydrocolloids, 17(3), 379-385.

Moss, R., LeBlanc, J., Gorman, M., Ritchie, C., Duizer, L., & McSweeney, M. B. (2023). A prospective review of the sensory properties of plant-based dairy and meat alternatives with a focus on texture. Foods, 12(8), 1709.

Parra-Peña, R. I., Flórez, S., & Rodríguez, D. (2022). La competitividad de la cadena del arroz en Colombia: un compromiso con el bienestar del agricultor. Cámara Induarroz de la ANDI, Centro de Investigación Económica y Social de FEDESARROLLO.

Verma, D. K., & Srivastav, P. P. (2017). Proximate composition, mineral content and fatty acids analyses of aromatic and non-aromatic Indian rice. Rice Science, 24(1), 21-31.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Evaluación de viabilidad para obtener bioetanol de pulpa de pitahaya infectada con hongo *Fusarium oxyspurum*

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Feasibility evaluation for obtaining bioethanol from pitahaya pulp infected with the fungus *Fusarium oxyspurum*

Yivi Alejandra Ome Rodriguez[1]* and Edna Sofia Uní Peña[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Agroindustria
Biocombustible
Fermentación
Pitahaya

Se evaluó la producción de bioetanol a partir de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*) afectada por *Fusarium oxysporum*. La presencia del patógeno se confirmó mediante análisis morfológico, microscópico y molecular. Se realizaron seis fermentaciones con *Saccharomyces cerevisiae*, con y sin melaza, monitoreando pH, °Brix y producción alcohólica durante 22 días. El ANOVA agrupó los rendimientos en bajos (218–244 mL) y altos (626–702 mL), con una máxima producción de contenido de alcohol en el tratamiento NFSM (no *fusarium* sin melaza) con 250 mg/mL medida por la técnica HPLC, menor a lo reportado en la literatura. Se concluye que la pitahaya afectada es viable para uso agroindustrial, pero requiere optimización fermentativa y cepas más eficientes.

ABSTRACT

Keywords:
Agroindustry
Biofuel
Fermentation
Pitaya

Bioethanol production from yellow pitahaya (*Selenicereus megalanthus*) affected by *Fusarium oxysporum* was evaluated. The presence of the pathogen was confirmed by morphological, microscopic, and molecular analysis. Six fermentations were carried out with Saccharomyces cerevisiae, with and without molasses, monitoring pH, °Brix, and alcohol production for 22 days. ANOVA grouped the yields into low (218–244 mL) and high (626–702 mL), with a maximum production of 250 mg/mL NFSM (no *fusarium* no honeydew) treatment, which was ethanol measured by HPLC, lower than reported in the literature. It is concluded that the affected pitahaya is viable for agroindustrial use, but requires fermentation optimization and more efficient strains.

[1] Estudiante Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana, Pitalito, Colombia. U20172162330@usco.edu.co ; ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7674-7214 ; U20171157325@usco.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8078-4321
*Autor de correspondencia: U20172162330@usco.edu.co

CC BY NC SA

El cultivo de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*) es una cadena frutícola de gran interés para la exportación por su alto valor comercial, aunque enfrenta limitaciones asociadas a problemas fitosanitarios y poscosecha que afectan su rendimiento y calidad (Álvarez-Herrera, Burgos-Chinome & Jaime-Guerrero, 2022). Entre las enfermedades más graves se encuentra la marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum*, que deteriora la pulpa, acorta la vida útil y genera pérdidas económicas.

A pesar de ello, la pitahaya presenta un elevado contenido de sólidos solubles, lo que le otorga un gran potencial para la transformación agroindustrial (Morillo-Coronado, Manjarres-Hernández, Saenz-Quintero & Morillo-Coronado, 2022). Asimismo, la diversidad fenotípica y la caracterización morfoagronómica de su germoplasma respaldan su relevancia para programas de mejoramiento productivo (Morillo-Coronado, Manjarres-Hernández & Forero-Mancipe, 2021).

El desperdicio de fruta no solo genera pérdidas económicas, sino también impactos ambientales y sociales, lo que hace necesario implementar estrategias poscosecha. La transformación en pulpas, jugos, mermeladas o harinas es una alternativa viable para diversificar ingresos y fortalecer la sostenibilidad de la cadena frutícola (FAO, 2019).

En el Huila, este cultivo tiene gran importancia económica para los productores, pero la incidencia de hongos fitopatógenos puede ocasionar hasta un 30% de pérdidas (Moreno et al., 2021). Por ello, resulta indispensable garantizar la calidad del fruto conforme a la Norma Técnica Colombiana 3554, que regula tanto su consumo en fresco como su uso industrial. En este contexto, la presente investigación propone aprovechar los frutos afectados por *Fusarium oxysporum* para la obtención de etanol, generando valor agregado y una alternativa de alto potencial comercial.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio evaluó la producción de bioetanol a partir de pitahaya sana y contaminada con *Fusarium oxysporum*, mediante un diseño experimental con seis tratamientos y 18 unidades experimentales, en los que se midieron etanol, pH y °Brix, analizados con ANOVA y prueba de Tukey en Infostat 2020e, metodología común en fermentación (Tiwari et al., 2023). La investigación se realizó en el SENA Yamboró (Pitalito, Huila), con frutos de grado de madurez 5 provenientes de Palestina (Huila). El hongo se aisló en PDA, se identificó por microscopía electrónica y análisis molecular, confirmándose como *F. oxysporum*, patógeno reportado en pitahaya y otros cultivos (Morán et al., 2021; Restrepo et al., 2022).

Se trabajó con seis tratamientos: FSM (pulpa contaminada), CSM (pulpa contaminada + sana), NFSM (pulpa sana), FM (pulpa contaminada + melaza), CM (pulpa contaminada + sana + melaza) y NFM (pulpa sana + melaza). Todos fueron fermentados con *Saccharomyces cerevisiae* (3,5 mg/3 mL) en frascos de 4000 mL bajo condiciones anaeróbicas y agitación de 30 rpm durante 22 días. Cada dos días se midieron °Brix, pH y parámetros microbiológicos. Los azúcares se cuantificaron con el método de Lane y Eynon (1923), aún vigente en matrices fermentativas (Rosado et al., 1990), y el grado alcohólico con alcoholímetro.

Al finalizar, cada muestra se sometió a destilación fraccionada (78–80 °C, 2 h) para obtener bioetanol, posteriormente analizado por HPLC en columna HyperREZ (L17) con detector de índice de refracción, según protocolo GIC-PR-T-21. Se usaron estándares de etanol, ácido láctico y acético, y las corridas cromatográficas se realizaron por triplicado, con interpolación en curvas de calibración (Tiwari et al., 2023).El papel de *F. oxysporum* en la bioconversión ha sido documentado, mostrando su capacidad para degradar biomasa y producir bioetanol (Ali et al., 2016; Maki et al., 2020), lo que respalda el enfoque de esta investigación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del hongo

Los aislamientos en medio PDA mostraron colonias algodonosas con tonos que evolucionaron de blanco a rosado y finalmente púrpura, coincidiendo con lo descrito por Retana et al. (2018) para *Fusarium oxysporum*. El análisis por microscopía electrónica de barrido (MET) y el estudio molecular confirmaron con un 100% de identidad que el hongo aislado corresponde a *F. oxysporum*, validando la caracterización morfológica y asegurando la precisión en la identificación del patógeno.



Figura 1. Fase inicial de la caracterización del hongo *fusarium*.

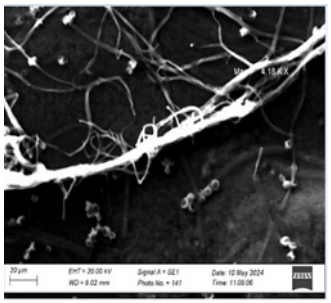


Figura 2. (Determinación de micelios del hongo *fusarium*).

Fermentación

Durante los 22 días de fermentación, el pH descendió progresivamente hasta 3,78 en todos los tratamientos, evidenciando la formación de metabolitos ácidos por *S. cerevisiae*. Aunque este valor favorece la producción de etanol, los mejores crecimientos de la levadura suelen darse con pH iniciales entre 4,5 y 5 (Fajardo & Sarmiento, 2008). Los sólidos solubles (°Brix) disminuyeron de manera continua, reflejando el consumo de azúcares; la reducción fue más marcada en los tratamientos con melaza, lo que sugiere mayor aprovechamiento del sustrato y producción alcohólica, como lo señala Decheco Egúsquiza (2018). La prueba de Tukey agrupó los tratamientos en dos bloques: el Grupo A (FSM, CSM y NFSM) con bajos rendimientos (218–244 ml) y el Grupo B (FM, NFM y CM) con los más altos (626–702 ml), mostrando una conversión de azúcares significativamente superior.

Determinación por HPLC

El bioetanol obtenido de pitahaya afectada por *F. oxysporum* alcanzó un máximo de 250 mg/mL en el tratamiento NFSM, un rendimiento inferior al reportado en otros estudios: Singh et al. (2017) lograron 0,85 mg/mL, Kumar et al. (2020) 3,54–3,88 mg/mL en *Ficus cunia*, Bakonyi et al. (2020) 30,8 mg/mL con fermentaciones mixtas y Kim et al. (2022) 58,9 mg/mL en arroz con *S. cerevisiae*. La melaza no mejoró la fermentación y en algunos casos la redujo, posiblemente por exceso de azúcares o compuestos que generan estrés osmótico. Estos resultados evidencian el potencial de la pitahaya como sustrato agroindustrial, aunque requieren optimización de condiciones, uso de cepas más eficientes y cultivos mixtos para incrementar el rendimiento.

Tabla 1. Concentración promedio de bioetanol en los tratamientos aplicados.

Tratamiento	(mg/ml)
NFM	85,67 a
FM	138,67 b
FSM	139,33 b
CSM	156 c
CM	195,67 d
NFSM	250,33 e

FSM: pulpa de pitahaya contaminada con *Fusarium oxysporum*, **CSM**: mezcla de pulpa contaminada con *Fusarium oxysporum* y pulpa sana, **NFSM**: pulpa de pitahaya sana (sin contaminación), **FM**: pulpa contaminada con *Fusarium oxysporum* suplementada con melaza, **CM**: mezcla de pulpa contaminada y pulpa sana suplementada con melaza y **FM**: pulpa de pitahaya sana suplementada con melaza.
*Medias con una letra común no son significativamente diferentes conforme al tes de Tukey (P>0,05).

Tabla 2. Resultados análisis de varianza.

Variable	Desviación estándar
Rendimiento	40,62
Resultados de alcohol	0,77
pH sin melaza	0,1
pH con melaza	0,03
° Brix con melaza	0,03
° Brix sin melaza	1,19

La desviación estándar mostró mayor variabilidad en el rendimiento (40,62), indicando amplia dispersión de datos. En contraste, pH y °Brix con melaza presentaron valores muy bajos ($\leq$ 0,03), reflejando alta precisión. El alcohol (0,77) y °Brix sin melaza (1,19) tuvieron variabilidad intermedia, siendo este último más inestable por falta de suplementación. En general, pH y °Brix con melaza fueron

los más homogéneos, mientras que el rendimiento fue el parámetro más sensible.

CONCLUSIÓN

La caracterización morfológica, los análisis con microscopía electrónica de barrido y la validación molecular confirmaron con un 100% de coincidencia la presencia de *Fusarium oxysporum*, garantizando la certeza en la identificación del patógeno empleado en el estudio.

En el proceso fermentativo se evidenció una disminución progresiva del pH y de los °Brix durante los 22 días de seguimiento, lo que refleja la conversión de azúcares en bioetanol. No obstante, la adición de melaza no mostró un efecto positivo, e incluso en algunos tratamientos generó inhibición, lo que indica que su uso debe evaluarse con mayor detalle.

Finalmente, la cuantificación por HPLC reveló una concentración máxima de 250 mg/mL de etanol, cifra que resulta baja frente a los valores reportados en la literatura.

REFERENCIAS

Álvarez-Herrera, J. G., Burgos-Chinome, D. Y., & Jaime-Guerrero, M. (2022). Calidad de frutos de pitahaya (*Selenicereus megalanthus* Haw.) sometidos a diferentes recubrimientos durante el almacenamiento. Entramado, 19(1), 1–12. https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.8507

Ali, S. S., Nugent, B., Mullins, E., & Doohan, F. M. (2016). The Fusarium oxysporum species complex: A review on plant pathogenic fungi with diverse ecological niches. AMB Express, 6(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/s13568-016-0185-0

Decheco Egúsquiza, A. C. (2018). Aprovechamiento de residuos de *Ananas comosus* (piña) para la producción de etanol por vía fermentativa de S*accharomyces cerevisiae* [Tesis de pregrado].

FAO. (2019). The state of food and agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fajardo C., E., & Sarmiento. (2008). Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de *Saccharomyces cerevisiae* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. Facultad de Ciencias Básicas, Bogotá, Colombia.

Lane, J. H., & Eynon, L. (1923). Determination of reducing sugars by Fehling's solution with methylene blue indicator. Norman Rodger.

Maki, M., Leung, K. T., & Qin, W. (2020). The prospects of *Fusarium oxysporum f*or consolidated bioprocessing of lignocellulosic biomass to bioethanol. Fermentation, 6(2), 39. https://doi.org/10.3390/fermentation6020039

Morillo-Coronado, A. C., Manjarres Hernández, E. H., & Forero-Mancipe, L. (2021). Phenotypic diversity of morphological characteristics of pitahaya (*Selenicereus megalanthus* Haw.) germplasm in Colombia. Plants, 10(11), 2255. https://doi.org/10.3390/plants10112255

Morillo-Coronado, A. C., Manjarres Hernández, E. H., Saenz-Quintero, Ó. J., & Morillo Coronado, Y. (2022). Morphoagronomic evaluation of yellow pitahaya (*Selenicereus megalanthus* Haw.) in Miraflores, Colombia. Agronomy, 12(7), 1582. https://doi.org/10.3390/agronomy12071582
Morán, D., Ochoa, J., & Rengifo, L. (2021). Biological control for basal rot in yellow pitahaya fruits (*Selenicereus megalanthus*): Ex vivo trials. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 24(2), 1–9.

Restrepo, J., Rojas, M., & Gómez, A. (2022). In vitro assessment for the control of *Fusarium* species using lactic acid bacteria isolated from yellow pitahaya (*Selenicereus megalanthus*). Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 23(1), 1–9.

Rosado, J. L., Solomons, N. W., & Allen, L. H. (1990). Comparison of Eynon–Lane titration and HPLC for sugar analysis in beverages. Journal of Agricultural of the University of Puerto Rico, 74(4), 395–402.

Tiwari, K., Mishra, S., & Singh, R. (2023). Validation of HPLC method for determination of ethanol and carbohydrates in fermented products. Separations, 10(3), 199. https://doi.org/10.3390/separations10030199

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Innovando en la masa de maiz de la empanada colombiana: desarrollo de una premezcla funcional

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Innovating in colombian corn empanada dough: development of a functional premix

Eimmy Johana Córdoba-Peña[1], Alejandro Mejía-Villota[2] and Eduardo Rodríguez-Sandoval[3]

RESUMEN

Palabras clave:
Absorción de aceite
Empanadas
Maíz
Textura.

La empanada colombiana, elaborada tradicionalmente con masa de maíz fresco, enfrenta limitaciones para su industrialización por la complejidad de su preparación. Este estudio formuló una premezcla seca capaz de reproducir las propiedades sensoriales y fisicomecánicas de dicha masa, facilitando su uso en procesos a mayor escala. La metodología se dividió en cuatro fases: caracterización de la masa tradicional, estandarización de la formulación, análisis de premezclas comerciales y desarrollo de una mezcla optimizada. La premezcla base incluyó harina de maíz precocida, fécula de maíz, almidón de yuca y aditivos. Se evaluó la adición de carboximetilcelulosa, goma guar y un emulsificante para mejorar cohesión, elasticidad y absorción de aceite. La combinación de goma guar y emulsificante mostró el mejor desempeño, con buena plasticidad, baja absorción de grasa y estabilidad tras refrigeración. La formulación desarrollada representa una alternativa viable para estandarizar la producción de empanadas sin perder sus atributos tradicionales.

ABSTRACT

Keywords:
Oil absorption
Empanadas
Corn
texture

The Colombian empanada, traditionally made with fresh corn dough, faces limitations for industrial processing due to the complexity of its preparation. This study formulated a dry premix capable of replicating the sensory and physicomechanical properties of traditional dough, facilitating its use in larger-scale production. The methodology was divided into four phases: characterization of fresh corn dough, standardization of the formulation parameters, analysis of commercial premixes, and development of an optimized blend. The base premix included precooked corn flour, corn starch, cassava starch, and additives. The incorporation of carboxymethylcellulose, guar gum, and an emulsifier was evaluated to improve cohesion, elasticity, and oil absorption. The combination of guar gum and emulsifier showed the best performance, with good plasticity, low oil absorption, and post-refrigeration stability. The developed formulation represents a viable alternative to standardize empanada production without compromising traditional attributes.

[1] Facultad de Ciencias Agrarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Semillero de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos (SICTAL). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ecordobap@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6034-300X
[2]Director of Research and Development. Alimentos y Productos en Polvo Poltec S.A.S.,El Palmar, La Estrella. Colombia. alejandro.mejia@poltecsas.com; ORCID: 0000-0003-4306-3266
[3]Facultad de Ciencias Agrarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. edrodriguezs@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9146-2419

CC BY NC SA

La empanada es un alimento tradicional de la gastronomía colombiana, comúnmente elaborado con masa de maíz (*Zea mays* L.), que aporta textura crujiente, sabor característico y buena manejabilidad. Sin embargo, su preparación artesanal dificulta la estandarización de procesos, lo que limita su escalabilidad industrial (Rodríguez Sandoval et al., 2005). Aunque se estima un consumo diario superior a 12 millones de unidades, el 98 % de la producción se realiza de forma artesanal (Redacción Tecnología, 2016), lo que evidencia la necesidad de alternativas tecnológicas. Una opción es el desarrollo de premezclas secas que, al ser rehidratadas, generen masas con propiedades sensoriales y funcionales similares a las tradicionales. Estudios previos han demostrado que hidrocoloides como carboximetilcelulosa (CMC) y goma guar mejoran cohesión y elasticidad, mientras que los emulsificantes contribuyen a la crujencia y estructura del producto frito (Monferrer et al., 2023; Pasquel, 2001). Este trabajo se centró en la formulación de una premezcla a base de harina de maíz precocida, almidones y aditivos funcionales, evaluando su comportamiento frente a masas comerciales y tradicionales. El objetivo fue ofrecer una alternativa viable para la producción semi industrial de empanadas, manteniendo atributos deseables y mejorando la eficiencia del proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo a lo largo de cuatro etapas experimentales, que permitieron abordar de forma progresiva el desarrollo de una premezcla funcional para masa de empanadas, basada en características del maíz (*Zea mays* L.) y con mejoras orientadas a su uso industrial.

Fase uno: Caracterización de la masa de maíz fresco

Se empleó maíz amarillo seco (*Zea mays* L.), cocido en agua a fuego medio hasta alcanzar textura blanda y reposado 15 min antes de la molienda en molino manual de acero inoxidable, lo que permitió mayor homogeneidad en la masa. A esta se incorporaron harina precocida de maíz amarillo, sal y condimentos deshidratados, ajustando las proporciones de manera sensorial hasta obtener la textura deseada. Con la masa obtenida se elaboraron empanadas manualmente, evaluando cohesión y resistencia al armado. La fritura se realizó en aceite vegetal refinado a 200 °C durante 10 min en freidora eléctrica de 3 L, explorando posteriormente variaciones de tiempo y temperatura. Esta etapa permitió caracterizar el comportamiento de la masa fresca y establecer los atributos sensoriales y fisicomecánicos de referencia para el diseño de las premezclas.

Fase dos: Estandarización de la formulación base con maíz fresco

En esta fase se estandarizaron las condiciones para la formulación de masa a partir de maíz fresco, utilizada como muestra patrón. Se determinó que el maíz cocido absorbía cerca del 120 % de su peso en agua, y que la molienda en caliente (15 min tras cocción) mejoraba la plasticidad. La fritura se fijó en 180 °C durante 6–7 min en freidora eléctrica, realizando tres repeticiones por cada formulación. La absorción de aceite se estimó mediante la diferencia entre el volumen o masa del aceite antes y después de la fritura, considerando una pérdida estándar del 2 % por evaporación y adherencia (Labropoulos et al, 2013). Las mediciones se realizaron en balanza digital de precisión (±0,01 g). La fórmula usada fue la siguiente:

$$\text{Aceite absorbido (g)} = [A_i - A_f - (A_i * 0{,}02)] \quad (1)$$

$$\text{Absorción de aceite (\%)} = \frac{\text{Aceite absorbido (g)}}{\text{Peso del alimento (g)}} \times 100 \quad (2)$$

Esta formulación base fue utilizada como referencia sensorial y funcional durante las siguientes etapas.

Fase tres: Evaluación de premezclas comerciales

Se evaluaron tres premezclas comerciales compuestas por harina precocida de maíz, fécula, almidón de yuca, condimentos y aditivos. Se determinó su requerimiento de agua (68 %–127 %) y se analizaron en textura, cohesión, armado, compatibilidad con rellenos (de manera sensorial y visual) y comportamiento en fritura. Se registraron grietas, deformaciones, color y crujencia, y la absorción de aceite. Esta fase permitió identificar limitaciones funcionales y orientar la formulación de la mezcla experimental.

Fase cuatro: Formulación y evaluación de la premezcla experimental

A partir de los ingredientes comunes en las premezclas analizadas, se formuló una mezcla base compuesta por harina precocida de maíz amarillo (83 %), fécula de maíz (10 %), almidón de yuca (5 %), sal (1 %), azúcar (1 %) y adobo (1 %). Esta base sirvió como matriz para la

incorporación de aditivos funcionales: carboximetilcelulosa (CMC), goma guar y un emulsificante (E472e), evaluados en concentraciones de 0,5 % y 1 % en peso. Las masas fueron hidratadas en proporciones ajustadas entre 104 % y 122 %, según la formulación. Se evaluaron parámetros como manejabilidad, cohesión, textura al tacto y facilidad de armado. Las empanadas se frieron a 180 °C por 6 min y se analizaron en cuanto a apariencia externa, crujencia, color y absorción de aceite. Luego se refrigeraron por 24 h a 4 °C y se repitieron los análisis para observar cambios en textura, plasticidad y resistencia estructural. Las formulaciones fueron evaluadas sensorialmente por un panel de 10 jueces no entrenados mediante una escala hedónica de 7 puntos para olor, color, sabor, textura y aceptación general. Además, se realizaron pruebas de fracturabilidad y absorción de aceite en las muestras más prometedoras (masa de maíz, premezcla base, variantes con emulsificante + goma guar y una comercial). La textura se midió con un texturómetro (CT3 Brookfield, Toronto Canadá), registrando la fracturabilidad, con tres repeticiones por muestra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis general de las premezclas comerciales utilizadas inicialmente para la elaboración de empanadas se observó que la premezcla superempanada tuvo una textura adecuada cuando se elaboró la masa y no presentó grietas en el formado del producto (Tabla1). Las masa de maíz para empanadas se destacan por su cohesión y plasticidad.. Estos resultados coinciden con lo reportado por Rodríguez Sandoval et al. (2005), quienes describen la superioridad reológica y textural de masas elaboradas a partir de granos recién cocidos frente a productos procesados.

La Figura 1 evidencia diferencias marcadas entre la masa fresca y las premezclas comerciales en cuanto a absorción de agua y de aceite. Mientras la masa de maíz fresco mostró una hidratación estable (~120 %) y alta retención de grasa, las premezclas comerciales presentaron variabilidad en la cantidad de agua requerida (68–127 %) y menor absorción de aceite, lo que afectó su cohesión y estabilidad tras la fritura. En contraste, la formulación experimental con goma guar y emulsificante redujo significativamente la absorción de aceite y mejoró la plasticidad, acercándose al desempeño de la masa fresca. Este comportamiento respalda lo señalado por Monferrer et al. (2023), quienes destacan que los hidrocoloides y emulsificantes contribuyen a generar estructuras más compactas y menos permeables al aceite en productos fritos Dicho comportamiento evidencia limitaciones en el diseño de estas formulaciones para reproducir fielmente la funcionalidad de la masa tradicional, lo cual ya ha sido señalado en estudios previos sobre matrices a base de almidón y maíz (Castañeda Peláez, 2022).

Tabla 1. Características de calidad de las premezclas comerciales de empanadas.

Premezcla	Ingredientes	Textura al armado	Grietas en el armado	Compatibilidad con relleno	Mejoras
1 *(Mao)*	Harina de maíz amarillo precocido, fécula de maíz, almidón de yuca, estabilizante (SSL y CMC) y comino	Buena	Sí	Carne (no) Queso (Sí)	Adición de condimentos
2 *(Empanalista)*	Harina de maíz precocida, almidón de yuca, azúcar, sal, fécula de maíz, bicarbonato de sodio , comino	Mala, porosa y quebradiza	Sí	Carne (no) Queso (no)	Adición de mayor cantiad de agua y condimentos, amasado en caliente
3 *(Superempanada)*	Harina de maíz amarillo, almidón de yuca, azúcar, sal, pirofosfato de sodio, bicarbonato de sodio, fécula de maíz	Buena	No	Carne (Si) Queso (Si)	Amasado en caliente

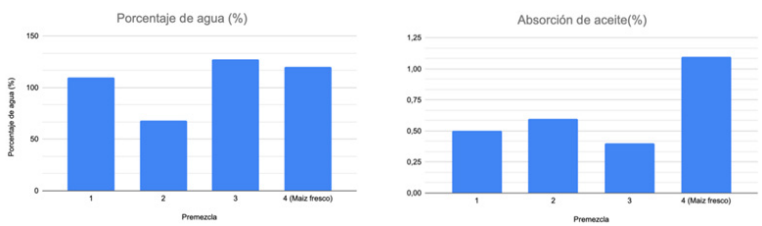


Figura 1. Absorción de agua en la formación de masa (Izquierdo) y absorción aceite en el producto (Derecho) para premezclas comerciales de empanadas y empanada de maíz fresco

La formulación experimental basada en harina precocida de maíz, fécula y almidón de yuca mostró un desempeño inicial aceptable; sin embargo, tras la refrigeración evidenció cierta fragilidad estructural. Este efecto fue corregido mediante la incorporación de goma guar y un emulsificante (E472e), combinación que, según las tablas comparativas (Tablas 2 y 3), mejoró la cohesión, redujo la absorción de aceite y mantuvo la estabilidad estructural después del almacenamiento en frío. Tales hallazgos son consistentes con lo señalado por Monferrer et al. (2023), quienes destacan que los hidrocoloides incrementan la elasticidad y cohesión de las masas, y por Pasquel (2001), quien subraya el rol de los emulsificantes en la crujencia y estructura de productos fritos.

Tabla 2 . Resultados obtenidos de manera visual y sensorial para tratamientos de formulación propia (Izquierda) y evaluación sensorial con panel no entrenado (Derecha).

Tipo de premezcla	Cantidad de agua añadida (%)	Absorción de aceite (%) (Sin refrigeración)	Absorción de aceite (%) (Luego de la refrigeración)	Impacto de la refrigeración
Premezcla base	114	0,6	0,8	Quebradiza y absorbió humedad
Premezcla base + Emulsificante	122	0,7	0,6	Más seca, pérdida de sabor
Premezcla base + CMC	108	0,4	0,6	Pérdida de sabor
Premezcla base + Goma Guar	114	0,6	0,6	Porosidad
Premezcla base + Emulsificante + CMC	104	0,5	0,6	Presentó grietas
Premezcla base + Emulsificante + Goma Guar	122	0,6	0,5	Mejor sabor

Código	Olor	Color	Sabor	Textura	General
Premezcla base	5.6	5.2	5.5	6.1	5.5
Premezcla base+ Emulsificante	6.1	5.4	6.3	5.0	5.5
Premezcla base + CMC	5.5	5.4	4.0	4.6	4.7
Premezcla base + Goma Guar	5.7	5.6	5.5	5.7	5.6
Premezcla base+ Emulsificante+CMC	5.9	6.4	5.6	5.0	5.7
Premezcla base+ Emulsificante +Goma Guar	6.2	5.4	6.2	5.4	6.0

Los análisis de fracturabilidad (Tabla 3) evidenciaron que la formulación con hidrocoloide y emulsificante alcanzó valores de fuerza de ruptura cercanos a los de la masa comercial de referencia, lo que sugiere una textura comparable desde el punto de vista instrumental. Asimismo, la evaluación sensorial respaldó estos resultados (Tabla 2), mostrando mayores puntuaciones en crujencia y aceptación general para dicha formulación, superando incluso a varias de las premezclas comerciales. Estos resultados coinciden con lo reportado por Rojas y Pérez (2014) en empanadas chilenas y por Lorenzo et al. (2020) en formulaciones libres de gluten, donde la optimización con aditivos permitió reproducir atributos sensoriales característicos.

Tabla 3. Absorción de aceite y fracturabilidad para premezclas desarrolladas y comerciales.

Tratamiento	Almidón usado	Absorción de aceite (%) (Antes de la refrigeración)	Absorción de aceite (%) (Luego de la refrigeración)	Fracturabilidad (N)
Premezcla inicial	Gel Starch XP	0,6	1	3,73
	Almidón nativo	0,9	1,1	3,329
Premezcla inicial+ Emulsificante+ Goma Guar	Gel Starch XP	0,6	0,9	3,903
	Almidón nativo	1	1,3	4,084
Superempanada	Almidón nativo	0,4	1,1	3,624
Maíz fresco	Almidón nativo	1,5	1,7	0,2253

Los resultados experimentales muestran que la combinación estratégica de hidrocoloides y emulsificantes es determinante para aproximar la textura, cohesión y comportamiento en fritura de la masa fresca, ofreciendo una alternativa tecnológica que supera las limitaciones observadas en las premezclas comerciales actuales.

CONCLUSIÓN

El análisis confirmó que la masa de maíz fresco presenta las mejores propiedades sensoriales y fisicomecánicas, mientras que las premezclas comerciales evaluadas evidenciaron deficiencias en cohesión, textura y absorción de aceite. La formulación experimental, basada en harina precocida de maíz, fécula de maíz y almidón de yuca, mostró un desempeño superior al incorporar goma guar y emulsificante, alcanzando mayor similitud con la masa tradicional y estabilidad post-refrigeración. Estos resultados confirman que el uso estratégico de aditivos funcionales puede contribuir a la formulación de premezclas más eficientes, que

conserven las propiedades deseadas de la masa de maíz fresco, al tiempo que facilitan su aplicación en procesos de producción a mayor escala. La premezcla desarrollada constituye, por tanto, una alternativa tecnológica viable para el mercado de empanadas artesanales e industriales.

REFERENCIAS

Castañeda Peláez, J. A. (2022). Estandarización de una metodología para la elaboración de empanadas de maíz precocido: evaluación fisicoquímica y sensorial. Universidad Nacional de Colombia.

Hernández Montoya, Y. (2018). Desarrollo de una premezcla a base de maíz para la elaboración de empanadas colombianas. Universidad de Antioquia

Labropoulos, A. E., Varzakas, T., Anestis, S., Kostas, T., & Panagiotou, P. (2013). Preparation, storage and distribution of coated and uncoated chicken meat products. International journal of food engineering, 9(2), 209-215.doi 10.1515/ijfe-2012-0018

Lorenzo, G., Zaritzky, N., & Califano, A. (2008). Optimization of non-fermented gluten-free dough composition based on rheological behavior for industrial production of “empanadas”. Journal of Cereal Science, 48(1), 224–231. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.09.009

Monferrer, A., Cortés, C., Cubero, N., & Gómez, L. (2023). Modificando la textura de los alimentos. Manual de uso de los hidrocoloides (2.ª ed.). Ediciones Díaz de Santos.

Pasquel, A. (2001). Gomas: una aproximación a la industria de alimentos. Recuperado de https://cloudfront.net .

Redacción Tecnología. (2016, octubre). Máquinas colombianas para hacer empanadas son un éxito en el exterior. El Espectador. Recuperado de https://www.elespectador.com

Rodríguez Sandoval, E., Fernández Quintero, A., & Ayala Aponte, A. (2005). Reología y textura de masas: aplicaciones en trigo y maíz. Ingeniería e Investigación, 25(1), 72–78. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64325110

Rojas, L., & Pérez, A. (2014). Evaluación tecnológica y sensorial de empanadas chilenas elaboradas con harinas alternativas. Chilean Journal of Agricultural Research, 74(3), 327–334. https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000300015

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Empanadas elaboradas con almidón de yuca modificado enzimáticamente con alfa-amilasa y amiloglucosidasa: desarrollo y evaluación tecnológica

Empanadas made with cassava starch enzymatically modified with alpha-amylase and amyloglucosidase: development and technological evaluation

Eimmy Johana Córdoba Peña[1] , Zaray Valentina Jiménez Hernández[2] and Edith Marleny Cadena Chamorro[2]

Palabras clave:
Absorción de aceite
Empanadas
Maíz
Textura

RESUMEN

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una raíz tropical rica en almidón, de gran relevancia para la agroindustria latinoamericana. Sin embargo, su almidón presenta limitaciones en productos fritos, como las empanadas, donde se busca crocancia y un dorado atractivo. Con el fin de superar estas restricciones, este estudio evaluó la modificación enzimática del almidón de yuca mediante α-amilasa y amiloglucosidasa. Los resultados evidenciaron que la α-amilasa mejoró en las empanadas la crocancia y redujo la absorción de aceite, alcanzando las mejores valoraciones sensoriales en olor y sabor. En contraste, la amiloglucosidasa intensificó el color rojizo y oscuro por la liberación de azúcares reductores que favorecieron las reacciones de Maillard; no obstante, disminuyó la aceptación general debido a una textura más débil. El tratamiento combinado (α-amilasa/amiloglucosidasa) presentó un desempeño intermedio, con ventajas frente al congelamiento al reducir la retrogradación del almidón. En este contexto, se concluye que la modificación enzimática del almidón de *M. esculenta* Crantz influye significativamente en la calidad de empanadas fritas. La α-amilasa se proyecta como la enzima más prometedora para optimizar textura y reducir contenido graso, mientras que la combinación de α-amilasa y amiloglucosidasa ofrece beneficios en el almacenamiento prolongado.

Keywords:
Oil absorption
Empanadas
Corn
Texture

ABSTRACT

Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is a tropical root rich in starch and highly relevant to the Latin American agroindustry. However, its starch presents limitations in fried products, such as empanadas, where crispness and an appealing golden color are desired. To overcome these constraints, this study evaluated the enzymatic modification of cassava starch using α-amylase and amyloglucosidase. The results showed that α-amylase improved crispness in empanadas and reduced oil absorption, achieving the best sensory ratings for aroma and flavor. In contrast, amyloglucosidase intensified the reddish and darker color due to the release of reducing sugars that promoted Maillard reactions; nevertheless, it decreased overall acceptance because of a weaker texture. The combined treatment (α-amylase/amyloglucosidase) showed an intermediate performance, with advantages during freezing by reducing starch retrogradation. In this context, it is concluded that enzymatic modification of *M. esculenta* Crantz starch significantly influences the quality of fried empanadas. α-Amylase emerges as the most promising enzyme to optimize texture and reduce fat content, while the combination of α-amylase and amyloglucosidase offers benefits for long-term storage.

[1] Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Semillero de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos (SICTAL). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ecordobap@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6034-300X

[2]Facultad de Ciencias Agrarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. zjimenez@unal.edu.co ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8160-8672; emcadenac@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7143-2009

CC BY NC SA

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una raíz tropical ampliamente cultivada en América Latina, reconocida por su alto contenido de almidón y su importancia socioeconómica como cultivo alimenticio e industrial. El almidón extraído de la yuca posee características funcionales particulares como alta viscosidad, claridad en pasta y rápida gelatinización, pero también presenta limitaciones en aplicaciones donde se requiere estabilidad térmica, textura crujiente o mayor capacidad de dorado, como en productos fritos tipo empanadas (Moorthy, 2002). La modificación enzimática del almidón es una alternativa tecnológica que permite mejorar sus propiedades sin necesidad de introducir agentes químicos sintéticos, lo cual se alinea con las tendencias de producción limpia y natural. En particular, el uso combinado de α-amilasa y glucoamilasa permite una hidrólisis controlada del almidón, generando dextrinas y azúcares reductores que pueden alterar favorablemente la textura y apariencia de productos horneados o fritos (Vermeylen et al., 2006). Estas enzimas rompen enlaces α-1,4 y α-1,6 glucosídicos, lo que modifica la estructura del almidón nativo, reduciendo su peso molecular y alterando su comportamiento térmico y funcional (Singh et al., 2007). Aplicar esta tecnología a la formulación de empanadas es interesante, ya que estas requieren una corteza que sea crujiente, dorada y visualmente atractiva, características fuertemente influenciadas por la interacción entre el almidón y los procesos térmicos durante la fritura. Estudios previos han demostrado que la presencia de azúcares libres derivados del almidón puede intensificar las reacciones de Maillard y caramelización, incrementando el color y la percepción sensorial del producto final (Bouvier & Campanella, 2014). En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la modificación del almidón de yuca con α-amilasa y glucoamilasa sobre las propiedades de textura, crocancia y dorado de la corteza de empanadas fritas. Para ello, se realizó una hidrólisis controlada del almidón, se aplicaron tratamientos térmico-enzimáticos y se evaluaron las propiedades físico-químicas y sensoriales del producto final. Este estudio busca aportar al desarrollo de productos alimenticios mejorados funcionalmente, utilizando tecnologías sostenibles aplicadas a materias primas de origen local.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló con un diseño experimental que se dividió en dos etapas complementarias: la modificación enzimática del almidón de yuca y su aplicación en la elaboración de empanadas. Para el tratamiento enzimático, se prepararon suspensiones de 30 g de almidón en 100 mL de agua, ajustadas a pH 5,0–5,5, y se realizaron cuatro tratamientos: almidón nativo (control), con α-amilasa (*EC 3.2.1.1*), con amiloglucosidasa (*EC 3.2.1.3*), y con la combinación de enzimas (α-amilasa/amiloglucosidasa). Las suspensiones se incubaron a 60 °C, bajo agitación constante (150 rpm) durante dos horas, y posteriormente se centrifugaron para recuperar la fracción sólida como almidón modificado.

Y una segunda etapa que consistió en la elaboración y caracterización de las empanadas. Para la elaboración, el maíz seco se cocinó durante dos horas en una relación 2:1 agua:maíz, se dejó reposar 30 minutos y se molió hasta obtener una masa homogénea. A esta base se adicionaron sal, condimentos, harina de maíz amarillo (5–10%) y almidón de yuca (nativo o modificado) en proporciones del 5–10% respecto al peso total, con el fin de evaluar su influencia en la cohesión y resistencia de la masa.

Las empanadas obtenidas se sometieron a tres tipos de análisis. En primer lugar, se determinó el color mediante el sistema CIELab (L*, a*, b*) usando un colorímetro CR-400/410 con las coordenadas cromáticas se determinó DE* de los tratamientos con respecto al control, como una medida del cambio de color. En segundo lugar, la absorción de aceite se cuantificó por diferencia de peso en el medio de fritura (3 L de aceite a 180 °C durante 6 minutos). Finalmente, se realizó una evaluación sensorial con 10 jueces no entrenados, calificando olor, color, sabor, textura e impresión global en escala hedónica de 7 puntos. Además, se evaluó la respuesta al congelamiento almacenando las empanadas en condiciones convencionales por 5 y 6 días, observando facilidad de separación, integridad estructural y calidad tras la fritura.

Esta metodología permitió integrar la modificación enzimática del almidón con su aplicación práctica en una matriz alimentaria tradicional, evaluando de manera

integral sus efectos tecnológicos, sensoriales y de almacenamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La modificación enzimática del almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) evidenció efectos diferenciales según el tipo de tratamiento aplicado. El rendimiento gravimétrico del almidón recuperado alcanzó 90% en el control, 80% con α-amilasa y con la mezcla de enzimas, y 78% con amiloglucosidasa (Figura 1A). Este comportamiento confirma que la amiloglucosidasa posee mayor capacidad hidrolítica al romper tanto enlaces α-1,4 como α-1,6, liberando glucosa y dextrinas solubles que se pierden en el sobrenadante (Ashogbon & Akintayo, 2014). La combinación de enzimas, aunque mostró un rendimiento intermedio, generó sedimentos con material vegetal y gránulos erosionados, lo que sugiere una acción sinérgica con enzimas complementarias presentes en los preparados comerciales (Zhang et al., 2012).

Como resultado del proceso de fritura, en la absorción de aceite, se observó que la α-amilasa redujo la retención al 0,6% frente al 1,5% del tratamiento control (Figura 1B). Este efecto se atribuye a la formación de gránulos parcialmente erosionados pero con menor porosidad capilar, lo que limita la entrada de lípidos (Gunaratne & Hoover, 2002). Por el contrario, la combinación de enzimas favoreció una mayor absorción debido a la generación de estructuras más porosas y material fibroso capaz de retener aceite (Zaidul et al., 2007).

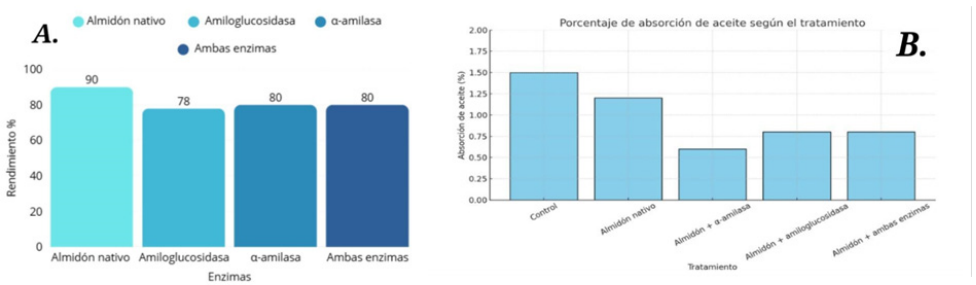


Figura 1. Efecto de la modificación enzimática del almidón de yuca. A. Rendimiento del almidón de yuca; B. Absorción de aceite en la empanada.

La medición instrumental de color mostró que el tratamiento con amiloglucosidasa redujo la luminosidad (L* = 51,81) y aumentó el componente rojo (a* = 7,85), intensificando tonalidades oscuras y rojizas. Este fenómeno se explica por la mayor disponibilidad de azúcares reductores, que aceleran las reacciones de Maillard y caramelización durante la fritura (Bouvier & Campanella, 2014). En contraste, el almidón nativo y el tratado con α-amilasa preservaron superficies más claras (L* > 54), manteniendo un dorado más uniforme y aceptable para el consumidor (Tabla 1A).

Tabla 1. Efecto de la modificación enzimática del almidón de yuca en las propiedades de la empanada. A. Propiedades colorimétricas; B. Evaluación sensorial.

A

Grupo	L*	a*	b*	ΔE*
Nativo	50,64 ±1,01	7,85±0,16	33,4±0,67	-
Control	57,02±1,66	6,34±0,74	36,66±0,40	-
Amiloglucosidasa	51,81±0,64	7,85±0,30	36,92±0,97	3,75
α-Amilasa	54,79±1,44	6,09±0,36	37,52±1,20	6,13
Mix	54,04±1,02	6,06±0,28	35,19±1,33	4,26

B

Código	Olor	Color	Sabor	Textura	General
A. Almidón Nativo	5.8	5.2	5.7	6.1	5.7
B. Almidón + α-amilasa	6.1	5.4	6.3	5.0	5.5
C. Almidón + Amiloglucosidasa	5.5	5.4	4.0	4.6	4.7
D. Mix (Amiloglucosidasa/α-amilasa)	5.7	5.6	5.5	5.7	5.6
E. Control	5.9	6.4	5.6	5.0	5.9

El tratamiento con α-amilasa recibió las mejores calificaciones en olor (6,1) y sabor (6,3), lo cual refleja una mejora en atributos organolépticos sin comprometer la estructura. En cambio, la amiloglucosidasa redujo la aceptación general (4,7), debido a una textura débil y un sabor menos apreciado, lo cual coincide con estudios previos donde la hidrólisis excesiva disminuye la cohesión de las matrices alimentarias (Singh et al., 2007). El control, sin modificación enzimática, resultó el más equilibrado en la percepción global (5,9), mostrando un balance entre color, crocancia y sabor (Tabla 1B).

Con respecto, a la respuesta al congelamiento, todos los tratamientos presentaron fragilidad tras una semana, con fracturas en las puntas de las empanadas, zonas de menor soporte estructural. Sin embargo, las formuladas con almidón nativo mostraron mayor cohesión, mientras que la mezcla de enzimas evidenció ventajas en reducción de retrogradación, lo que se relaciona con la presencia de cadenas cortas generadas por la amiloglucosidasa, capaces de disminuir la recristalización de amilosa y la sinéresis (Tester et al., 2004).

CONCLUSIÓN

La modificación del almidón de yuca mediante enzimas como la α-amilasa y la amiloglucosidasa evidenció un impacto significativo en la absorción de aceite y las propiedades sensoriales de las empanadas fritas, especialmente en textura, color y sabor. Siendo resultados promisorios para el sector alimentario en el contexto de calidad y factibilidad técnica. El tratamiento con alfa-amilasa mejoró notablemente la crocancia, mientras que el control presentó una mayor aceptación general por su equilibrio entre atributos. Sin embargo, el uso exclusivo de amiloglucosidasa redujo la aceptación sensorial, lo que sugiere que la combinación controlada de enzimas puede optimizar la funcionalidad del almidón en matrices alimentarias, representando una estrategia tecnológica viable para mejorar la calidad de productos fritos tradicionales. Los resultados de la prueba de color sugieren que la modificación enzimática del almidón de yuca influye significativamente en las propiedades ópticas del producto final. Amiloglucosidasa tanto sola como en mezcla, tiende a intensificar los tonos oscuros y rojizos de la superficie, probablemente debido al incremento en la disponibilidad de azúcares reductores y compuestos reactivos al calor, mientras que el almidón nativo y el modificado con alfa-amilasa preservan una apariencia más clara y amarillenta.

REFERENCIAS

Ashogbon, A. O., & Akintayo, E. T. (2014). Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review. Starch/Stärke, 66(1-2), 41–57. https://doi.org/10.1002/star.201300106

Bouvier, J. M., & Campanella, O. H. (2014). Extrusion Processing Technology: Food and Non-Food Biomaterials. Wiley-Blackwell.

Gunaratne, A., & Hoover, R. (2002). Effect of heat–moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. Carbohydrate Polymers, 49(4), 425–437. https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00354-X

Moorthy, S. N. (2002). Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: A review. Starch/Stärke, 54(12), 559–592. https://doi.org/10.1002/1521-379X(200212)54:12<559::AID-STAR559>3.0.CO;2-F

Singh, J., Singh, N., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2007). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. Food Chemistry, 81(2), 219–231. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00416-8

Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. Journal of Cereal Science, 39(2), 151–165. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001

Vermeylen, R., Goderis, B., Reynaers, H., Delcour, J. A., & Jonas, A. (2006). Gelatinization of starch in excess water: Beyond the melting of lamellar crystallites. A macroscopic and microscopic view. Macromolecules, 39(22), 8316–8322. https://doi.org/10.1021/ma061455j

Zaidul, I. S. M., Yamauchi, H., Kim, S. J., Hashimoto, N., Noda, T., & Takigawa, S. (2007). Effect of granule size on physicochemical properties of sago starch. Starch/Stärke, 59(8), 456–464. https://doi.org/10.1002/star.200700631

Zhang, B., Chen, L., Xie, F., Li, X., & Truss, R. W. (2012). Understanding starch retrogradation: New insights from macromolecular and structural characterization. Carbohydrate Polymers, 87(2), 1038–1043. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.050

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Innovación en pan aliñado: impacto de la masa madre en su calidad

Innovation in aliñado bread: impact of sourdough on its quality

Gregorio Macea Jiménez[1] and Eduardo Rodríguez Sandoval[2]

Palabras clave:
Análisis del Perfil de Textura (TPA)
Farinógrafo
Masa Madre

RESUMEN

Ante la creciente demanda de alimentos funcionales y saludables se ha intensificado el uso de la masa madre. Esta es una levadura natural que potencia los aromas, sabores y biodisponibilidad de nutrientes mediante la fermentación prolongada En consecuencia, este estudio evalúa sus efectos sobre las propiedades farinográficas y de calidad sensorial en un pan aliñado y determina la relación optima entre masa madre y levadura instantánea. Para esto, se realizaron cinco tratamientos y se analizó su comportamiento reológico, tiempos de amasado y fermentación, rendimiento, volumen, análisis del perfil de textura (TPA) y porosidad. Se usó la prueba de ANOVA simple para el análisis estadístico. Como resultado, el tratamiento con mejor desempeño fue 20% masa madre y 0,5% levadura instantánea con respecto a la harina de trigo, el cual reportó un tiempo óptimo de desarrollo de la masa y estabilidad, el mayor rendimiento, porosidad, elevado volumen y una miga más suave. Finalmente, la masa madre sí mejora la calidad del pan aliñado y la convierte en una herramienta biotecnológica para procesos agroindustriales.

Keywords:
Texture Profile Analysis (TPA)
Farinograph
Sourdough

ABSTRACT

Due to the growing demand for functional and healthy foods, the use of sourdough has intensified. This is a natural yeast that enhances aromas, flavors, and the bioavailability of nutrients through prolonged fermentation. Consequently, this study evaluates its effects on the farinographic and sensory quality properties in aliñado bread and determines the optimal ratio between sourdough and instant yeast. To this end, five treatments were carried out and their rheological behavior, kneading and fermentation times, yield, volume, texture profile analysis (TPA), and porosity were analyzed. The simple ANOVA test was used for statistical analysis. As a result, the treatment with the best performance was 20% sourdough and 0.5% instant yeast with respect to wheat flour, which reported an optimal dough development time and stability, the highest yield, porosity, high volume, and a softer crumb. Finally, sourdough does improve the quality of seasoned bread and makes it a biotechnological tool for agro-industrial processes.

[1]Facultad de Ciencias Agrarias. Semillero de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (SICTAL). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. gmacea@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9357-8451.

[2]Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. edrodriguezs@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9146-2419.

CC BY NC SA

La tendencia por el consumo de alimentos naturales y funcionales ha llevado a retomar preparaciones ancestrales como lo es la incorporación de la masa madre a los productos panificados, esta es una levadura natural que, con tiempo prolongado de fermentación, microorganismos endógenos de la harina de trigo (*Triticum spp*. L.), y microorganismos ambientales crea un agente leudante natural para la panificación (Pontonio et al, 2025). Se han identificado que las bacterias ácido-lácticas (BAL) y las levaduras son predominantes, estos microorganismos conviven de forma simbiótica creciendo y desarrollando procesos enzimáticos que generan ácidos orgánicos, hidrolisis en cadenas de polisacáridos, reducción de ácido fítico y aumento en la biodisponibilidad de micronutrientes minerales del pan (Lu et al, 2025). Además, durante el proceso de fermentación se producen compuestos como alcoholes, aldehídos, ésteres y cetonas, responsables de aumentar los aromas y el sabor en el producto final (Păucean, 2024). Se elaboró una masa madre a partir de harina de trigo y se incorporó a la formulación del pan aliñado tradicional de la cultura colombiana con el fin de determinar bajo diferentes concentraciones de levadura instantánea la mejor relación entre las propiedades farinográficas y características de calidad sensoriales, asegurando su inocuidad y garantizando al consumidor un producto con prebióticos, con menos aditivos y conservantes añadidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La masa madre se elaboró utilizando el método de la escuela nacional de panadería campesina y popular del SENA (Rodríguez & Prada, 2023). Se integró en un recipiente transparente y sellable agua y harina de trigo en proporciones 1:1, se dejó abierto durante 3 h y posteriormente se dejó sellado hasta completar 24 h. Este proceso se repitió durante 5 días. Se adaptaron las formulaciones del pan aliñado y realizaron cinco tratamientos: T1 (Pan de control - 0,7% de levadura instantánea), T2 (20% de masa madre), T3 (30% prefermento, 20% de masa madre y 0,7% de levadura instantánea), T4 (20% de masa madre, 0,7% de levadura instantánea) y T5 (20% de masa madre, 0,5% de levadura instantánea). Se realizó la medición del comportamiento reológico de la harina de trigo utilizando un farinógrafo (Farinógrafo®-AT, Brabender® GmbH y Co. KG, Duisburg, Germany), conforme al método AACC 54-21 (Manjarres-Pinzon et al., 2024). Se elaboraron de los panes aliñados usando los siguientes ingredientes y equipos: Masa madre, harina de trigo, levadura instantánea, leche en polvo, azúcar, margarina, agua, huevo y sal; balanza de precisión, amasadora industrial, moldes, cámara de fermentación, horno a gas. Se pesó, se añadió y se integró en la amasadora, se dividió en porciones, se estiraron, se enrollaron y se almacenaron en moldes. Luego se fermentó y se horneó. Se tomaron las medidas de rendimiento, volumen específico utilizando el método de desplazamiento de semillas de mijo (López et al., 2012), análisis del perfil de textura (TPA) y compresión con un texturómetro Brookfield CT3 (Suárez, 2024). Se realizó un análisis de porosidad escaneando porciones bajo una caja oscura y procesando las imágenes en el software ImageJ (Zapata et al., 2019). Por último, se analizaron los resultados con el software Statgraphics 19, a través de la prueba ANOVA simple se determinaron las diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($P<0,05$). Los tratamientos se realizaron por triplicado y de forma aleatoria, en total 15 corridas experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en la Tabla 1, el comportamiento reológico presentó cambios estadísticamente significativos entre T1 y T3, T4, T5, en estos últimos se redujo el tiempo de desarrollo de la masa (DDT), absorción de agua, estabilidad y se aumentó el índice de tolerancia al mezclado (MTI) y grado de caída (Drop-off). Sin embargo, estos cambios no deterioraron la calidad panificable de la harina de trigo, en cambió T5, tuvo mayor DDT y estabilidad, clasificando como una harina de óptima calidad para panificación con un DDT>8:00 min y estabilidad>12:00 visibles en la Figura 1, al igual que T1 (Zhao et al, 2025).

Respecto a los tiempos de amasado y fermentación en la Tabla 2, se observó que al incorporar la masa madre disminuyó el tiempo de amasado. Asimismo, se observó un mayor rendimiento y un volumen específico similar a T1 entre los tratamientos combinados masa madre y levadura instantánea. En estas características T5 tuvo el mayor rendimiento, aunque pasó un mayor tiempo en fermentación. Lo anterior coincide con lo reportado por autores como Hernández-Aguilar et al. (2022), la adición de ingredientes funcionales y fermentaciones prolongadas pueden modificar positivamente el rendimiento y las propiedades tecnológicas del pan.

Tabla 1. Resultados del comportamiento reológico obtenidas en el farinógrafo.

Tratamiento	DDT [min:s]	Absorción de Agua [%]	Estabilidad [min:s]	MTI [UF]	Drop-off [UF]
T1	9:11±0:34^{c}	60,67±0,58^{c}	18:00±01:16^{c}	12,33±2,89^{a}	31,33±6,66^{a}
T2	9:18±0:22^{c}	46,10±0,45^{b}	15:03±00:12^{ab}	20,67±3,21^{b}	52,33±4,16^{b}
T3	7:26±0:07^{a}	30,90±0,72^{a}	13:34±01:28^{a}	29,67±6,43^{c}	55,00±8,72^{b}
T4	7:56±0:02^{ab}	46,43±0,60^{b}	15:18±00:39^{ab}	20,67±2,52^{b}	47,00±2,65^{b}
T5	8:29±0:26^{b}	46,43±0,60^{b}	15:29±00:57^{b}	21,33±2,52^{b}	45,00±5,20^{b}

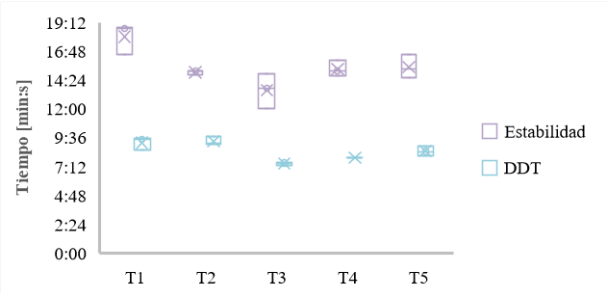


Figura 1. Distribución de la Estabilidad y DDT por tratamiento.

Tabla 2. Resultados en tiempos del proceso, rendimiento y volumen específico.

Tratamiento	Tiempo de Amasado [h:min]	Tiempo de Fermentación [h:min]	Rendimiento [%]	Volumen Específico [m^3kg^{-1}]
T1	0:19±0:02^{b}	1:15±0:05^{a}	92,74±0,59^{a}	0,0055±0,0004^{c}
T2	0:16±0:01^{a}	4:47±0:12^{c}	93,73±0,76^{ab}	0,0038±0,0001^{a}
T3	0:16±0:02^{a}	1:18±0:08^{ab}	92,56±1,14^{a}	0,0054±0,0003^{c}
T4	0:17±0:02^{ab}	1:25±0:10^{ab}	93,28±0,37^{ab}	0,0048±0,0003^{b}
T5	0:17±0:01^{a}	1:33±0:06^{b}	94,23±0,79^{b}	0,0051±0,0002^{bc}

En cuanto al TPA se evidenció nuevamente que los tratamientos con combinación de masa madre y levadura presentaron menor dureza, masticabilidad y firmeza como se observa en la Tabla 3, obteniendo una miga más suave con gran potencial de aceptación. Además, se destaca la relación inversa entre firmeza y volumen específico, como se evidencia en la Figura 2. A menor dureza, mayor volumen específico, esto coincide con resultados sensoriales presentados por Păucean et al. (2024), en los cuales se afirma que la dureza de la miga disminuyó significativamente debido al tiempo de fermentación de la masa madre.

Tabla 3. Resultados del análisis del perfil de Textura (TPA).

Tratamiento	Dureza [N]	Cohesividad	Elasticidad [m]	Masticabilidad [J]	Firmeza [N]
T1	16,33±3,61^{a}	0,26±0,00^{a}	0,034±0,004^{b}	0,166±0,007^{ab}	6,42±1,30^{a}
T2	30,88±4,45^{b}	0,32±0,02^{b}	0,022±0,003^{a}	0,212±0,012^{b}	12,23±2,01^{b}
T3	15,88±3,30^{a}	0,32±0,01^{b}	0,035±0,002^{b}	0,173±0,027^{ab}	6,51±1,59^{a}
T4	14,04±0,54^{a}	0,35±0,06^{b}	0,033±0,001^{b}	0,163±0,038^{a}	5,54±1,42^{a}
T5	14,09±2,53^{a}	0,34±0,02^{b}	0,035±0,001^{b}	0,167±0,033^{ab}	5,73±0,63^{a}

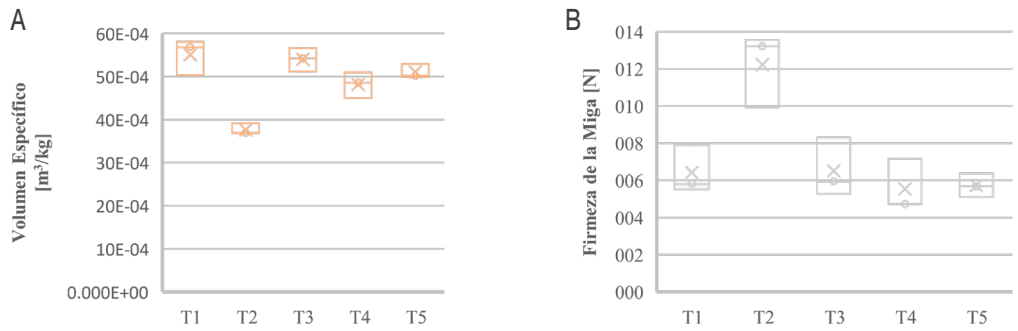


Figura 2. Comparación entre la distribución del volumen específico (A) y la firmeza de la miga (B), por tratamiento.

En la Tabla 4, se observó que los tratamientos con masa madre presentaron un mayor número de poros y al igual que T1 con cantidades similares de poros de mayor tamaño. El tratamiento T5 presentó el mayor porcentaje de porosidad, indicando una miga más aireada y por consiguiente más suave como se mencionó anteriormente.

Tabla 4. Resultados de los valores de porosidad obtenidos con el software ImageJ.

Tratamiento	Porosidad [%]	N° Poros Detectados	Tamaño de Poros 0,051-0,1 cm²	Tamaño de Poros 0,11-0,5 cm²
T1	41,11±2,07^{ab}	745±45^{a}	32±6^{b}	10±3^{ab}
T2	39,22±0,74^{a}	818±78^{ab}	18±4^{a}	5±2^{a}
T3	40,53±0,54^{ab}	860±57^{ab}	25±8^{ab}	4±3^{a}
T4	41,50±1,95^{ab}	810±94^{ab}	34±2^{b}	14±6^{b}
T5	43,19±1,34^{b}	881±83^{b}	34±2^{b}	14±2^{b}

CONCLUSIÓN

Se evidenció mejoras estadísticamente significativas en las propiedades sensoriales del pan aliñado que combinó masa madre y levadura instantánea. Entre estos el mejor posicionado por su óptimo desempeño reológico y sensorial fue T5 (20% masa madre y 0,5% levadura instantánea). Este tratamiento presentó mayor rendimiento, porosidad, volumen específico elevado y una miga con menor firmeza. Además, se confirmó que un mayor tiempo de fermentación potencia los efectos de la masa madre sobre la calidad del pan, obteniendo una herramienta biotecnológica natural de gran aplicabilidad en procesos de panificación.

REFERENCIAS

Hernández-Aguilar, C., Valderrama-Bravo, M. del C., Domínguez-Pacheco, A., Romero-Galindo, R., Igno-Rosario, O., Contreras-Gallegos, E., & Cruz-Orea, A. (2022). Caracterización colorimétrica, textura y calidad sanitaria de panes adicionados con maíces criollos y Curcuma longa. Superficies y Vacío, 35. http://dx.doi.org/10.47566/2022_syv35_1-220407

Lu, S., An, M., Sun, R., Luo, H., Wen, Y., Li, H., Wang, J., & Sun, B. (2025). Organic acid profiles of traditional sourdough microbiota dominates the fermentation effect on whole wheat bread texture. Journal of Cereal Science, 124, 104229. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104229

López-Tenorio, J. A., Rodríguez-Sandoval, E., & Sepúlveda-Valencia, J. U. (2012). Evaluación de características físicas y texturales de pandebono. Acta Agronómica, 61(3), 273–281.

Manjarres Pinzón, G., Castro Sánchez, A., López Ochoa, J. D., González, J. G., & Rodríguez-Sandoval, E. (2024). Efectos del reemplazo parcial de harina de trigo con harina de banano verde sobre las propiedades reológicas de la masa y la calidad de pan. Investigación e Innovación en Ingenierías, 12(1), 45–54. http://dx.doi.org/10.15446/rfnam.v78n2.114205

Păucean, A., Șerban, L.-R., Chiș, M. S., Mureșan, V., Pușcaș, A., Man, S. M., Pop, C. R., Socaci, S. A., Igual, M., Ranga, F., Alexa, E., Berbecea, A., & Pop, A. (2024). Nutritional composition, in vitro carbohydrates digestibility, textural and sensory characteristics of bread as affected by ancient wheat flour type and sourdough fermentation time. Food Chemistry: X, 22, 101298. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101298

Pontonio, E., Perri, G., Calasso, M., Celano, G., Verni, M., & Rizzello, C. G. (2025). Unveiling the impact of traditional sourdough propagation methods on the microbiological, biochemical, sensory, and technological properties of sourdough and bread: A comprehensive first study. Applied Food Research, 5(1), 101037. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101037

Rodríguez, N. R., & Prada, C. J. O. (2023). Formulación de un banco de masas madre a base de elementos agrícolas para nuevos productos de panadería. Revista Integra, 17.

Zapata, F., Zapata, E., & Rodríguez-Sandoval, E. (2019). Influence of guar gum on the baking quality of gluten-free cheese bread. International Journal of Food Science and Technology, 54(2), 313–324. https://doi.org/10.1111/ijfs.13936

Zhao, Z., Li, L., Li, W., Tian, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Ibba, M. I., He, Z., Hao, Y., & Tian, W. (2025). Rapid evaluation of Farinograph and Extensograph characteristics in bread wheat using near-infrared spectroscopy and chemometrics. Food Research International, 218, 116915. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116915

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

¿Cómo el pan puede ser más suave? descubriendo los mejoradores

How can bread be softer? discovering improvers

Jheisy Jhireth Ayala Valderrama[1],Juan Felipe Murillo Ramírez[1], Alejandro Mejía-Villota[2] and Eduardo Rodríguez Sandoval[3]

Palabras clave:
Emulsificantes
Enzimas
Mejorador
Suavidad
Textura
Volumen específico.

RESUMEN

Un mejorador es una mezcla de aditivos que tienen como fin mejorar las características de textura y calidad de un producto de panificación, contribuyendo a la estandarización de su proceso de elaboración. El presente estudio evaluó el efecto de enzimas (M y E) y agentes emulsionantes (DG90-SSL, lecitina de soya y DG90-DATEM) en el desarrollo de una formulación de un mejorador para pan de molde, con el fin de obtener un producto con adecuadas propiedades texturales. Se emplearon diferentes combinaciones de aditivos, midiendo parámetros farinográficos y características texturales del producto final. Los resultados mostraron que el uso de emulsificantes en conjunto con enzimas mejoró la estabilidad de la masa y la textura. Estos hallazgos contribuyen al diseño de formulaciones más eficientes para la industria panadera.

Keywords:
Emulsifiers
Enzymes
Improver
Smoothness
Texture
Specific volume

ABSTRACT

An improver is a mixture of additives intended to enhance the texture and quality characteristics of a bakery product, contributing to the standardization of its production process. This study evaluated the effect of enzymes (M and E) and emulsifying agents (DG90-SSL, soy lecithin, and DG90-DATEM) in the development of a bread improver formulation, aiming to obtain products with adequate textural properties. Different combinations of additives were used, measuring farinographic parameters and textural characteristics of the final product. The results showed that the use of emulsifiers in conjunction with enzymes improved dough stability and texture. These findings contribute to the design of more efficient formulations for the baking industry.

[1]Facultad de Ciencias Agrarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Semillero de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos (SICTAL). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jayalav@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3702-8628; :jumurillor@nal.edu.co ; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8575-4129

[2]Director of Research and Development. Alimentos y Productos en Polvo Poltec S.A.S.,El Palmar, La Estrella,. Colombia. alejandro.mejia@poltecsas.com; ORCID: 0000-0003-4306-32664

[3]Facultad de Ciencias Agrarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia. edrodriguezs@unal.edu.co; ORCID: .https://orcid.org/0000-0001-9146-2419

*Corresponding author: jayalav@unal.edu.co

CC BY NC SA

El pan, más que un alimento básico, representa un símbolo cultural ligado a la historia y tradiciones de diversas sociedades, cuyo valor trasciende lo nutricional al evocar emociones y memorias (Sirbu, 2017). Su calidad y textura, esenciales para la aceptación del consumidor, son un desafío constante para la industria de panadería, que recurre a mejoradores compuestos por emulsionantes, enzimas, hidrocoloides y almidones modificados (Thombare et al., 2016). Estos aditivos prolongan la frescura, suavidad y vida útil del pan al retrasar procesos como la retrogradación del almidón y la pérdida de humedad (IAlimentos, 2025). Entre los emulsionantes más utilizados se encuentran el estearoil-2-lactilato de sodio, la lecitina, los mono y diglicéridos y el Datem (Serna Saldivar, 2020), mientras que las enzimas también aportan estabilidad y conservación. En este contexto, el estudio de las propiedades reológicas, especialmente la suavidad y esponjosidad de la miga, resulta fundamental para optimizar la experiencia sensorial y responder a las expectativas cambiantes de los consumidores (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003; Mondal & Datta, 2008). El objetivo fue desarrollar un mejorador de pan aplicando emulsificantes y enzimas verificando sus propiedades de calidad y comparándolo con un mejorador comercial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Las materias primas empleadas en la elaboración de las formulaciones de los mejoradores, goma guar, carboximetilcelulosa (CMC) y lecitina de soya fueron de origen comercial y proporcionadas por TECNAS S.A. (Itagüí, Antioquia, Colombia), el almidón de yuca (Gel®Starch XP) fue suministrado por POLTEC SAS (La Estrella, Antioquia, Colombia), la enzima M (Alphamalt fresh 15, Mühlenchemie, Ahresburg, Alemania) fue proporcionada por Soluciones e Innovación en Alimentos Colombia S.A.S , SIA Foods (La Estrella, Antioquia, Colombia) y enzima E (Alphase extra bake, Eurogerm S.A.S, Saint Apollinaire, Francia), el emulsificante Monoestearol 95 (DG90) fue suministrado por Nutresol (Cartagena, Bolívar, Colombia), este fue utilizado en todas los mejoradores formulados en laboratorio y se mezcló con otros dos emulsificantes, ácido diacetil tartárico (Datem) y estearoil lactilato de sodio (SSL) (Pirotécnica Ingeniería, Yumbo, Colombia), en una relación 1:1. Además se trabajó con un mejorador comercial magimix, de la marca LESAFFRE (Cali,Valle del Cauca, Colombia) como comparación de los mejoradores realizados.

Elaboración del pan de molde

Se elaboraron catorce panes de molde de 150 g cada uno, a partir de una formulación estándar con harina de trigo, azúcar, margarina, levadura, sal, agua y huevo. A esta receta base se añadieron seis tipos de mejoradores (1% respecto a la harina) y un mejorador comercial para comparación. Los procesos de mezclado, amasado, reposo, fermentación, horneado y enfriado se realizaron siguiendo la metodología de Mesas y Alegre (2002). Los mejoradores incluyeron combinaciones de lecitina de soya con enzimas de dos fabricantes (Mühlenchemie y Eurogerm), así como mezclas de emulsificantes (DG90, DATEM, SSL) con dichas enzimas, generando seis tratamientos en total. Posteriormente, los panes fueron sometidos a pruebas de textura, análisis físicos y pruebas farinográficas, con el fin de evaluar el efecto de cada formulación frente al mejorador comercial.

El mejorador está formulado con diferentes ingredientes en proporciones específicas: 50% de goma guar, 10% de carboximetilcelulosa sódica (CMC), 20% de emulsificantes, 10% de almidón de yuca y 10% de enzimas. A partir de esta formulación se desarrollaron seis tipos de mejoradores variando el tipo de emulsificantes y las enzimas utilizadas. El primero, considerado como formulación control, se elaboró con lecitina de soya y la enzima de Mühlenchemie (SOYLEC-M). A partir de este, se generó una variante utilizando la misma lecitina, pero reemplazando la enzima por la de Eurogerm (SOYLEC-E). Un tercer tratamiento combinó los emulsificantes DG90 y DATEM con la enzima de Mühlenchemie (DG90-DATEM-M), y un cuarto empleó los mismos emulsificantes, pero con la enzima de Eurogerm (DG90-DATEM-E). El quinto tratamiento incluyó DG90 y SSL junto con la enzima de Mühlenchemie (DG90-SSL-M), mientras que el sexto combinó DG90, SSL y la enzima de Eurogerm (DG90-SSL-E). Cada tratamiento fue evaluado por triplicado en 14 muestras de pan de molde de aproximadamente 150 g cada uno. Estas muestras fueron sometidas a diversas mediciones para evaluar sus propiedades texturales, físicas y sensoriales

Propiedades texturales.

La firmeza y el perfil de textura del pan de molde se evaluaron según el método AACC 74-09 (2000) mediante

un texturómetro (CT3 Brookfield, Toronto Canadá). Para la firmeza se aplicaron pruebas de compresión con una sonda cilíndrica, mientras que el análisis de perfil de textura (TPA) se realizó con una sonda rectangular, utilizando diferentes parámetros de velocidad y distancia de compresión. En total, se analizaron 10 muestras por tratamiento, obteniendo valores de dureza (N), elasticidad (m), cohesividad, masticabilidad (J) y firmeza (N) de la miga

Propiedades reológicas

Para determinar la calidad de la masa, sus propiedades reológicas se estimaron mediante el farinógrafo (Farinógrafo®-AT, Brabender® GmbH y Co. KG, Duisburg, Germany). En el presente estudio, se evaluaron algunos parámetros de la masa como el tiempo de desarrollo de la masa (DDT), la absorción de agua (WZ), la estabilidad (S), el índice de tolerancia (MTI) y el drop-off (D), afectados por los siete mejoradores que se analizaron, según el método n.° 59-21 (AACC, 2000).

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los panes elaborados con los 7 mejoradores diferentes se evaluaron y compararon mediante un análisis de varianza (Anova) para conocer el efecto que generan diferentes emulsificantes y enzimas sobre la textura, las propiedades físico-químicas y reológicas del pan de molde, para el manejo de los datos se usó el software Statgraphics Centurion version XVIII, se utilizó además el método de diferencia mínima significativa con un nivel de confianza (α) de 0,05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Prueba de TPA y firmeza de la miga

Los valores medios de dureza, masticabilidad, cohesividad, elasticidad y firmeza de la miga de los panes elaborados con los distintos mejoradores se presentan en la Tabla 1. En términos de dureza, el tratamiento DG90-SSL-M generó panes con menor firmeza en la miga y una textura más suave, resultados similares a los obtenidos con DG90-DATEM-M, mientras que DG90-DATEM-E produjo migas significativamente más duras. Estos hallazgos son coherentes con lo reportado por Dubois y Blockolsky (1986), quienes señalaron que el SSL (estearoil-2-lactilato de sodio) contribuye a una mayor retención de gas durante la fermentación y el horneado, promoviendo una miga más suave y un mayor volumen del pan. De manera complementaria, Salazar-Coronado (2011) indica que tanto el SSL como los monoglicéridos (DG90) refuerzan la red de gluten y estabilizan la estructura de la miga. Asimismo, Karimi et al. (2022) evidenciaron que la combinación de SSL y DATEM con enzimas como la α-amilasa mejora la textura del pan, disminuyendo la dureza y prolongando la suavidad hasta 72 horas post-horneado, efecto atribuido a la capacidad de los emulsionantes para formar complejos con el almidón y retrasar su retrogradación. Respecto a la masticabilidad, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. En cuanto a la cohesividad, se identificaron tres grupos homogéneos: el valor más bajo correspondió al pan con mejorador comercial, mientras que DG90-DATEM-M presentó los más altos, con los demás tratamientos mostrando valores intermedios. Finalmente, en el análisis de la elasticidad, SOYLEC-E

Tabla 1. Propiedades texturales del pan de molde con distintos mejoradores, evaluadas mediante la prueba de Análisis de Perfil de Textura (TPA) y firmeza de la miga.

TRATAMIENTO	DG90-DATEM - E	DG90-DATEM-M	SOYLEC - M	SOYLEC- E	DG90-SSL-M	DG90-SSL - E	COMERCIAL
Media de la dureza (N)	13,704 ± 2,092 ^{c*}	9,324 ± 1,664 ^{ab}	11,036 ± 1,497 ^{abc}	12,384 ± 0,906 ^{bc}	8,528 ± 1,109 ^{a}	10,373± 1,421 ^{abc}	12,655 ± 4,068 ^{bc}
Media de la masticabilidad (J)	0,142 ± 0,018 ^{a}	0,119 ± 0,024 ^{a}	0,121 ± 0,011 ^{a}	0,139 ± 0,022 ^{a}	0,108 ± 0,011 ^{a}	0,12 ± 0,012 ^{a}	0,145 ± 0,036 ^{a}
Media de cohesividad	0,328 ± 0,030 ^{abc}	0,364± 0,011 ^{c}	0,354 ± 0,025 ^{bc}	0,309± 0,019 ^{ab}	0,357 ± 0,025 ^{bc}	0,322 ± 0,052 ^{abc}	0,297 ± 0,034 ^{a}
Media de la elasticidad (m)	0,034 ± 0,003 ^{ab}	0,036 ± 0,003 ^{ab}	0,032± 0,002 ^{a}	0,039 ± 0,004 ^{b}	0,034± 0,001 ^{a}	0,035 ± 0,001 ^{ab}	0,037 ± 0,002 ^{ab}
Firmeza de la miga (N)	6,939 ± 1,306 ^{ab}	5,429 ± 1,300 ^{a}	5,131 ± 0,5917 ^{a}	8,720 ± 1,145 ^{c}	4,587 ± 0,881 ^{a}	6,584 ± 1,580 ^{ab}	6,899 ± 1,281 ^{ab}

(*) Los valores en una misma fila seguida de letras distintas son significativamente diferentes

obtuvo los valores más elevados, mientras que SOYLEC-M y DG90-SSL-M registraron los más bajos, con los demás tratamientos ubicándose en posiciones intermedias. Estos resultados coinciden con lo descrito por Yanfei et al. (2022), quienes demostraron que la lecitina de soya incrementa la elasticidad y viscoelasticidad de la masa al fortalecer la red de gluten, favoreciendo su resistencia mecánica.

Propiedades reológicas

La Tabla 2 presenta los efectos de distintos mejoradores sobre el comportamiento de la masa para pan durante el amasado, evaluando parámetros como el tiempo de desarrollo de la masa (DDT), absorción de agua (WZ), estabilidad (S), índice de tolerancia (MTI) y caída de la curva (Drop-off D). Se observa que el tratamiento DG90-SSL-M presentó el mayor tiempo de desarrollo de la masa, indicando una masa más resistente al amasado y con una red de gluten más fuerte. En contraste, el pan con el mejorador comercial tuvo el menor tiempo de desarrollo, lo cual sugiere una masa menos estructurada. Estos hallazgos concuerdan con lo señalado por Rosell et al. (2001), quienes afirman que los emulsificantes como SSL pueden mejorar la formación y estabilidad del gluten, prolongando el tiempo de amasado óptimo. Todos los tratamientos con mejoradores presentan una absorción de agua constante (60,033–60,067 %), claramente mayor al tratamiento comercial (60,0 %), aunque las diferencias no son significativas. De acuerdo con Goesaert et al. (2005), los emulsificantes pueden tener un efecto limitado sobre la absorción de agua, pero pueden estabilizar la hidratación del gluten y la retención de agua durante el amasado. Los tratamientos con SOYLEC-E y DG90-SSL-M mostraron las mayores estabilidades, lo cual sugiere una masa más fuerte y tolerante al sobre amasado. Los emulsificantes pueden mejorar la estabilidad del gluten y hacer que la masa sea más resistente a la rotura bajo esfuerzo mecánico (Guarda et al., 2004). El MTI fue más bajo en los tratamientos con SOYLEC-E, lo que indica menor sensibilidad al sobre amasado. El mejorador comercial mostró un MTI bajo también, lo que no es deseable, ya que dificulta la manipulación de la masa y resultan en panes con texturas muy densas. Por el contrario, el tratamiento DG90-DATEM-E mostró un MTI mayor, levemente mayor a 30 BU, lo que indica una harina adecuada para panificación. El MTI es deseable con valores cercanos a 30 BU, pero menores a 50 BU, como confirman Tebben et al. (2022) ya que indica una masa más estable y uniforme. El tratamiento SOYLEC-M tuvo el valor más bajo de caída, señal de una menor pérdida de consistencia al final del amasado, mientras que el más alto fue DG90-DATEM-E. Una caída baja en la curva de farinograma representa un mejor comportamiento plástico de la masa (Zhou et al., 2016). El tratamiento DG90-SSL-M fue el que mostró un mejor comportamiento en las pruebas reológicas, es decir, tuvo el mejor desarrollo y mantuvo la masa durante el amasado. Este tratamiento destaca por tener el mayor tiempo de desarrollo, la mayor estabilidad, una baja tolerancia a la mezcla (cercano a 30) y la menor caída de la masa, lo que en conjunto indica que se obtuvo una masa más fuerte, estable y resistente.

Tabla 2. Características reológicas de la masa del pan con los diferentes mejoradores.

TRATAMIENTO	DG90-DATEM - E	DG90-DATEM- M	SOYLEC - M	SOYLEC- E	DG90-SSL-M	DG90-SSL - E	COMERCIAL
Media del Tiempo de desarrollo de la masa. DDT (min)	15,278 ± 0,842 ^{b*}	14,667 ± 0,927 ^{b}	15,700 ± 1,109 ^{b}	16,131 ± 0,798 ^{b}	17,167 ± 0,295 ^{b}	16,489 ± 0,557 ^{b}	6,105 ± 0,404 ^{a}
Media de la absorción de agua. WZ (%)	60,033 ± 0,058 ^{a}	60,033 ± 0,058 ^{a}	60,033 ± 0,058 ^{a}	60,067 ± 0,058 ^{a}	60,067 ± 0,058 ^{a}	60 ± 0 ^{a}	60 ± 0 ^{a}
Media de la Estabilidad. S (min)	17,178 ± 2,484 ^{a}	20,478 ± 1,843 ^{ab}	20,583 ± 2,311 ^{ab}	20,911 ± 2,559 ^{ab}	22,489 ± 0,554 ^{b}	18,717 ± 3,732 ^{ab}	18,255 ± 0,698 ^{a}
Media del Índice de tolerancia. MTI (BU)	33,333 ± 8,021 ^{c}	21,333 ± 4,933 ^{ab}	24,667 ± 9,866 ^{abc}	20 ± 2,0 ^{ab}	22,667 ± 0,577 ^{abc}	29,667 ± 4,509 ^{bc}	16,667 ± 10,599 ^{a}
Media del Drop- off. D (BU)	24,667 ± 1,155 ^{bc}	19,333 ± 7,094 ^{b}	16,667 ± 6,658 ^{ab}	10,667 ± 2,082 ^{a}	9,667± 1,528 ^{a}	17,333 ± 6,027 ^{ab}	31,667± 4,163 ^{c}

(*) Los valores en una misma fila seguida de letras distintas son significativamente diferentes

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la incorporación de emulsificantes y enzimas en la formulación del pan de molde puede mejorar de manera significativa sus propiedades reológicas, estructurales y físicas. En particular, la combinación del monoglicérido DG90 con SSL y enzimas tipo M (tratamiento DG90-SSL-M) mostró el mejor desempeño general, al presentar el mayor tiempo de desarrollo de la masa , la mayor estabilidad farinográfica , bajo índice de tolerancia y menor caída de la curva, lo que indica una masa más fuerte, resistente al sobreamasado y con excelente comportamiento tecnológico durante el proceso de panificación. En cuanto a la textura, las pruebas de perfil textural (TPA) evidenciaron que DG90-SSL-M también logró una miga más suave y con menor firmeza en comparación con los demás tratamientos, aun comparado con el pan con el mejorador comercial, lo que se traduce en un pan más tierno y de mejor calidad . Esta mejora puede atribuirse a la acción estabilizadora del monoglicérido y al efecto sinérgico con las enzimas, que favorecen la estructura interna y la retención de humedad.

REFERENCIAS

AACC. (2000). International approved methods of analysis of the AACC (10th ed.).St. Paul:AACC International. Retrievedfrom http://methods.aaccnet.org/summaries/54-22-01.aspx

AACC (2000) Cereals and grains association. Approved Methods of Analysis, 11th Edition. Cereals And Grains Association. https://www.cerealsgrains.org/resources/Methods/Pages/default.aspx

Badui Dergal, S. (2006). Química de los alimentos (4.ª ed.). Enrique Quintanar Duarte. https://fcen.uncuyo.edu.ar/upload/libro-badui200626571.pdf

De IAlimentos. (2025, 10 julio). Todo sobre mejorantes para pan: beneficios y aplicaciones. Industria de Alimentos. https://www.revistaialimentos.com/noticias/todo-sobre-mejorantes-para-pan-beneficios-y-aplicaciones

Dobraszczyk, B. J., & Morgenstern, M. P. (2003).“Rheology and the breadmaking process”. Journal of Cereal Science, 38(3), 229–245.https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00059-6

Dubois y Blockolsky (1986). Frozen White bread dough, effects od dough mixing and thawing methods. American Institut of Baking. Technical Bulletin. VIII (69.).

Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W. S., et al. (2005). Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. Trends in Food Science & Technology, 16(1–3), 12–30.https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.011

Guarda, A., Rosell, C. M., Benedito, C., & Galotto, M. J. (2004). Different hydrocolloids as bread improvers and antistaling agents. Food Hydrocolloids, 18(2), 241–247.https://doi.org/10.1016/S0268-005X(03)00080-8

Karimi, M., Sheikholeslami, Z., Ghiafehdavoodi, M., & Ghodsrohani, M. (2022). Investigating the effect of emulsifiers and enzymes on the physicochemical and organoleptic characteristics of flat bread fermented by direct and sponge method. Journal Of Food And Bioprocess Engineering, Journal homepage. https://jfabe.ut.ac.ir/article_91303_22871a65cfdf41e64db4fee45c2a9365.pdf

Mondal, A., & Datta, A. K. (2008). “Bread baking –A review”. Journal of Food Engineering, 86(4),465–474.https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.014

Nunes, MHB, Moore, MM, Ryan, LAM et al. Impacto de los emulsionantes en la calidad y las propiedades reológicas de panes y rebozados sin gluten. Eur Food Res Technol 228 , 633–642 (2009). https://doi.org/10.1007/s00217-008-0972-1

Rosell, C. M., Rojas, J. A., & Benedito de Barber, C. (2001). Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. Food Hydrocolloids, 15(1), 75–81.https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00054-0

Salazar-Coronado, M. (2011). Evaluación de la calidad de mejoradores comerciales en panificación [Tesis, Universidad Nacional del Callao]. https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/435/t.664.s18e.pdf

Serna Saldivar, S. O. (2020). La soya en productos de panificación [Tecnológico de Monterrey]. https://wishh.org/wp-content/uploads/2020/09/LA-SOYA-EN-PRODUCTOS-DE-PANIFICACION.pdf

Sirbu, A. (2017). Bread: A food and symbol. In H. Lewis (Ed.), Bread: Consumption, cultural significance and health effects (Chap. 1, pp. 1-35).New York: Nova Publisher.

Tebben, L., Chen, G., Tilley, M., & LI, Y. (2022). Improvement of whole wheat dough and bread properties by emulsifiers. Grain & Oil Science and Technology, 5(2), 59-69.https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.05.001

Thombare, N., Jha, U., Mishra, S., & Siddiqui, M.Z. (2016). “Guar gum as a promising starting material for diverse applications: A review”.International Journal of Biological Macromolecules, 88, 361–372.https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.001

Yanfei, C., Yanfei, J., Wenjing, S., Yuxin, D., Min, Z., & Shuang, D. (2021). Influencia de emulsionantes y enzimas en las propiedades reológicas y características de calidad de la masa de pan al vapor enriquecido con pulpa de patata. ScienceDirect, 360, 130015. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130015. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814621010219?via%3Dihub

Zhou, Y., Cao, H., Hou, M., & Nirasawa, S. (2016). The impact of enzymes and emulsifiers on dough rheology and bread quality. Food Science and Technology Research, 22(1), 61–69 DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130015

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

De residuo a recurso: el potencial del bagazo de yuca

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

From waste to resource: the potencial of cassava bagasse

Yulissa Salcedo-Arboleda[1], Eduardo Rodriguez-Sandoval[2], Jesus Humberto Gil-Gonzalez[2], Jhon Esteban Armenta-Roncancio[2] and Alejandro Mejia-Villota[3]

Palabras clave:
Almidón
Bagazo
Fibras lignocelulosas
Propiedades tecnofuncionales
Residuo

RESUMEN

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es un alimento clave en la economía colombiana por su contenido de carbohidratos, especialmente almidón, y su industrialización genera residuos sólidos (bagazo) con alto contenido de fibras lignocelulósicas y almidón residual. Se determinó las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales del bagazo de yuca, variedades Thai y Belloti, empleadas a nivel industrial para la obtención de almidón. La variedad Thai presentó mayor contenido de amilosa y mejor desempeño en la absorción de agua y retención de aceite; mientras que la variedad Belloti presentó mayor contenido de almidón total y fracción hidrosoluble. Ademas, ambos residuos contenían gránulos de almidón con birrefringencia, especialmente en Belloti. Los resultados presentaron diferencias significativas entre estas variedades y evidencian el potencial de la aplicación de estrategias biotecnológicas, como la hidrólisis enzimática, para valorizar estos residuos y recuperar compuestos de interés industrial.

Keywords:
Starch
Bagasse
Lignocellulosic fibers
Technofuctional properties
Residue

ABSTRACT

Cassava (*Manihot esculenta Crantz*) is a key food in the Colombian economy due to its carbohydrate content, especially starch, and its industrial processing generates solid residues (bagasse) with high lignocellulosic fiber content and residual starch. The physicochemical and techno-functional properties of cassava bagasse from the Thai and Belloti varieties, commonly used at the industrial level for starch extraction, were determined. The Thai variety showed higher amylose content and better performance in water absorption and oil retention, while the Belloti variety exhibited higher total starch content and a larger water-soluble fraction. In addition, both residues contained starch granules with birefringence, particularly in Belloti. The results revealed significant differences between these varieties and highlighted the potential of applying biotechnological strategies, such as enzymatic hydrolysis, to valorize these residues and recover compounds of industrial interest.

[1]Facultad de Ciencias, Programa de Ingeniería Biológica. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia: ysalcedo@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2460-8196
[2]Facultad de Ciencias Agrarias. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. edrodriguezs@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9146-2419; jhgilg@unal.edu.co, ORCID:https:// orcid.org/0000-0003-4653-1360; jarmenta@unal.edu.co; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8421- 2590
[3]Director of Research and Development. Alimentos y Productos en Polvo Poltec S.A.S., El Palmar, La Estrella,. Colombia. alejandro.mejia@poltecsas.com; ORCID: 0000-0003-4306-32664

CC BY NC SA

La yuca (*Manihot esculenta Crantz*) es un cultivo estratégico en Colombia, con presencia en los 32 departamentos, especialmente en el Caribe, los Llanos y el Cauca (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Uno de sus principales usos es la obtención de almidón, empleado en las industrias alimentaria, textil, papelera y de adhesivos (Suárez Guerra & Mederos Vega, 2011). Este proceso, sin embargo, genera subproductos sólidos como el bagazo de yuca; un residuo fibroso, húmedo y con alto contenido de almidón residual (Serpa-Fajardo *et al.,* 2022), generando una problemática de orden ambiental y económico (Torres *et al*., 2010).

La extracción tradicional del almidón consiste en rallar la raíz, añadir agua, filtrar, secar y purificar (Cobana & Antezana, 2007). En este proceso por cada tonela de yuca fresca procesada se genera una tonelada de bagazo, el cual contiene celulosa, hemicelulosa y almidón (15-50%) (Serpa-Fajardo *et al.,* 2022); y es propenso a convertirse en un foco de contaminación con altos costos de manejo. El procesamiento de 250-300 toneladas de yuca puede producir hasta 280 toneladas de bagazo con alta humedad (Sanyang *et al*., 2016), mientras que el afrecho del tamizado puede representar hasta 1.575 kg por cada 1.000 kg de yuca procesada (Torres *et al*., 2010).

En Colombia, las variedades que AGROSAVIA recomieda cultivar en el Caribe para la obtención de almidón de yuca son Thai y Belloti, las cuales han sido resultado del esfuerzo para contribuir al fortalecimiento de la cadena agroalimentaria por medio del mejoramiento genético. Estas variedades se caracteriza por tener raices de color blanco-crema, de formas cónica cilíndrica con pedúnculo corto, y pulpa color crema con corteza de color café oscuro. La variedad Thai presenta un rendimiento promedio de 29,3 t/ha de raíces frescas y 11,26 t/ha de materia seca, mientras que Belloti genera un rendimiento promedio de 30,3 t/ha de raíces frescas y 10,8-12 t/ha de materia seca (Rosero Alpala *et al*., 2023).

Actualmente, se desarrollan estrategias para valorizar estos residuos y mitigar su impacto. Las fibras naturales, por su origen renovable, biodegradabilidad y bajo impacto ambiental, representan una alternativa sostenible a los materiales sintéticos (Farias *et al*., 2014). En este contexto, el bagazo de yuca se perfila como fuente potencial de fibra natural. Esta investigación tuvo como objetivo caracterizar los residuos sólidos de dos variedades de yuca (Thai y Belloti), evaluando su composición química, contenido de fibra, almidón retenido, granulometría, composición lignocelulósica y propiedades tecnofuncionales, con miras a su valorización mediante procesos biotecnológicos como la hidrólisis enzimática.

MATERIALES Y MÉTODOS

Morfología microscópica

La presencia de almidón en el bagazo de yuca se evaluó mediante microscopía óptica, siguiendo la metodología descrita por Manca et al. (2023), con modificaciones. El bagazo se dispersó en agua destilada (1:10, p/v) y se colocó una alícuota sobre portaobjetos con cubreobjetos. Las observaciones se realizaron en un microscopio DM1000 LED (Leica Microsystems, Alemania) equipado con polarizador, utilizando objetivos de 40X bajo luz visible y polarizada. Las micrografías fueron registradas con una cámara digital ICC50 W (Leica Microsystems, Alemania).

Determinación de contenido de amilosa y almidón total

El contenido de amilosa total se determinó según el método de Carrasquero-Durán y Navas (2015), empleando como disolvente dimetil sulfóxido (Sigma-Aldrich. p.a. EMSURE® ACS., 200-664-3., Alemania). La absorbancia se midió a 600 nm en espectrofotómetro (Thermo Scientific Genesys 10S UV-Vis. USA). El contenido de almidón se determinó mediante el método enzimático de Ranathunga *et al.* (2017) utilizando α-amilasa (40 U/L) (Liquenzyme., Novozymes., Dinamarca) y amiloglucosidasa (50 U/g) (Optidex L-400., Danisco US Inc., Brasil). Finalmente, los azúcares reductores totales se determinaron mediante el método de 3, 5-dinitrosalicíclico (DNS) leyendo la absorbancia a 540 nm en un espectrofotómetro (Deshavath *et al.,* 2020).

Caracterización granulométrica

Se implementó una prueba de tamizado en seco mediante un arreglo de cinco tamices (mallas No. 20, 30, 60, 80, 100) siguiendo la norma ASTM D6913 (ASTM International, 2017).

Caracterización lignocelulósica

Se determinó la cantidad de extractables liposolubles e hidrosolubles, así como la determinación del contenido de lignina (soluble, insoluble) por el metodo Klason. Además, se evaluó la composición de azúcares estructurales tales como celobiosa, glucosa, xilosa y arabinosa por medio de cromatografía liquida (HPLC) (Shimadzu Co. LC-20AD. Japón). Para la cuantificación de ácidos orgánicos se utilizó una columna Aminex HPX-87H (300 x7,8 mm; 9 µm) (Bio-Rad Laboratories. USA); mientras que para la cuantificación de azúcares se empleó una columna Aminex HPX-87P (300 x 7,8 mm; 9 µm). En ambos casos, se siguió la metodología propuesta por Jham *et al.* (2002).

Propiedades tecnofuncionales

El indice de absorción de agua (IAA) (Ecu. 1), el índice de solublidad en agua (ISA) (Ecu. 2) y el poder de hinclamiento (PH) (Ecu. 3) se determinarón siguiendo el método descrito por Ma *et al.* (2015) y la capacidad de absorción de aceite (CAA) (Ecu. 4) se determinó siguiendo el método descrito por Abd El-Salam *et al.* (2019).

$$\%\,IAA = \frac{\text{masa del gel (g)} - \text{masa inicial de muestra (g)}}{\text{masa inicial de muestra (g)}} \times 100 \quad (1)$$

$$\%\,ISA = \frac{\text{masa de almidón soluble (g)}}{\text{masa inicial de muestra (g)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\frac{g}{g}PH = \frac{\text{masa de gel (g)}}{\text{masa inicial de muestra (g)} - \text{masa de almidón soluble (g)}} \quad (3)$$

$$\%\,CAA = \frac{\text{masa de aceite retenido (g)}}{\text{masa inicial de muestra (g)}} \times 100 \quad (4)$$

Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software *Statgraphics Centurion* (v.19.5.01; Statgraphics Technologies, Inc., 2023) con el fin de evaluar las diferencias significativas entre las dos variedades de yuca estudiadas. Cuando se detectaron diferencias, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p<0,05$) para identificar diferencias estadísticas entre los valores promedio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Morfología microscópica

Al observar las muestras de afrecho de yuca Thai y Belloti bajo el microscopio de luz polarizada (Figura 1), en ambas variedades se logra apreciar que los gránulos de almidón tienden a ser redondeados con tamaño inferior a los 200 px. Se observa el efecto de birrefrigencia dado por la forma característica de la "cruz de Malta". La distribución de las partículas es heterogenera; sin embargo, en la muestra de afrecho de yuca Belloti se observa una densidad significativamente mayor de gránulos de amidón en comparación con la muestra Thai. De igual modo, se aprecian partículas amorfas o fragmentadas de forma irregular que podrían corresponder a restos de la matriz fibrosa del bagazo.

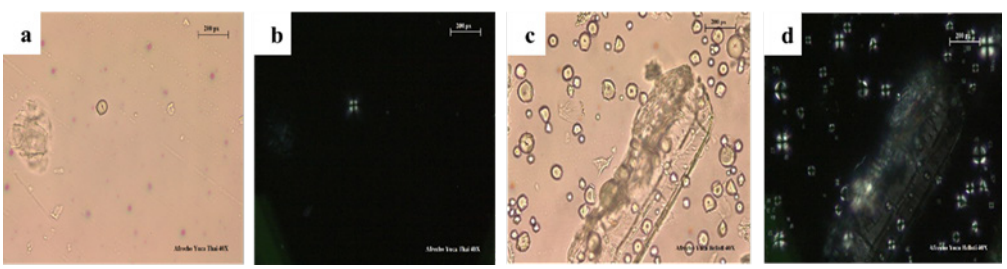


Figura 1. Microscopía de luz polarizada (40x) de los afrechos de yuca: a) y b) Thai; c) y d) Belloti.

Contenido de amilosa y almidón total

En la Tabla 1 se muestran los resultados fisicoquimicos del afrecho de yuca Thai y Belloti. Los bagazos tuvieron humedad similar (~9,9%). Se resalta que la variedad Thai presentó mayor contenido de amilosa (15,8%) y menor contenido de almidón total (29,6%) en comparación con Belloti. Estos resultados coinciden con estudios previos que reportan contenido de almidón en el bagazo de yuca hasta del 50% (Farias *et al.*, 2014).

Tabla 1. Análisis de la composición amilácea de las variedades de afrecho de yuca Thai y Belloti.

Propiedad	Unidad	Thai	Belloti
Humedad	[%]	9,88	9,98
Amilosa	[%]	15,8±0,007	9,1±0,63
Almidón total	[%]	29,6±1,083	52,4±0,273

Caracterización granulométrica

El análisis granulométrico (Tabla 2) mostró que ambas muestras tuvieron como tamaño predominante partículas >250 µm (tamiz No. 60), con mayor proporción en Belloti, patrón que también se observó en el tamiz No. 80 (180 µm). Esto indica que el bagazo de yuca Belloti presentó una distribución de partícula más fina que Thai. Sin embargo, Thai tuvo mayor proporción de partículas <150 µm; es decir, las que atravesaron todo el sistema de tamices, evidenciando diferencias en la fracción más fina entre ambas variedades. Además, En ambas muestras de bagazo de yuca se observó que el aumento en la proporción retenida fue entre las mallas 30 y 60 (600 y 250 µm respectivamente).

Table 2. Distribución de frecuencias de la caracterización granulométrica de las muestras de Afrecho.

Luz de malla [µm]	Thai (g)	Thai (Fi: %)	Belloti (g)	Belloti (Fi: %)
850	3,33	3,681	8,81	6,7
600	13,46	14,88	20,45	15,7
250	41,69	45,731	64,46	49,257
180	12,41	13,719	33,44	25,72
150	4,54	5,019	2,71	2,08
< 150	15,33	16,947	0,69	0,53
Granulometría				
D: 50 [µm]	403,9		359,4	
D: 90 [µm]	200,1		137,7	
De promedio [µm]	266,8		218,4	

La caracterización granulométrica (Tabla 2) mostró que Belloti presentó partículas más gruesas (D_{50} = 403,9 µm, D_{50} < 200,1 µm) y una distribución más homogénea, concentrada en tamices de 250 y 180 µm; mientras que Thai tuvo más material fino (16,95 % < 150 µm, D_{90} < 137,7 µm) y un tamaño promedio menor (218,4 µm), evidenciando una distribución más heterogénea. Estas diferencias, atribuibles a la variedad de yuca, influyen en las propiedades fisicoquímicas del residuo y son clave para optimizar procesos industriales como la hidrólisis enzimática.

Determinación de contenido de almidón total después de tamizar

El tamizado del afrecho de yuca Thai y Belloti permitió separar fracciones gruesas y finas, revelando que el almidón se concentra principalmente en las partículas más pequeñas. En ambas variedades, la fracción fina presentó mayor contenido de almidón que la fracción gruesa, evidenciando una disminución significativa tras el tamizado. Esto sugiere que el almidón menos adherido a la fibra se libera y concentra en las fracciones finas.

Caracterización lignocelulósica

La caracterización lignocelulósica (Tabla 3) de la fracción gruesa del afrecho de yuca mostró que Belloti presentó mayor humedad, lignina insoluble y fracción hidrosoluble, indicando una estructura más hidratada y menos compacta; mientras que Thai tuvo más celulosa, hemicelulosa y fracción liposoluble, lo que sugiere mayor presencia de compuestos lipofílicos. La celulosa fue el componente principal en ambos bagazos, aunque su proporción pudo verse afectada por la hidrólisis del almidón durante el análisis. Las diferencias entre variedades, influenciadas

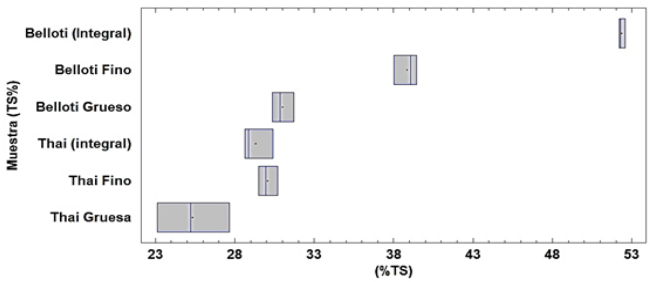


Figura 2. Diagramas de cajas y bigotes comparando el contenido de almidón total entre las muestras de afrecho integral y las fracciones gruesa y finas de las dos variedades de yuca Thai y Belloti.

Tabla 3. Caracterización lignocelulósica de la fracción gruesa del bagazo obtenido de las variedades de yuca Thai y Belloti.

Parámetro [%]	Thai	Belloti
Humedad	2,2 ± 0,015 b	5,4 ± 0,065 a
Fracción Liposoluble	9,4 ± 0,064 a	5,4 ± 0,08 b
Fracción Hidrosoluble	8,9 ± 0,662 a	8,3 ± 0,369 a
Lignina Soluble	0,1 ± 0,004 a	0,1 ± 0,007 a
Lignina Insoluble	4,9 ± 0,025 b	7 ± 0,197 a
Celulosa	72,2 ± 1,205 a	70,8 ± 0,468 a
Hemicelulosa	11,2 ± 0,142 a	11,3 ± 0,054 a
Cenizas	2,8 ± 0,005 b	2,9 ± 0,021 a

por factores genéticos, agroclimáticos y metodológicos, impactan su aprovechamiento industrial, especialmente en procesos que dependen de la composición estructural y funcional del residuo (Espitia Montes *et al*., 2022).

Propiedades tecnofuncionales

Se evaluaron las propiedades tecnofuncionales del afrecho de yuca Thai y Belloti en las fracciones gruesas (>250 µm) y finas (<250 µm) (Figura 3). Las fracciones gruesas mostraron mayor absorción de agua y aceite, con los valores más altos en el material proveniente de la variedad Thai; el cual también presentó mayor solubilidad en agua y poder de hinchamiento, especialmente en la fracción gruesa, asociado a diferencias en la composición del almidón. Belloti mostró menores valores en la mayoría de propiedades. Estos resultados

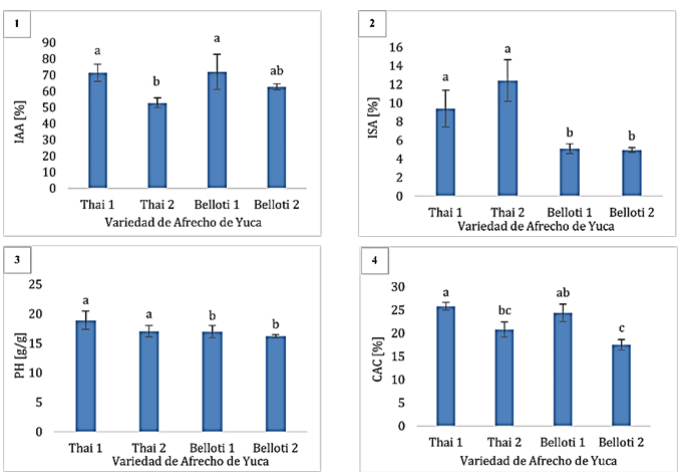


Figura 3. Diagramas de barras de las propiedades tecnofuncionales analizadas sobre las fracciónes gruesas (Thai 1 y Belloti 1) y fracciones finas (Thai 2 y Belloti 2) de los afrechos de las variedades de yuca. 1) Índice de absorción de agua (IAA); 2) Índice de solubilidad de agua (ISA); 3) Poder de hinchamiento (PH); 4) Capacidad de retención de aceite (CAC). Los datos presentados son la media ± desviación estandar (n=3).

indican que el tamaño de partícula y la variedad influyen en la funcionalidad, siendo Thai más apta para aplicaciones que requieran alta retención de líquidos y expansión.

CONCLUSIÓN

El bagazo de yuca, subproducto de la agroindustria del almidón, presenta propiedades que respaldan su aprovechamiento sostenible. La variedad Thai mostró mayor contenido de amilosa, y mayor solubilidad y fracciones finas, mientras que Belloti tuvo mayor almidón total, fracción hidrosoluble y partículas gruesas. El bagazo de yuca presenta contenidos de celulosa por encima del 70%. Estos resultados evidencian que la variedad y el tamaño de partícula influyen en su uso, aportando bases para estrategias de valorización en productos sostenibles.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Procesos Agrícolas de la Facultad de Ciencias Agrarias por el desarrollo experimental y a Poltec SAS por suministrar la materia prima.

REFERENCIAS

Abd El-Salam, K. H., Toliba, A. O., El-Shourbagy, G. A., & El-Nemr, Sh. E. (2019). Chemical and functional properties of garden cress (Lepidium sativum L.) seeds powder. Zagazig Journal of Agricultural Research, 46(5), 1517–1528. https://doi.org/10.21608/zjar.2019.48168

ASTM International. (2017). ASTM D6913/D6913M-17: Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM International.

Carrasquero-Durán, A., & Navas, P. B. (2015). Determinación espectrofotométrica de amilosa en presencia de amilopectina en almidón de arroz mediante espectroscopía derivada. Alimentos, Ciencia e Investigación, 23(1), 11–20.

Cobana, M., & Antezana, R. (2007). Proceso de extracción de almidón de yuca por vía seca. Revista Boliviana de Química, 24(1), 77–83. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=426339669014

Deshavath, N. N., Mukherjee, G., Goud, V. V., Veeranki, V. D., & Sastri, C. V. (2020). Pitfalls in the 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) assay for the reducing sugars: Interference of furfural and 5-hydroxymethylfurfural. International Journal of Biological Macromolecules, 156, 180–185. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.103

Espitia Montes, A. A., Pérez Cantero, S. P., Támara Morelos, R. E., Araújo Vásquez, H. A., García Peña, J. A., Rosero Alpala, E. A., Hernández, S. M., Martínez Figueroa, R. R., & De La Ossa Albis, V. A. (2022). Manual de manejo de yuca industrial en el Caribe colombiano. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Farias, F. O., Jasko, A. C., Colman, T. A. D., Pinheiro, L. A., Schnitzler, E., Barana, A. C., & Demiate, I. M. (2014). Characterisation of cassava bagasse and composites prepared by blending with low-density polyethylene. Brazilian Archives of Biology and Technology, 57(6), 821–830. https://doi.org/10.1590/S1516-8913201402506

Jham, G. N., Fernandes, S. A., Garcia, C. F., & Silva, A. A. (2002). Comparison of GC and HPLC for the quantification of organic acids in coffee. Phytochemical Analysis, 13(?), 99–104. https://doi.org/10.1002/pca.629

Ma, Z., Boye, J. I., & Hu, X. (2015). Nutritional quality and techno-functional changes in raw, germinated and fermented yellow field pea (Pisum sativum L.) flours. Food Research International, 76(Part 2), 285-292. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.013

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). Cifras sectoriales del subsector productivo de la yuca. Sistema de Información de la Cadena Agroalimentaria (SIOC). https://sioc.minagricultura.gov.co/Yuca/Documentos/2019-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf

Ranathunga, A. S., Perera, M. S. A., Ranjith, P. G., & De Silva, G. P. D. (2017). A macro-scale view of the influence of effective stress on carbon dioxide flow behaviour in coal: An experimental study. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 3(1), 13–28. https://doi.org/10.1007/s40948-016-0042-2

Rosero Alpala, E. A., Rodríguez Henao, E., & García Herazo, J. L. (2023). Variedades recientes de yuca liberadas en Colombia para uso agroindustrial. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7406290

Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2016). Cassava starch-based composites reinforced with natural fibers: A review. Industrial Crops and Products, 93, 26–38. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.002

Serpa-Fajardo, J. G., Hernández-Ramos, E. J., Fernández-Lambert, G., Sandoval-Herazo, L. C., & Andrade-Pizarro, R. D. (2022). Post-industrial context of cassava bagasse and trend of studies towards a sustainable industry: A scoping review – Part I. F1000Research, 11, 562. https://doi.org/10.12688/f1000research.110429.1

Statgraphics Technologies, Inc. (2023). Statgraphics Centurion (Versión 19.5.01) [Software de computadora]. https://www.statgraphics.com/

Suárez Guerra, L., & Mederos Vega, V. R. (2011). Revisión bibliográfica. Apuntes sobre el cultivo de la yuca (*Manihot esculenta Crantz*). Tendencias actuales. Cultivos Tropicales, 32(3), 27–35. https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/35/pdf

Torres, P., Pérez, A., Marmolejo, L. F., Ordóñez, J. A., & García, R. E. (2010). Una mirada a la agroindustria de extracción de almidón de yuca, desde la estandarización de procesos. Revista EIA, 7(14), 23–38. https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/416/409

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Extracción artesanal y caracterización de fibra de raquis de banano Gros Michel del Valle del Cauca

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Artisanal extraction and characterization of fiber from the rachis of the Gros Michel banana from the Valle del Cauca

Angie Daniela Molina-Jiménez[1], Pedro Vanegas-Mahecha[2] and Luis Octavio González-Salcedo[2]

Palabras clave:
Agroindustria sostenible
Aprovechamiento de residuos agroindustriales
Compuestos reforzados con fibra natural
Materiales biológicos lignocelulósicos
Propiedades fisico-mecánicas

RESUMEN

El presente estudio evaluó la viabilidad de extracción y caracterización de fibras de raquis de banano (Musa ssp., var. Gros Michel) cultivado en zonas de montaña del Valle del Cauca, Colombia. Para tres estados de maduración (verde, maduro, sobremaduro) se analizaron las fibras mediante ensayos físicos, mecánicos, morfológicos y funcionales. Las fibras verdes mostraron mayor resistencia (17,66 MPa) y módulo elástico (362,90 MPa); las maduras, mayor densidad (1,021 g cm^{-3}); y las sobremaduras, degradación. A pesar de brindar propiedades mecánicas limitadas frente a otras fibras vegetales, su disponibilidad y bajo costo las hacen viables en materiales compuestos para aplicaciones no estructurales.

Keywords:
Sustainable agroindustry
Recycling of agroindustrial waste
Natural fiber-reinforced composites
Lignocellulosic biological materials
Physicomechanical properties

ABSTRACT

This study evaluated the feasibility of extracting and characterizing fibers from banana rachis (*Musa spp.*, var. *Gros Michel*) grown in mountainous areas of Valle del Cauca, Colombia. Fibers from three ripening stages (green, ripe, overripe) were analyzed through physical, mechanical, morphological, and functional tests. Green fibers showed the highest tensile strength (17.66 MPa) and elastic modulus (362.90 MPa); ripe fibers had higher density (1.021 g cm^{-3}); and overripe fibers showed physical degradation. Despite offering lower mechanical properties than other plant fibers, their availability and low cost make them a viable alternative for use in non-structural composite material applications.

[1]Programa de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
[2]Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8802-9128;
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2460-6106
Corresponding author: amolinaji@unal.edu.co

CC BY NC SA

Una de las principales actividades agrícolas de exportación en Colombia es la producción de banano, situando al país como noveno productor mundial. Sin embargo, la actividad genera grandes volúmenes de residuos agroindustriales, entre ellos el eje central del racimo denominado raquis, que se descarta en el campo y con aprovechamientos limitados. Estos suproductos respresentan una oportunidad para su valorización en ámbitos de sostenibilidad, particularmente en zonas rurales donde la implementación de la economía circular es aún un reto (Bedoya et al., 2021). En este contexto, el aprovechamiento del raquis del banano variedad Gros Michel, que se cultiva tradicionalmente en sistemas familiares en zonas de montaña del norte del Valle del Cauca, es de interés. A pesar del reemplazo comercial de la variedad por otras más resistentes a enfermedades (el mal de Panamá casi la desaparece), sus propiedades organolépticas son apreciadas (Makowski, 2019). Investigaciones reportan el uso de residuos de banano, para obtener fibras, harinas, y lixiviados (Cuj et al., 2024), pero específicamente para el raquis de la variedad Gros Michel, cultivado en el norte del Valle del Cauca, está poco explorado.

Bajo estas premisas, este trabajo plantea esta pregunta de investigación ¿es viable la extracción y caracterización de fibras del raquis de banano Gros Michel, de sus propiedades físicas y mecánicas, que permitan su consideración como material de refuezo? Se parte de la hipótesis de que, partiendo de una extracción y procesamiento adecuados, estas fibras pueden presentar propiedades físicas y morfológicas favorables, asimismo, un comportamiento mecánico útil en aplicaciones no estructurales. El objetivo general fue evaluar preliminarmente el raquis de banano *Gros Michel* como fuente de fibra, a través de su extracción artesanal y caracterización básica en distintos estados de maduración. El estudio se enmarca en la línea de ingeniería de procesos agroindustriales y biotecnológicos, al buscar transformar un residuo agrícola en insumo para materiales compuestos, aportando valor agregado con herramientas propias de la agroindustria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los raquis fueron recolectados en cultivos ubicados en la vereda San Isidro (Municipio de Trujillo, Valle del Cauca) en tres estados de maduración (verde, maduro, sobremaduro). La extracción de las fibras se realizó en campo, usando un dispositivo artesanal diseñado y elaborado en el Taller de Maquinaria Agrícola (UNAL-Palmira), como se muestra en la **Figura 1**. La caracterización física se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y Procesos Agroindustriales (Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira). Se determinó: (1) Longitud y espesor de las fibras, usando calibradores de precisión (0,01 mm), (2) Contenido de humedad, antes y después de secado a 40°C durante 24 h, (3) Densidad aparente por desplazamiento de volumen con aceite vegetal como fluido de referencia para reducir el sesgo por absorción, común al usar agua en fibras vegetales, y (4) partir de este resultado, se calculó la densidad en base seca (densidad real de la fibra sin agua). En el Laboratorio de Materiales (UNAL-Palmira), se evaluaron la resistencias a la tensión y el módulo de elasticidad usando una máquina universal SHIMADZU AG-IC 100 kN. Las fibras ensayadas, con longitud de 300 mm, fueron sujetadas con papel entre mordazas para facilitar el agarre, disminuir el error en el ensayo y evitar daño de la fibra en sus extremos. La observación morfológica se realizó en el Centro de Imagen y Microscopía (UNAL-Palmira), mediante microscopía óptica (microscopio Zeiss Stemi 306) y de flourescencia (microscopio Zeiss HBO 50/AC, filtro FICT). Finalmente, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y Procesos Agroindustriales, se midió la capacidad de absorción de agua del raquis (no de la fibra), sumergiendo muestras de 5 g en 200 l de agua, y registrando su peso antes y después de la inmersión.



Figura 1. Extracción artesanal de la fibra.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta las propiedades físicas y mecánicas de las fibras del raquis de banano *Gros Michel* según el estado de maduración. Las fibras verdes mostraron mayor resistencia a la tensión (17,66 MPa) y módulo de elasticidad (362,90 MPa), así como una superficie compacta y continua según microscopía óptica (Figura 2), lo cual se atribuye a

un alto contenido de celulosa y cohesión estructural entre pectinas y hemicelulosas no degradadas. No obstante, presentaron mayor humedad inicial (12,49%), lo que implica la necesidad de estabilización previa al uso. Tras un presecado a 40 °C durante 24 h, la humedad se redujo a rangos de 6,63–7,17%, permitiendo una caracterización más precisa. Estos valores son menores que los reportados para fibras como yute, sisal, abacá o pseudotallo de banano (Cuj et al., 2024; Alshgari et al., 2022). En términos de densidad, las fibras maduras registraron el valor más alto (1,021 g/cm³ en base húmeda y 1,098 g/cm³ en base seca), mientras que las sobremaduras alcanzaron los valores más bajos (0,468–0,510 g/cm³), lo que sugiere que el grado de maduración afecta la compactación estructural y la lignificación celular. Microscópicamente, las fibras maduras presentaron morfología cilíndrica, homogénea y con desprendimiento de filamentos secundarios, lo que facilita su extracción sin afectar gravemente sus propiedades. En cambio, las fibras sobremaduras mostraron desorganización estructural, colapso celular y pérdida de alineación, lo que se reflejó en su bajo desempeño mecánico (1,72 MPa de resistencia a la tensión, 40,18 MPa de módulo elástico). Esta degradación se asocia a la acción enzimática prolongada sobre pectinas, hemicelulosas y posibles cambios en la lignina (Aravindh et al., 2022). La absorción de agua del raquis fue alta en todos los estados (484,67%, 322,00%, 453,33%, respectivamente), lo cual puede trasladarse a las fibras y afectar el comportamiento higroscópico del material compuesto. Este parámetro deberá considerarse en aplicaciones o tratamientos posteriores. En comparación con otras fibras vegetales como yute, sisal, cáñamo o abacá, las fibras de raquis de *Gros Michel* presentan propiedades mecánicas inferiores (1,72–17,66 MPa frente a 200–900 MPa en otros materiales), debido a su menor densificación estructural, orientación fibrilar y naturaleza esponjosa (Faruk et al., 2012; Shahzad, 2011). Sin embargo, su bajo costo, abundancia local y facilidad de extracción artesanal las hacen viables en aplicaciones no estructurales como refuerzo en morteros, paneles divisorios o materiales aislantes. Estos resultados refuerzan que la densidad no siempre se correlaciona directamente con el desempeño mecánico, como también reportan Ari et al. (2023) y Sambath et al. (2023) en materiales compuestos con fibras naturales. La proporción de celulosa cristalina, la orientación de microfibrillas y el estado fisiológico del tejido juegan un papel determinante (Gairola et al., 2023; Balaji et al., 2019).

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de la fibra.

Estado del raquis	Longitud [mm]	Espesor [mm]	Humedad [%]*	Densidad [g/cm³]**	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Verde	29,60	1,20	12,49/7,17	0,528/0,569	17,66	362,90
Maduro	28,19	2,87	10,83/7,02	1,021/1,098	3,47	61,51
Sobre-maduro	33,80	1,39	12,18/6,63	0,468/0,510	1,72	40,18

*Antes y después del secado. **Densidad aparente y en base seca (tras corrección por humedad).

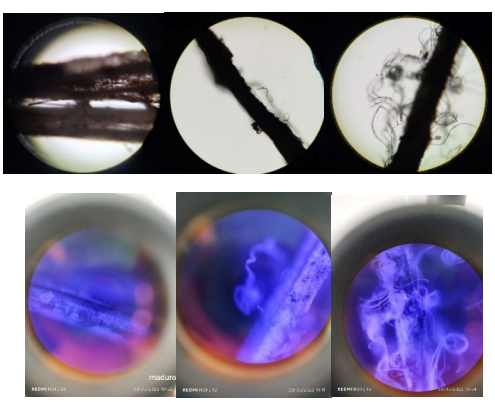


Figura 2. Imágenes de morfología de la fibra de raquis de banano para estados de maduración (en su orden de izquierda a derecha) verde, maduro y sobremaduro, usando microscopía óptica (parte superior) y de flourescencia.

CONCLUSIÓN

En este estudio se realizó la extracción artesanal y caracterización básica de fibras de raquis de banano variedad *Gros Michel* en tres estados de maduración. Los resultados muestran que el estado fisiológico del raquis influye directamente en la microestructura, facilidad de extracción y propiedades físicas y mecánicas de las fibras. Las fibras del raquis verde presentaron mayor resistencia y compacidad, siendo más adecuadas para aplicaciones donde se requiere desempeño mecánico, mientras que las del estado maduro ofrecieron una extracción más eficiente, pero con menor resistencia. En el estado sobremaduro, aunque la separación fue sencilla, se observó degradación estructural y pérdida significativa de propiedades. Se concluye que la densidad, si bien relevante, no determina por sí sola el comportamiento mecánico, siendo el estado fisiológico del tejido un factor crítico. En este contexto, la fibra del raquis verde se perfila como la opción más favorable para aplicaciones no estructurales de refuerzo en materiales compuestos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto "Exploración del uso de la fibra de raquis de banano en matrices cementicias" (HERMES 64788), con apoyo de laboratorios e infraestructura de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Alshgari, R. A., Hemalatha, N., Suryavanshi, A., Prasad, D. V. S. S. S. V., Subalakshmi, R., Abirami, M., Amudha, M. J. R., Wabaidur, S. M., Islam, M. A., & Christopher, D. (2022). Investigation on Physical and Mechanical Properties of Abaca Fiber Composites Using Filament Winding. Advances in Polymer Technology, Art. 5000547. https://doi.org/10.1155/2022/5000547

Aravindh, M., Sathish, S., Ranga Raj, R., Karthick, A., Mohanavel, V., Patil, P. P., Muhibbullah, M., Osman, & Sameh M. (2022). A Review on the Effect of Various Chemical Treatments on the Mechanical Properties of Renewable Fiber-Reinforced Composites. Advances in Materials Science and Engineering, Art. 2009691. https://doi.org/10.1155/2022/2009691

Ari, A., Karahan, M., Ahmed, H. A. M., Babiker, O., & Dehşet, R. M. A. A. (2023). Review of Cellulosic Natural Fibers' Properties and Their Suitability as Reinforcing Materials for Composite Panels and Applications. AATCC Journal of Research, 10(3), 163-183. https://doi.org/10.1177/24723444221147365

Balaji, A., Sivaramakrishnan, K., Karthikeyan, B. et al. (2019). Study on mechanical and morphological properties of sisal/banana/coir fiber-reinforced hybrid polymer composites. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., 41, Art. 386. https://doi.org/10.1007/s40430-019-1881-x

Bedoya Betancur, S., Amar Gil, S., Barrera Zapata, R., Arriola Villaseñor, E., & Ardila Arias, A. N. (2021). Escenario técnico y económico para la valorización integral a pequeña escala de residuos de naranja en Colombia. Ingeniería, 26(3), 367-380. https://doi.org/10.14483/23448393.17783

Cuj Chan, M. d. C., Luna Jiménez, A. L., González Cortés, N., Jiménez Vera, R., & Guzmán Ceferino, J. (2024). Chapter 19: Sustainable use of the pseudostem and rachis of banana Musa sp. In: Albano Valente, N. (ed). Engineering and its advancements. Seven Editora, 263-280. https://doi.org/10.56238/sevened2024.004-019

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. Progress in Polymer Science, 37(11), 1552–1596. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003

Gairola, S. P., Tyagi, Y., & Gupta, N. (2022). Mechanical properties evaluation of banana fibre reinforced polymer Composites: A review. ACTA INNOVATIONS, 42, 59–70. https://doi.org/10.62441/actainnovations.v42i.280

Makowski, E. R. (2019). Mass Appeal: Saving the World's Bananas from a Devastating Fungus. [Thesis of Master of Science]. Massachusetts Institute of Technology..

Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203508206

Shahzad, A. (2011). Hemp fiber and its composites – a review. Journal of Composite Materials, 46(8), 973-986. https://doi.org/10.1177/0021998311413623

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Bioproducción de enzimas ligninolíticas a partir de cáscara de arroz para la decoloración de tintes

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Bioproduction of ligninolytic enzymes from rice husk for dye decolorization

Andrés Vargas Lopera[1] and Angelina Hormaza Anaguano[1]

Palabras clave:
Decoloración
Enzimas ligninolíticas
Fermentación en estado sólido
Hongos de la podredumbre blanca

RESUMEN

El crecimiento de los procesos productivos agroindustriales ha incrementado considerablemente la generación de residuos, con impactos negativos sobre el suelo, el agua y el aire. En este contexto, la industria arrocera, una de las más grandes del mundo con una producción anual cercana a los 800 millones de toneladas métricas, representa una fuente importante de residuos. Ante esta problemática, la Fermentación en Estado Sólido, mediante el uso de hongos de la podredumbre blanca, surge como una alternativa innovadora y sostenible para aprovechar de estos residuos y producir enzimas ligninolíticas con potencial aplicación en la decoloración de tintes sintéticos. El presente trabajó se enfocó en la producción de enzimas ligninolíticas con el sistema cascarilla de arroz-*T. pubescens,* obteniendo valores de actividad de 20.95 U gss^{-1} y su posterior aplicación en la decoloración de azul de metileno, alcanzando decoloraciones superiores al 80%, incluso con concentraciones de 100 ppm del colorante demostrando así, la eficiencia y potencial de esta metodología.

Keywords:
Discoloration
Ligninolytic enzymes
Solid state fermentation
White rot fungi

ABSTRACT

The growth of agro-industrial production processes has significantly increased waste generation, with negative impacts on soil, water, and air. In this context, the rice industry, one of the largest in the world with an annual production of nearly 800 million metric tons, represents a significant source of waste. Faced with this problem, solid-state fermentation, through the use of white rot fungi, emerges as an innovative and sustainable alternative to take advantage of this waste and produce ligninolytic enzymes with potential application in the decolorization of synthetic dyes. The present work focused on the production of ligninolytic enzymes with the rice husk-T. pubescens system, obtaining activity values of 20.95 U gss^{-1} and its subsequent application in the decolorization of methylene blue, achieving decolorization rates of over 80%, even with concentrations of 100 ppm of the dye, thus demonstrating the efficiency and potential of this methodology.

[1]Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
Corresponding author: anvargaslo@unal.edu.co

CC BY NC SA

En las últimas décadas, la agroindustria ha experimentado una transformación significativa gracias a la industrialización, donde la tecnología y la innovación han redefinido la producción, transformación y comercialización de alimentos (Kamboj et al., 2024). Sin embargo, este avance ha venido acompañado de un aumento en la generación de residuos, cuya inadecuada disposición puede generar impactos ambientales severos en suelo, agua y aire, especialmente por prácticas como la quema extensiva, que libera monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno (Jose et al., 2025). Entre los productos más relevantes se encuentra el arroz, uno de los cultivos básicos a nivel mundial. Según la FAO, en 2023 se produjeron cerca de 800 millones de toneladas métricas de arroz (FAO, 2023). En Colombia, la producción también es significativa: en 2024 se cultivaron más de 630.000 hectáreas, generando aproximadamente 3.5 millones de toneladas de arroz y alrededor de 700.000 toneladas de cascarilla como residuo (Fedearroz, 2024).

Este residuo es rico en biomasa lignocelulósica, compuesta por lignina, celulosa y hemicelulosa que pueden ser aprovechados mediante procesos biotecnológicos para la obtención de productos de alto valor agregado (Jose et al., 2025). Entre estos procesos destaca la Fermentación en Estado Sólido (FES), una metodología novedosa que utiliza residuos agrícolas como sustrato y Hongos de la podredumbre blanca (HPB) para su degradación en condiciones de baja humedad, similares a su entorno natural. Esta metodología permite reducir el consumo de agua y energía, y estimula la producción de enzimas ligninolíticas como lacasas, manganeso peroxidasas y lignino peroxidasas (Abeer A. Abd El Aty, 2023).

Las enzimas ligninolíticas tienen amplias aplicaciones industriales, incluida la decoloración de tintes sintéticos presentes en efluentes, que afectan gravemente los ecosistemas acuáticos (Abeer A. Abd El Aty, 2023). Este estudio tuvo como objetivo evaluar la producción de estas enzimas a partir de cascarilla de arroz y su aplicación en la decoloración de azul de metileno, como una alternativa biotecnológica frente a dos problemáticas ambientales relevantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Pretratamiento del sustrato y preinóculo de especie fúngica

La cascarilla de arroz fue obtenida de un mercado local de Medellín, fue l, fue lavada, secada a 80 °C, triturada y tamizada para obtener un tamaño de partícula entre 300–700 µm y se almacenó. Finalmente se sometió a un análisis bromatológico. Respecto a la especie fúngica, se trabajó con *Trametes pubescens,* la cual fue subcultivada con salvado de trigo durante 7 días para su uso posterior como incóulo en la fermentación.

Fermentación en estado sólido

La fermentación se llevó a cabo en matraces Fernbach de 1800 mL con 20 g de sustrato a temperatura ambiente, durante 20 días y usando extracto de levadura como fuente de nitrógeno a una concentración de 47.6 g L^{-1}, glucosa como fuente de carbono a una concentración de 5.1 g L^{-1} y una humedad del 60%. Estas condiciones fueron adaptadas a partir de la optimización obtenida mediante el Diseño Central Compuesto del proyecto UNINNOVA código 53801.

Extracción, medición y cinética de la actividad enzimática

Una vez finalizado el tiempo de fermentación, a cada muestra se le adicionó 200 mL de buffer acetato de sodio 50 mM, pH 5.0, se homogenizó y se agitó durante una hora a 180 rpm y 4 °C. Posteriormente, el extracto se centrifugó por 10 minutos y el sobrenadante se almacenó a 4 °C. La actividad Lacasa fue determinada con ABTS a 420 nm en buffer acetato de sodio 50 mM, pH 4.0 a 25 °C. La actividad MnP mediante la oxidación de sulfato de manganeso a 270 nm en un buffer malonato de sodio 50 mM, pH 4.0 en presencia de peróxido de hidrógeno a 25 °C.

Decoloración in vitro de azul de metileno

El ensayo de decoloración se realizó con azul de metileno a través de un diseño factorial 2^3 mostrado en la Tabla 1. Las soluciones de este colorante se prepararon en buffer acetato de sodio 50 mM, pH 4.0, mezclando 15 mL de colorante con 5 mL de extracto enzimático. Se agitó a 120 rpm a temperatura ambiente. Para evaluar el potencial del extracto enzimático, se replicaron los mejores tratamientos de decoloración utilizando una lacasa comercial de *Trametes versicolor*. Las concentraciones inicial y final se determinaron por espectrofotometría a 664.5 nm y el porcentaje de decoloración (%D) se calculó mediante la ecuación [1], donde Ci y Cf son las concentraciones inicial y final, respectivamente.

Tabla 1. Diseño factorial del proceso de decoloración.

# Tratamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[Enzima]	25	100	100	100	25	25	100	50	25
[Colorante]	25	25	25	100	100	25	100	50	100
Tiempo	48	12	48	12	48	12	48	24	12

$$\%D = \left(\frac{Ci - Cf}{Ci}\right) * 100 \qquad (1)$$

Análisis estadístico

Todos los experimentos se llevaron a cabo por triplicado y se realizó un análisis de varianza simple (ANOVA), seguido de una prueba de comparaciones múltiples utilizando el método de Tukey para identificar diferencias significativas. Los análisis estadísticos se efectuaron con los softwares RStudio (versión 3.6.0) y Statgraphics Centurion XVII (versión 16.1.18, edición de evaluación gratuita).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en las condiciones de FES optimizadas en el proyecto UNINNOVA (código 53801, Universidad nacional de Colombia), se evaluó la actividad enzimática a una escala 20 veces mayor lo cual permite avanzar en la caracterización funcional del sistema. En esta etapa, solo la Lacasa mostró una actividad significativa, mientras que la Manganeso Peroxidasa tuvo una presencia menor. Por ello, los experimentos posteriores se enfocaron exclusivamente en la Lacasa para optimizar su producción a gran escala (ver Tabla 2).

Tabla 2. Actividad de enzimas ligninolíticas de *Trametes pubescens*.

Enzima	Actividad [U gss^{-1}]
Lacasa	20.95 ± 0.66
Manganeso peroxidasa	0.11 ± 0.04

Los resultados obtenidos para la lacasa son altamente satisfactorios en comparación con estudios previos del grupo para este sistema hongo-sustrato a mayor escala. Además, al contrastarlos con datos reportados en la literatura, se evidencia una notable capacidad de producción en las condiciones evaluadas. Por ejemplo, García y Torres (2003) reportaron una actividad máxima de 0.94 U gss^{-1} usando cascarilla de arroz y *T. versicolor* bajo 80 % de humedad durante 21 días. De manera similar, Xu et al. (2020) lograron 25.7 U gss^{-1} empleando residuos de té, un valor comparable al obtenido en este trabajo.

Una vez identificada la mayor producción enzimática, y considerando que su actividad es igual o superior a la reportada en otros estudios, se procedió a evaluar su aplicación potencial en la decoloración de tintes sintéticos, específicamente del azul de metileno, ampliamente utilizado en las industrias textil y farmacéutica, y de gran preocupación por su toxicidad y persistencia en el medio ambiente (Santos da Silva Quinto et al., 2025). Los resultados del diseño factorial son presentados en la Figura 1.

Con base en los datos experimentales presentados en la Figura 1, se observa una alta decoloración de este tinte, con valores superiores al 80 %, específicamente en los tratamientos con 48 horas de residencia que según el diagrama de Pareto (datos no mostrados) indica que el

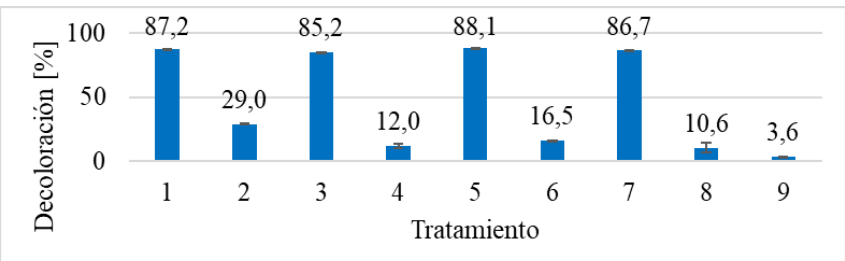


Figura 1. Decoloración del azul de metileno con extracto enzimático obtenido bajo FES.

tiempo es el único factor significativo por encima de las concentraciones de enzima y colorante.

Además, los valores obtenidos superan los reportados por Oraby et al. (2025), quienes lograron una decoloración del 47.6 % utilizando lacasa inmovilizada a una concentración de aproximadamente 6 ppm, significativamente menor que la empleada en este. Por otro lado, (Santos da Silva Quinto et al., 2025) reportaron una decoloración máxima del 29.8% de azul de metileno a 10 ppm con un extracto enzimático similar al utilizado en el presente estudio.

Finalmente, se comparó el extracto enzimático con una lacasa comercial de *T. versicolor,* sin observarse una decoloración significativa del tinte. Esto sugiere que la lacasa por sí sola no es suficiente para degradar este tipo de compuestos. Estos resultados coinciden con lo reportado por dos Santos Bazanella et al. (2013), quienes señalan que la degradación del azul de metileno es favorecida por enzimas como la manganeso peroxidasa. En este estudio, el extracto enzimático presentó un predominio de lacasa con baja actividad de manganeso peroxidasa, mientras que la enzima comercial corresponde a lacasa purificada sin cofactores adicionales.

CONCLUSIÓN

Este estudio demuestra que la FES es una metodología promisoria y sostenible para la producción de extractos enzimáticos con alto potencial en la biorremediación de efluentes industriales contaminados con colorantes. En este caso, el complejo enzimático fue obtenido mediante un proceso optimizado a partir del hongo *Trametes pubescens,* utilizando cascarilla de arroz como sustrato, lo cual contribuye simultáneamente al aprovechamiento de residuos agrícolas y a la mitigación de la contaminación por compuestos tóxicos, mediante procesos biotecnológicos aplicados a la agroindustria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín por el apoyo brindado a través de la infraestructura del Laboratorio de Química Experimental. Asimismo, por el apoyo financiero a través del proyecto código 62467.

REFERENCIAS

Abeer A. Abd El Aty. (2023). Valorization of agro-industrial wastes using fungi for industrial enzymes production. International Journal of Frontline Research in Science and Technology, 2(2), 001-023. https://doi.org/10.56355/ijfrst.2023.2.2.0055

dos Santos Bazanella, G. C., de Souza, D. F., Castoldi, R., Oliveira, R. F., Bracht, A., & Peralta, R. M. (2013). Production of laccase and manganese peroxidase by *Pleurotus pulmonarius* in solid-state cultures and application in dye decolorization. Folia Microbiologica, 58(6), 641-647. https://doi.org/10.1007/s12223-013-0253-7

Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAOSTAT). Production/Yield Quantities of Rice, Paddy in World + (Total). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize/, 2023

García, A., & Torres, R. (2003). Producción de enzimas lignolíticas por Basidiomycetes mediante la técnica de fermentación en sustrato sólido Solid substrate fermentation for lignolytic enzyme production using Basidiomycetes. V, 56-64.

Jose, D., Sivakumar, R., Agarwal, M., Arshad, N., Gundupalli, M. P., Thiagamani, S. M. K., Venkatachalam, P., Amornraksa, S., & Sriariyanun, M. (2025). A comprehensive review of conversion of rice biomass into sustainable products: A green approach toward a circular economy. Sustainable Chemistry for Climate Action, 6(March), 100069. https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100069

Kamboj, A., Sadh, P. K., Chawla, P., Saharan, B. S., Seth, C. S., Sridhar, K., Duhan, J. S., & Sharma, M. (2024). Sustainable management of rice by-products: Environmental challenges, industrial applications, and circular bio-economy innovations. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 62(November), 103430. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103430

Oraby, K. R. M., Villalonga, A., Hassan, F. S. M., Zayed, M. A., Mubarak, M. F., Ojeda, I., Sánchez, A., & Villalonga, R. (2025). Immobilization of laccase on Fe3O4@SiO2 core@shell magnetic nanoparticles for methylene blue biodegradation. Process Biochemistry, 148(September 2024), 10-16. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.11.012

Santos da Silva Quinto, A., Fontes Sampaio, I. C., Silva de Carvalho, M., Cézar, K. S., Silva, F. N., Costa, F. S., da Silva Souza, M., Pimentel, A. B., Maria de Carvalho Tavares, I., Nascimento, N. A., Santana, E. C., Lima, M. D., Irfan, M., & Franco, M. (2025). Valorization of agri-food by-products for laccase oxidative multienzyme extract production and dye degradation: A sustainable biodegradation approach. Journal of the Indian Chemical Society, 102(6). https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.101717

Xu, L., Sun, K., Wang, F., Zhao, L., Hu, J., Ma, H., & Ding, Z. (2020). Laccase production by Trametes versicolor in solid-state fermentation using tea residues as substrate and its application in dye decolorization. Journal of Environmental Management, 270(December 2019), 110904. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110904

EJE TEMÁTICO 4
Mecanización agrícola, agricultura digital y energía



http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Estimación de la humedad óptima de labranza en suelos agrícolas mediante aprendizaje automático

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimation of optimal water content for tillage in agricultural soils using machine learning

Sandro Nolan Ipaz Cuastumal[1]*, María Camila Gutiérrez Portilla[2] and Mayra Alejandra Hernández Cruz[2]

Palabras clave:
Análisis multivariado
Friabilidad
PCA
Textura del suelo
Trabajabilidad del suelo

RESUMEN

La gestión adecuada de la humedad del suelo es fundamental para garantizar una labranza eficiente y sostenible. El presente estudio tuvo como objetivo estimar el contenido óptimo de agua para labranza (θOPT) en suelos agrícolas, aplicando un modelo simplificado definido como θOPT=0,75×θs ((Dexter & Bird, 2001; Dexter et al., 2005), donde θs corresponde a la humedad a saturación. Se analizó una base de datos con 430 muestras de suelos de diversas texturas y propiedades físicas. Los resultados mostraron un valor promedio de θOPT de 32,1% con una desviación estándar de 8,83. Se encontraron diferencias significativas entre clases texturales (P<0,001), siendo más altos los valores en suelos arcillosos. Un análisis de componentes principales (PCA) y un agrupamiento k-means identificaron tres grupos funcionales de suelos según su textura, plasticidad y capacidad de retención de agua. Estos resultados validan el modelo simplificado como herramienta confiable para orientar las prácticas de labranza y resaltan la textura del suelo como el principal factor determinante de su trabajabilidad. El estudio aporta una base para el diseño de estrategias de manejo diferenciadas y prácticas agrícolas más sostenibles.

Keywords:
Multivariate analysis
Friability
PCA
Soil texture
Soil workability

ABSTRACT

Proper soil moisture management is essential to ensure efficient and sustainable tillage practices. This study aimed to estimate the optimal water content for tillage (θOPT) in agricultural soils by applying a simplified model defined as θOPT=0.75×θs ((Dexter & Bird, 2001; Dexter et al., 2005), where θs is the saturation moisture content. A dataset of 430 soil samples with different textures and physical properties was analyzed. Results showed an average θOPT of 32.1% with a standard deviation of 8.83. Significant differences were found among textural classes (P<0.001), with higher values observed in clay soils. Principal Component Analysis (PCA) and k-means clustering identified three functional soil groups according to their texture, plasticity, and water retention capacity. These findings validate the simplified model as a reliable tool to guide tillage practices and highlight soil texture as the main determinant of soil workability. The study provides a foundation for differentiated management strategies and more sustainable agricultural practices.

[1]Docente. Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
[2]Estudiante Ing. agrícola, Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
*Corresponding author: snipazc@unal.edu.co

CC BY NC SA

La labranza constituye una de las prácticas agrícolas más relevantes, ya que permite preparar la cama de siembra y favorecer la germinación y el desarrollo radicular. Sin embargo, su efectividad depende en gran medida del contenido de agua en el suelo. Un suelo demasiado seco demanda altos costos energéticos y tiende a pulverizarse, mientras que un suelo excesivamente húmedo se compacta y pierde estructura (Mueller et al., 2003). El contenido óptimo de agua para labranza (θOPT) se define como el nivel de humedad en el cual se maximiza la friabilidad, minimizando la formación de terrones grandes (Dexter & Bird, 2001).

Estudios recientes han empleado enfoques de modelado para predecir la humedad óptima de labranza, integrando propiedades físicas y métodos estadísticos. Huo et al. (2022) propusieron un modelo simplificado basado en la humedad de saturación que ha mostrado buen desempeño en diferentes condiciones edáficas. Además, el uso de técnicas de aprendizaje automático, como el PCA y k-means, ha permitido agrupar suelos de acuerdo con su comportamiento mecánico y propiedades de retención de agua, facilitando el diseño de prácticas de agricultura de precisión (Singh et al., 2021; López-Garrido et al., 2023).

En este contexto, el presente estudio buscó aplicar y validar el modelo simplificado de estimación de θOPT, evaluando además su relación con propiedades edáficas clave como la textura, la plasticidad y la retención de agua, mediante análisis univariados y multivariados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó una base de datos con 430 muestras de suelos agrícolas con información de textura (arena, limo y arcilla), pH, materia orgánica, límites de Atterberg (límite líquido, LL, y límite plástico, LP) y curvas de retención de humedad en diferentes tensiones (0–1500 kPa).

El procesamiento de datos se realizó en R 4.3.1. Los valores faltantes fueron imputados con la media de cada variable. Los indicadores calculados incluyeron: índice de plasticidad (IP=LL–LP), capacidad de agua disponible (CAD=θ30–θ1500) y el contenido óptimo de agua para labranza (θOPT=0,75×θs), (Dexter & Bird, 2001; Dexter et al., 2005).

Se efectuó un análisis descriptivo, pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis, correlación de Pearson, análisis de componentes principales (PCA) y agrupamiento mediante k-means (k=3) para identificar grupos funcionales de suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de técnicas de aprendizaje automático permitió caracterizar el comportamiento de las propiedades físicas del suelo y estimar el contenido óptimo de agua para labranza (θOPT). Los resultados se presentan en tres apartados: el resumen estadístico de las variables edáficas, la distribución del θOPT y la clasificación multivariada de las muestras según sus atributos físicos y químicos.

Tabla 1. Resumen estadístico de las propiedades físicas del suelo. (θs, θOPT, LL, LP con medias, min, max, DE).

Clase textural	Suma de N	Suma de LL Promedio (%)	Suma de LP Promedio (%)	Suma de θ_OPT Promedio (%)
Ar	106	64,7	33,4	39,8
ArL	58	56,1	28,3	34,4
F	40	33,9	20,1	25,5
FA	5	34,8	20,8	17,8
FAr	43	90,6	45,4	31,5
FArA	9	32,9	18,9	25,4
FArL	84	46,7	24,2	31,8
FL	73	38,6	22,5	28,3
L	3	31,3	19,7	27,9
NA	9	44,1	22,9	27,5
Total general	**430**	**473,7**	**256,2**	**316,6**

Nota: Ar = Arcilloso, ArL = Arcillo-limoso, F = Franco, FA = Franco arenoso, FAr = Franco arcilloso, FArA = Franco arcillo-arenoso, FArL = Franco arcillo-limoso, FL = Franco limoso, L = Limoso, NA = No asignado.

De acuerdo con la Tabla 1, las medias indican que los suelos arcillosos (Ar) presentan los mayores valores de LL ($\approx$ 64,7%) y θOPT ($\approx$ 39,8%), mientras que los francos arenosos (FA) registran los menores promedios en todas las variables (LL $\approx$ 34,8%; θOPT $\approx$ 17,8%). Para los suelos franco arcillosos (FAr), el valor corregido de θOPT fue de 31,5%, en concordancia con lo reportado en la literatura (θs $\approx$ 42%).

Estos hallazgos confirman que la textura constituye el factor determinante de la trabajabilidad del suelo, en concordancia con lo descrito por Munkholm (2013). Asimismo, se demuestra la utilidad del modelo simplificado de Huo et al. (2022), que ofrece una alternativa práctica para estimar el θOPT sin recurrir a métodos más complejos.

La Figura 1 muestra que la distribución del θOPT presenta una forma aproximadamente unimodal, con mayor concentración de valores entre 20 y 40 %. Esto indica que, con alta frecuencia, los suelos alcanzan condiciones óptimas de labranza en este rango, mientras que valores extremos (<15% o >55%) son poco probables.

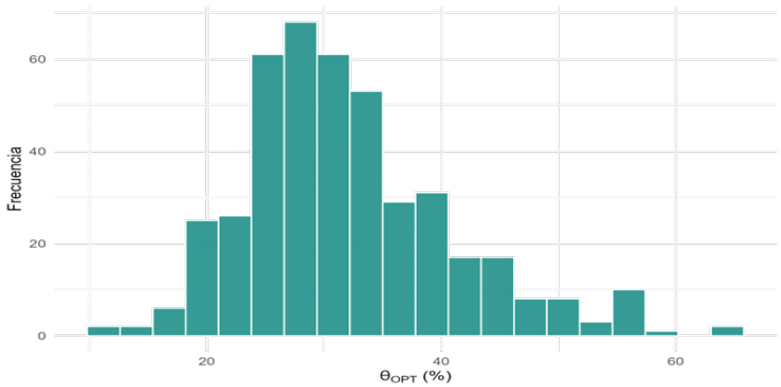


Figura 1. Distribución de los valores de θOPT para las 430 muestras de suelo.

El PCA resumió el 67.6% de la varianza en dos componentes (Figura 2). La Dimensión 1 (49.4%) representó un gradiente textual-plástico, mientras que la Dimensión 2 se asocia al pH y la CAD (capacidad de agua disponible). El análisis de clústeres k-means identificó tres grupos funcionales distintos como se visualiza en el biplot del PCA.

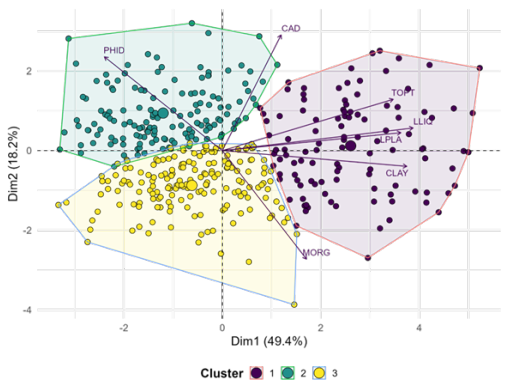


Figura 2. Biplot del análisis de componentes principales con clasificación k-means (k = 3).

Estos hallazgos confirman que la textura constituye el factor determinante de la trabajabilidad del suelo, en concordancia con lo descrito por Munkholm (2013). Asimismo, se demuestra la utilidad del modelo simplificado de Huo et al. (2022), que ofrece una alternativa práctica para estimar el θOPT sin recurrir a métodos más complejos.

CONCLUSIÓN

El modelo simplificado de estimación de $\theta OPT=0,75\times\theta s$ demostró ser robusto y consistente.

La textura y los límites de Atterberg se identificaron como factores clave en la trabajabilidad del suelo.

La materia orgánica tuvo una influencia secundaria.

El PCA y el k-means permitieron clasificar los suelos en grupos funcionales, lo que constituye una base para prácticas de agricultura de precisión.

Los resultados aportan un marco metodológico para orientar decisiones de manejo agrícola y contribuir a la sostenibilidad productiva.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo institucional brindado en el desarrollo de esta investigación. Este trabajo no presenta conflictos de interés.

REFERENCIAS

Dexter, A. R., & Bird, N. R. A. (2001). Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil and Tillage Research, 57(4), 203-212.

Dexter, A. R., Czyż, E. A., Richard, G., & Reszkowska, A. (2005). A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. Geoderma, 127(3–4), 291–301. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.019

Huo, J., Song, X., Chen, C., Zhou, H., & Shang, J. (2022). A simple method for estimating the optimum water content for tillage. European Journal of Soil Science, 73(1), e13169.

Mueller, L., Schindler, U., Fausey, N. R., & Lal, R. (2003). Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. Soil and Tillage Research, 72(1), 9-20.

Munkholm, L. J. (2013). Soil Friability: concept, assessment and effects of soil properties and management. D.Sc. Thesis, Aarhus University, Denmark.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Análisis y desarrollo de ecuaciones del costo de trasplante mecanizado de agave versus manual

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Analysis and development of cost equations for mechanized agave versus manual transportation

César Gutiérrez Vaca[1]*, Alberto Saldaña Robles[1], Noé Saldaña Robles[1], Adriana Saldaña Robles[1], Alfredo Márquez Herrera[1], Israel Enrique Herrera Diaz[1] and Jonathan Cepeda Negrete[1]

Palabras clave:
Hijuelo
Prototipo
Trasplantadora

RESUMEN

El trasplante manual de agave en campo representa un costo significativo de mano de obra, además que está es escaza, de ahí la conveniencia de mecanizarlo. En este estudio se desarrollan ecuaciones que permiten comparar los costos del trasplante manual contra mecanizado. Para determinar la ecuación de costo de trasplante manual se consideró el pago por planta colocada en campo y la densidad de plantación, lo que arrojó un valor de trasplante de $7.700 ha^{-1}. Para determinar la ecuación de costo de trasplante mecanizado se involucró: renta de tractor agrícola; costo de máquina trasplantadora; pago a tres operarios que asisten la máquina, lo que resultó en $ 6.524 ha^{-1}. Se estableció un criterio de decisión entre el trasplante manual y mecanizado donde éste último representa el 85% del primero, justificándose su elección. El valor máximo de máquina, para que el trasplante mecanizado sea inferior al manual, fue de $780 mil, pero al considerar una vida útil de 1200 h por máquina el valor máximo fue de $450 mil para recuperar la inversión en ese tiempo. Las ecuaciones desarrolladas facilitan la determinación de; costo de trasplante manual, mecanizado, su comparación y uso en la determinación de costos del trasplante de agave.

Keywords:
Agave seedling
Prototype
Transplanter

ABSTRACT

Transplanting agave in field represents a significant cost due to labor expenses, which is also scarce. Hence, there is convenience in mechanizing the process. In this study, equations are developed to compare costs of manual transplantation versus mechanized. To determine the manual transplanting equation cost, an average payment per transplanted plant in the field and traditional planting density were considered, resulting in a transplantation cost of US$ 385 ha^{-1}. For determine mechanized transplantation equation cost, following factors were involved: agricultural tractor rental, cost of the transplanting machine, and payment to three operators assisting machine, resulting a cost of US$ 326 ha^{-1}. A decision criterion was established to compare manual and mechanized transplantation, where latter represents 85% of first, justifying its choice. It was found that the maximum value for the machine is US$ 39,000, in order to get a cheaper mechanized transplanting than manual one. However, considering an average lifespan of 1200 hours for agricultural planters, the maximum value should be US$ 22,500 to recover the investment within that time. The developed equations facilitate the determination of the cost of manual transplantation, cost of mechanized transplantation, their comparison, and their use in determining the costs of agave transplantation activities.

[1]Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad de Guanajuato, México
*Corresponding author: cesarg@ugto.mx

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

De acuerdo con el Sistema de información agrícola y pesquera (SIAP) en 2021 fueron plantadas 139´314 ha de agave en México (SIAP 2023). Considerando la densidad de plantación promedio de 3.500 plantas ha^{-1} (dato de campo), el valor aproximado de plantas alcanzó los 487 millones. El trasplante se realiza de forma manual y un jornalero puede plantar hasta 800 plantas $día^{-1}$ (dato de campo), la cantidad necesaria de mano de obra para desarrollar esa actividad es cercana a 610 mil jornales. En algunos Estados de México la mano de obra disponible para las actividades agrícolas es escasa por lo que conseguirla no es tarea fácil. El pago y condiciones de trabajo deben ser atractivas para que los jornaleros opten por continuar en actividades agrícolas y no desplazarse a la industria, que supone mejor comodidad y prestaciones que el campo no ofrece (Herrera-Pérez et al. 2018). En el presente estudio se desarrollan ecuaciones que permiten determinar de manera sencilla el costo de trasplante manual y mecanizado, se analizan y comparan dichos costos para determinar cuánto costaría mecanizar el trasplante de agave contra el costo de mantener el trasplante manual como hasta ahora (Hossen et al. 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los hijuelos de planta madre (Figura 1) de agave colocados de forma manual en campo, es el sistema de producción que predomina en el país. Existe un prototipo de máquina para trasplante (Figura 2) del que aún no se puede estimar un valor comercial, sin embargo, se puede conocer el valor comercial de otras máquinas de trasplante similares y así poder compararlo contra el costo de trasplante manual. Para determinar el costo de trasplante manual se investigó de manera directa en campo de trasplante de agave los valores que se muestran en la Tabla 1.



Figura 1. Hijuelo de agave.



Figura 2. Prototipo de plantadora para agave.

Tabla 1. Costo del trasplante manual.

Plantas por hectárea	3.500	pla ha^{-1}
Costo unitario de trasplante manual (PPP)	0,11	USD \$ pla^{-1}
Costo trasplante manual (CTMan)	385	USD \$ ha^{-1}

Considerando ambos valores es posible establecer la ecuación que prediga el costo del trasplante manual como a continuación se describe:

$$CTman = PPP(3500) \quad (1)$$

Donde; CTMan = Costo del trasplante manual (\$ ha^{-1}), PPP = Costo unitario de trasplante manual (USD \$ pla^{-1}) 3500 = Densidad de plantación en campo (pla ha^{-1}).

Para realizar el trasplante mecanizado se necesita: un tractor agrícola; la máquina trasplantadora como tal; tres operarios que alimenten la plantadora y supervisen / corrijan cualquier eventualidad. Para simplificar el análisis se consideró la renta de tractor, como mejor opción cuyo costo promedio es de USD\$ 30 h^{-1}. Como segundo elemento se investigó el precio probable de una trasplantadora mecánica de pinzas prensoras para doble hilera, como la que se presenta en la Figura 2, estimándose en USD\$ 25,000 maq^{-1}. El tercer elemento involucra el costo de los operarios que acompañan el conjunto tractor – plantadora, haciendo referencia al costo de trasplante manual se consideró el mismo pago de USD\$0.11 por planta para cada uno de los tres operarios. Como primer paso es necesario determinar la capacidad

de trabajo del conjunto tractor – plantadora, en horas por hectárea plantada (h ha^{-1}). Las variables que influyen en el fenómeno son el marco de plantación y la velocidad de trabajo en el trasplante (Gómez et al, 2006), así como los tiempos muertos para virar al final de cada hilera (Navarro y Cinanni 2009), que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Capacidad de trabajo tractor – plantadora.

Marco de plantación entre plantas	1	m pla^{-1}
Marco de plantación entre hileras	2.8	m $hilera^{-1}$
Hileras por hectárea	35.7	hilera ha^{-1}
Longitud de hilera	100	m $hilera^{-1}$
Distancia por recorrer	3.571	km ha^{-1}
Velocidad de trabajo del trasplante	1.1	km h^{-1}
Tiempo por hectárea plantada	3.25	h ha^{-1}
Tiempos muertos (vueltas en cabeceras)	0.30	h ha^{-1}
Capacidad de trabajo tractor - plantadora	3.54	h ha^{-1}

Una vez determinada la capacidad de trabajo del conjunto tractor - plantadora es posible calcular el costo en USD$ ha^{-1} tanto de; tractor (Tabla 3), máquina plantadora (Tabla 4) y operarios (Tabla 5).

Tabla 3. Costo de tractor por hectárea.

Tractor arrendamiento	30	USD$ h^{-1}
Capacidad de trabajo tractor - plantadora	3.54	h ha^{-1}
Costo tractor por hectárea plantada	106.2	USD $ ha^{-1}

Tabla 4. Costo de máquina plantadora de agave por hectárea plantada.

Posible valor comercial estimado	25 000	USD$ maq^{-1}
Posible valor de mantenimiento y reparación (40% del costo)	10 000	USD$ maq^{-1}
Capacidad de trabajo por día (8 horas por jornada)	2.26	ha $día^{-1}$
Capacidad de trabajo por semana (6 días)	13.5	ha $semana^{-1}$
Capacidad de trabajo por mes (4 semanas)	54.2	ha mes^{-1}
Capacidad de trabajo por temporada (4 meses)	217	ha $temporada^{-1}$
Capacidad de trabajo por temporada (en horas)	768	h $temporada^{-1}$
Vida útil de plantadora	1 200	h maq^{-1}
Capacidad de trabajo temporadas / máquina (años)	1.56	temporadas maq^{-1}
Costo por hora de plantadora de agave	29.15	USD$ h^{-1}
Capacidad de trabajo tractor – plantadora	3.54	h ha^{-1}
Costo por hectárea de la plantadora de agave	103.2	USD$ ha^{-1}

Tabla 5. Costo operadores por hectárea plantada.

Costo unitario de trasplante manual	0.11	USD$ pla^{-1}
Capacidad de trabajo de 1 operario	800	pla $día^{-1}$
Número de operarios para asistir la máquina plantadora de agave	3	Oper $día^{-1}$
Horas de jornada de trabajo	8	h $día^{-1}$
Capacidad de trabajo tractor – plantadora	3.54	h ha^{-1}
Costo de operarios por hectárea	116.8	USD$ ha^{-1}

Considerando las variables antes descritas es posible establecer la ecuación 2 que predice el costo del trasplante mecanizado como a continuación se presenta.

$$CT\,Mec = 3.54\left[V_{maq}\left(\frac{1.4}{1200}\right) + R_{trac} + PPP(300)\right] \quad (2)$$

Donde; CTmec = Costo del trasplante mecanizado (USD$ ha^{-1}), 3.54 = Capacidad de trabajo tractor – plantadora (h ha^{-1}), Vmaq = Precio o valor comercial de la máquina plantadora de agave (USD$ maq^{-1}) Rtrac = Precio de renta de tractor agrícola (USD$ h^{-1}), PPP = Costo unitario de trasplante manual (USD$ pla^{-1}), 1.4 = Representa el valor de la máquina más 40% de reparación y mantenimiento durante su vida útil, 1.200 = Horas de vida útil de la máquina plantadora, 300 = Representa un factor de plantas por hora que puede colocar el grupo de operarios en la máquina (pla h^{-1})

El criterio de decisión para elegir entre el trasplante de forma manual o mecanizada se presenta en la siguiente relación. Mientras el costo de trasplante mecanizado sea menor o igual al costo de trasplante manual se justifica su elección.

$$CTMec \leq CTMan$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El costo del trasplante manual (CTMan) asciende a USD$ 385 ha^{-1} y el mecanizado (CTMec) resulta en USD$ 326,2 ha^{-1}, la diferencia es de USD$ 58,8 ha^{-1}, justificándose la elección del trasplante mecanizado al ser más económico en 15%. Al revisar el ahorro por hectárea resulta que son necesarias 596 hectáreas para recuperar la inversión en una máquina plantadora. Lo anterior representa 2.75 temporadas (años), considerando la capacidad de trabajo por temporada de 217 ha que puede alcanzar la plantadora (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación trasplante mecanizado versus manual.

Ahorro trasplante mecanizado / manual	58,8	USD$ ha^{-1}
Costo trasplante mecánico versus manual	85%	
Valor comercial de máquina y costo de mantenimiento	35,000	USD$ maq^{-1}
Hectáreas para recuperar la inversión en una máquina	596	ha maq^{-1}
Capacidad de trabajo por temporada (4 meses)	217	ha temporada^{-1}
Temporadas para recuperar la inversión de la plantadora	2.75	temporada maq^{-1}

Desde el punto de vista económico es viable realizar el trasplante mecanizado de agave en campo y hasta cierto valor de máquina se justifica su elección contra el trasplante manual, lo anterior coincide con los hallazgos de Aykaz E. et al (2017) quienes recomiendan el uso de trasplantadoras para vegetales en lugar de continuar usando mano de obra para el trasplante como en el método tradicional. Se coincide con los hallazgos de Ojha y Kwatra (2014) en cuanto a que el costo de trasplante mecanizado es menor que el trasplante manual sin embargo los porcentajes de ahorro difieren pues en el arroz es casi de 50%.

CONCLUSIÓN

Se han determinado una serie de ecuaciones que permiten conocer los costos del trasplante mecanizado y manual, así como un criterio de decisión para optar por realizar la actividad de forma mecanizada o continuar con la forma manual. Con este modelo matemático es posible calcular en cualquier momento el valor máximo recomendable de máquina, al fijarse los valores de las variables involucradas en el fenómeno; valor de la máquina, arrendamiento del tractor agrícola, pago por planta a operarios.

REFERENCIAS

Aykas, E., R. C. Akdeniz, F. Kömekçi & C. Kömekçi. 2017. Determining the Field Performance and Cost Analysis of Walk Behind Type Semi-Automatic Hand Feed Vegetable Transplanter. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi. v. 13, n. 3, p. 149-154.

Gómez, F.M., J.G. Ruelas, R. Serwatowsky & C.G. López. 2006. Trasplante mecanizado de hortalizas. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. v. 15, n. 1, p. 5-11.

Herrera-Pérez, L., E. Valtierra-Pacheco, I. Ocampo-Fletes, M.A. Tornero-Campante, J.A. Hernández-Plascencia & R. Rodríguez-Macías. 2018. Esquemas de contratos agrícolas para la producción de Agave tequilana Weber en la región de tequila, Jalisco. Agricultura, sociedad y desarrollo. v. 15, n. 4, p. 619-637.

Hossen, M.A., M.M. Hossain, M.E. Haque & R.W. Bell. 2018. Transplanting into non-puddled soils with a small-scale mechanical transplanter reduced fuel, labour and irrigation water requirements for rice (Oryza sativa L.) establishment and increased yield. Field Crops Research. v. 225, p. 141-151.

Navarro, J. & G. Cinanni. 2009. La elección más rentable de un tractor para su explotación. MG Mundo ganadero. v. 215, p. 36-40, 2009.

Ojha, P. & S. Kwatra. 2014. Analysis of different paddy transplanting methods in northern India: Ergo-economical study. Journal of Applied and Natural Science. v. 6, n. 2, p. 654-658.

SIAP – Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Producción agrícola. Disponible en https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/. Fecha de consulta 20 junio 2023.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Efecto de la representación geométrica en el coeficiente de restitución del fruto de café: validación DEM con ensayos de impacto

Effect of geometric representation on the coefficient of restitution of coffee fruit: DEM validation with impact tests

Edna Jeraldy Suarez Cardozo[1], Ricardo Rodrigues Magalhães[2], Santiago Velasquez Rubio[3], Leomar Santos Marques[4] and Davidson Silveira e Silva[5]

Palabras clave:
Café
Calibración experimental
Poscosecha
Simulación numérica

RESUMEN

La simulación con el Método de Elementos Discretos (DEM) se empleó para evaluar el efecto de la representación geométrica en el coeficiente de restitución de frutos maduros de *Coffea arabica* L. var. Catuaí Vermelho. El valor experimental de referencia se obtuvo mediante ensayos de impacto sobre madera, con registro y análisis de trayectorias y repetición suficiente para promediar resultados (Hacienda Cafua, Ijaci–MG, Brasil); la simulación numérica se desarrolló en Rocky DEM 2025 R1 bajo condiciones equivalentes. Se compararon tres geometrías de modelado: (i) esfera, (ii) sólido de revolución y (iii) reconstrucción por escaneo 3D. Los resultados muestran que la geometría basada en escaneo 3D reprodujo con menor error el coeficiente de restitución experimental ($\approx 0{,}331455$), mientras que la esfera y el sólido de revolución presentaron mayores desviaciones. Estos hallazgos confirman que incrementar la fidelidad geométrica del fruto mejora la capacidad predictiva del DEM para eventos de impacto; no obstante, la elección de la geometría debe ponderar el compromiso entre precisión y costo computacional según el objetivo de la aplicación poscosecha.

Keywords:
Coffee
Experimental calibration
Postharvest
Numerical simulation

ABSTRACT

Discrete Element Method (DEM) simulations were used to evaluate how geometric representation affects the coefficient of restitution (COR) of ripe *Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho fruits. The experimental reference COR was obtained from wood-impact tests with trajectory tracking and sufficient replication for averaging (Hacienda Cafua, Ijaci–MG, Brazil); numerical simulations were performed in Rocky DEM 2025 R1 under equivalent conditions. Three modeling geometries were compared: (i) sphere, (ii) solid of revolution, and (iii) 3D scan–based reconstruction. Results show that the 3D-scanned geometry reproduced the experimental COR with the smallest error (≈ 0.331455), whereas the spherical and solid-of-revolution models exhibited larger deviations. These findings confirm that increasing fruit geometric fidelity improves the predictive capability of DEM for impact events; nevertheless, geometry selection should balance accuracy and computational cost according to the intended postharvest application.

[1]Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Brazil. edna.cardozo@estudante.ufla.br
[2]Departamento de Automática, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Brazil. ricardorm@ufla.br
[3]Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Brazil. santiago.rubio@estudante.ufla.br
[4]Departamento de Física, Universidade Federal de Lavras, Brazil. leomarmarques@ufla.br
[5]Departamento de Ingeniería, Universidade Federal de Lavras, Brazil. davidson.silveira@ufla.br

CC BY NC SA

La simulación con Método de Elementos Discretos (DEM) es una vía eficaz para predecir impactos en productos agrícolas, pero su validez depende de parámetros de contacto cuidadosamente calibrado, en particular el coeficiente de restitución, cuyos valores son difíciles de medir directamente; además, las partículas suelen representarse como esferas y la verificación del modelo exige contrastes físico-numéricos (Zu et al., 2025). En paralelo, la fidelidad geométrica del fruto condiciona la respuesta mecánica: aunque las aproximaciones simples (esferas, elipses, cilindros) facilitan el modelado, pueden limitar la caracterización de propiedades. Sin embargo, la integración de experimentos y simulaciones, apoyada en estrategias sistemáticas de calibración, puede reducir el error y aumentar la precisión de los modelos DEM (Ding et al., 2023). Tinoco et al., (2020) obtuvieron resultados favorables con enfoques paramétricos basados en curvas de Bézier, donde se permitió capturar mejor la morfología y mejorar la estimación de propiedades del café.

El objetivo del proyecto es evaluar el coeficiente de restitución de un fruto de *coffea arabica L* bajo tres geometrías de modelaje (esfera simple, sólido de revolución, y modelo por escáner 3D) mediante simulaciones DEM, y correlacionarlo con datos experimentais de impacto para cuantificar el efecto de la fidelidad geométrica en la exactitud del modelo y orientar la selección de representaciones para aplicaciones poscosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

La determinación experimental de los parámetros de interacción del fruto maduro de Coffea arabica L. var. Catuaí Vermelho se realizó siguiendo la metodología descrita por Zu et al. (2025) y Ding et al. (2023). Los frutos fueron recolectados en la hacienda Cafua, ubicada en el municipio de Ijaci, Minas Gerais, Brasil. Se llevaron a cabo ensayos de impacto sobre una superficie de madera para estimar el coeficiente de restitución. Cada prueba se repitió 30 veces y se calculó el valor promedio como referencia para la simulación y validación del modelo. Las pruebas fueron registradas en video e imagen, y procesadas con el software Tracker 6.3.2, utilizando la herramienta de control de trayectorias para analizar el movimiento del fruto.

El coeficiente de restitución e para la interacción fruto–madera se calculó mediante la ecuación:

$$e = \frac{vf}{vi} = \frac{\sqrt{2gH1}}{\sqrt{2gH0}} = \frac{\sqrt{H1}}{\sqrt{H0}} \qquad (1)$$

Donde; vf: Velocidad después del impacto; vi: Velocidad antes del impacto; g: Aceleración de la gravedad; H1: Altura alcanzada tras el rebote; H0: Altura inicial de caída.

Los valores de módulo de Young de 2,02 MPa y coeficiente de Poisson 0,27 fueron tomados de literatura (Tinoco et al., 2022). El modelado geométrico del fruto se realizó en FreeCAD 1.0.1 a partir de una dimensión patrón, generando 2 representaciones: esfera simple y sólido de revolución, y adicionalemnte se realizó una reconstrucción por escáner 3D (Figura 1).

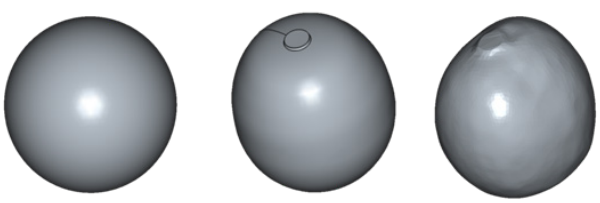


Figura 1. Geometrías del fruto de café: Esfera simple, sólido de revolución, y reconstrucción por escáner 3D

Las simulaciones numéricas se desarrollaron en Rocky DEM 2025 R1, definiendo las propiedades mecánicas y de contacto calibradas experimentalmente. Para cada geometría se reprodujeron las condiciones experimentales de caída libre, comparando los resultados simulados del coeficiente de restitución con los valores obtenidos en laboratorio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación entre las trayectorias simuladas y el ensayo experimental muestra un comportamiento globalmente coherente: en todos los casos el fruto describe una caída libre seguida de un rebote cuya altura depende de la geometría utilizada en el modelado (Figura 2). Este resultado respalda la validez general del procedimiento de

simulación, ya que la tendencia observada es consistente con lo esperado para la interacción fruto–superficie. Sin embargo, se observa una discrepancia en el momento del impacto, donde las simulaciones no coinciden de forma exacta con la trayectoria experimental. Resultados similares han sido reportados en la literatura. Por ejemplo, Zu et al. (2025), al estudiar la restitución y fricción de uvas de vino mediante ensayos físicos y simulaciones DEM, encontraron que aunque las curvas simuladas replicaban adecuadamente la caída y rebote, las discrepancias más notorias se daban precisamente en el instante de impacto debido a la sensibilidad de este evento a la geometría de la partícula y a la heterogeneidad interna del material.

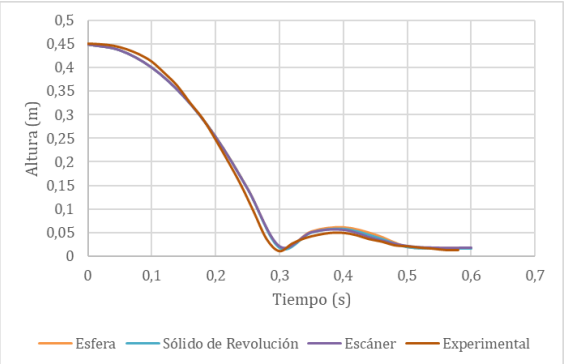


Figura 2. Trayectoria vertical del fruto en función del tiempo para la determinación del coeficiente de restitución.

El coeficiente de restitución experimental fue 0,331455. Todas las simulaciones lo sobrestimaron: esfera = 0,36751 (diferencia absoluta ≈ 0,0361; +10,88 %), sólido de revolución = 0,36068 (≈ 0,0292; +8,82 %) y escáner 3D = 0,35477 (≈ 0,0233; +7,03 %). En términos de proximidad al valor medido, el escaneo 3D presentó la menor desviación, seguido del sólido de revolución y, por último, la esfera.

Este patrón es coherente con el efecto de la fidelidad geométrica en el contacto: el escaneo 3D captura curvaturas locales y asimetrías que incrementan la disipación efectiva y aproximan la respuesta simulada a la experimental. Ahora bien, las geometrías simplificadas pese a su menor precisión geométrica, logran reproducir adecuadamente el comportamiento medio gracias a la calibración de parámetros de contacto (Windows-Yule et al., 2022) y resultan valiosas cuando se prioriza economía computacional.

De cara a cerrar la brecha residual con el experimento, es conveniente ajustar con mayor finura los parámetros del modelo en la simulación (contacto/material, condiciones numéricas y de contorno) y validar iterativamente contra mediciones adicionales, manteniendo el balance entre precisión y costo computacional según el objetivo del estudio.

Tabla 1. Resultados de coeficiente de restitución para diferentes representaciones geométricas del fruto de café.

Geometría	h1 (m)	e	Error vs exp
Esfera	0,06078	0,36751	10,88%
Sólido R	0,05854	0,36068	8,82%
Escáner	0,05664	0,35477	7,03%

CONCLUSION

La representación geométrica del fruto incide de manera decisiva en la estimación del coeficiente de restitución mediante DEM. Las simulaciones mostraron que aumentar la fidelidad geométrica mejora la concordancia con el experimento, destacándose el modelo basado en escaneo 3D. No obstante, las geometrías simplificadas (esfera y sólido de revolución) siguen siendo útiles para exploraciones rápidas, con menor costo computacional, siempre que se reconozca su sesgo positivo y se acompañen de una calibración cuidadosa.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Núcleo de Estudios en Modelado y Simulación Numérica; a la Hacienda Cafua por facilitar el lugar de investigación; al Prof. Dr. Sandro Pereira da Silva por su colaboración y por poner a disposición los equipos y la infraestructura que hicieron posible este estudio; a CAPES (Brasil) por el apoyo financiero; y al Programa de Posgraduación en Ingeniería Agrícola y a la Universidad Federal de Lavras por su respaldo académico, institucional y financiero.

REFERENCIAS

Tinoco, H. A., J. Buitrago-Osorio, L. Perdomo-Hurtado, J. Lopez-Guzman, C. A. Ibarra, A. Rincon-Jimenez, O. Ocampo & L. V. Berrio. 2022. Experimental Assessment of the elastic properties of exocarp–mesocarp and beans of *Coffea arabica* L. var. Castillo Using Indentation Tests. Agriculture 12, 502.

Tinoco, H. A., D. R. Barco, O. Ocampo & J. Buitrago-Osorio. 2020. Geometric Modeling of the Valencia Orange (*Citrus sinensis* L.) by Applying Bézier Curves and an Image-Based CAD Approach. Agriculture 10, 313.

Zu, H., X. Zhang, H. Zhang, X. Wang, Y. Li, Z. Li, J. Chen, Z. Guo & H. Zhou. 2025. Interaction properties of wine grapes: DEM analysis and experimental investigation. Journal of Food Engineering 387, 112347.

Ding, Q., J. Jin, X. Sun, F. Yang, X. Xu, Z. Zhang & R. Wei. 2023. Fast and precise DEM parameter calibration for *Cucurbita ficifolia* seeds. Biosystems Engineering 236, 258–276.

Windows-Yule, C. R. K. & A. Neveu. 2022. Calibration of DEM simulations for dynamic particulate systems. Papers in Physics 14, 140010.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Diseño y construcción de una desgranadora rotativa de semillas de frijol

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Design and construction of a rotary bean seed sheller machine

Jorge Alexander Londoño Castañeda[1*] and Alvaro Guerrero Aguirre[2],

RESUMEN

Palabras clave:
Daño mecánico en el frijol
Desgranadora de frijol
Desgrane manual
Eficiencia de mano de obra
Esfuerzo físico
Prototipo experimental

En la poscosecha del frijol, la actividad de desgrane es realizada comúnmente por medios manuales, abriendo cada vaina para retirar los granos o a través de golpes a la masa cosechada; lo cual representa limitaciones por alto requerimiento de mano de obra y tiempo, además, considerable esfuerzo físico de los trabajadores. Para dar solución a este problema se diseñó y construyó un prototipo experimental de desgranadora mecánica, accionada por un motor eléctrico, capaz de separar el grano de la gavilla que puede ser usado en diferentes variedades de frijol, con bajo daño mecánico y disminuyendo el número de jornales requeridos para esta actividad. Adicionalmente, durante el proceso de diseño y construcción, se consideró el uso de materiales de bajo costo y fácil adquisición. También se realizó un análisis ergonómico y de seguridad del operario. La desgranadora de frijol consta de un rodillo con paletas y sistemas de zarandas vibratorias. El uso de la máquina, aumentó el rendimiento en 485,1% comparado con el desgrane manual. Se proyecta que, con ajustes en capacidad y durabilidad, este prototipo pueda adaptarse a diferentes escalas de producción. Asimismo, su implementación a nivel comunitario podría fomentar procesos asociativos, y servir como base para futuros desarrollos tecnológicos en la poscosecha del frijol.

ABSTRACT

Keywords:
Mechanical damage to beans
Bean sheller
Manual shelling
Labor efficiency
Physical effort
Experimental prototype.

In the bean postharvest process, shelling is performed manually, either by opening each pod to remove the beans or by hitting the harvested mass. This represents limitations due to high labor and time demands, as well as considerable physical effort required from workers. To address this problem, an experimental prototype of a mechanical sheller was designed and built, driven by an electric motor. It can separate the grain from the sheaf. It can be used for several bean varieties, causing minimal mechanical damage and reducing the number of days used in this activity. Furthermore, during the design and construction process, the use of low-cost and easily acquired materials was demonstrated. An ergonomic and operator safety analysis was also conducted. The bean sheller consists of a roller with paddles and vibrating sieve systems. The use of the machine increased yield by 485.1% compared to manual shelling. It is projected that, with adjustments in capacity and durability, this prototype can be adapted to different production scales. Furthermore, its implementation at the community level could foster associative processes and serve as a basis for future technological developments in bean post-harvest.

[1] CENICAFÉ, Manizales, Colombia. ORCID 0009-0006-2369-3542
[2] CENICAFÉ, Manizales, Colombia. ORCID 0000-0002-4986-4366
*Corresponding author: jorge.londono@cafedecolombia.com

CC BY NC SA

La producción de *Phaseolus vulgaris* L. (Frijol arbustivo), en las calles del café durante la etapa de levante, representa una alternativa para mejorar la seguridad alimentaria de las familias cafeteras y generar ingresos adicionales antes de obtener la primera cosecha de café (Jaramillo & Salazar, 2021), (Jaramillo & Jaramillo-Jiménez, 2025). Sin embargo, una de las etapas más laboriosas y con menor mecanización en la cadena de producción del frijol es el proceso de desgrane, que consiste en extraer las semillas de las vainas secas (Jaramillo, 2023).

En el mercado existen algunas opciones de máquinas para el desgrane, no obstante, estas suelen tener costos elevados y requerir un mantenimiento complejo. Por ello, surge la necesidad de desarrollar una máquina desgranadora de frijol de bajo costo, con un alto nivel de seguridad, operación sencilla y de fácil mantenimiento. La idea principal para la fabricación de la desgranadora de frijol, se obtuvo, en particular, de máquinas desgranadoras de maíz (*Zea mays* L.), con las cuales se realizaron pruebas preliminares, donde se observaron resultados positivos. Se modificó el área de ingreso, las dimensiones del eje central y sus paletas; adicionalmente se incluyeron las zarandas para la clasificación y extracción del grano de frijol.

El objetivo principal del desarrollo de la máquina, es suministrar una herramienta que permita reducir los tiempos del proceso de desgrane, con un bajo nivel de daño mecánico y disminuyendo el requerimiento de mano de obra, la cual puede destinarse a otras labores agrícolas, y considerando aspectos como la ergonomía y la seguridad del operario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Conceptualización y diseño de la desgranadora de semillas de frijol

Para el diseño de la desgranadora se tuvo en cuenta la alimentación manual de vainas secas, separación de granos y expulsión de gavilla.

El equipo está conformado por una boca de entrada de vainas secas que permite la seguridad del operario, un eje principal con paletas para la destrucción de las vainas que permite la expulsión de la gavilla de gran tamaño en el extremo posterior, tamiz intercambiable de agujeros circulares que permite contener la gavilla y filtrar el frijol según la variedad, sistema densimétrico de clasificación grano-gavilla basado en mesa vibratoria, sistema motriz con accionamiento manual, paro de emergencia y switch de seguridad en apertura de la tapa principal (ver Figura 1).

La tapa principal de la máquina fue construida en lámina cold rolled calibre 18, está incluye tolva de entrada de vainas secas y la boca de salida de la gavilla.

El eje principal de la máquina fue construido con un tubo de 4” SCH40, al cual se le soldaron las paletas o aspas perpendiculares, que giran a una velocidad de 530 revoluciones por minuto (rpm). Este sistema incluye una bandeja perforada con agujeros circulares que está sobrepuesta a la estructura de forma tal que se pueda intercambiar para clasificar distintos tamaños de granos, según su variedad.

El sistema de clasificación por densidad, construido con un mecanismo de excéntrica, realiza una segunda separación de la gavilla que pasa por la bandeja perforada. Se usaron listones de madera cedro (*Cedrela odorata L.*) por sus propiedades físico-mecánicas para amortiguar el mecanismo vibratorio.

La estructura metálica principal fue construida en su totalidad mediante un ensamblaje soldado de perfiles metálicos de sección cuadrada de 50mm calibre 16. El sistema eléctrico, está conformado por un motor monofásico de 2hp, con un requerimiento energético de 1,765 kWh, para uso en fincas. Adicionalmente, cuenta con un guardamotor de 25 amperios con interruptor de encendido y apagado, un paro de emergencia ubicado al otro extremo del guardamotor y un microswitch de seguridad ubicado entre la tapa principal y la estructura de la máquina.

El prototipo tiene unas dimensiones de 1.230 mm de largo, 1.450 mm de alto y 620 mm de ancho y 120 kg de peso. (ver Figura 2).

La máquina cuenta con guardas de seguridad en los sistemas de transmisión para evitar el contacto de los operarios con partes móviles, garantizando la seguridad durante limpieza o ante atascos. La tolva de

alimentación cuenta con una geometría ergonómica la cual por su longitud impide que las manos del operario alcancen a llegar a las aspas del eje central.

Pruebas de funcionamiento

Para la evaluación de la máquina se midió la cantidad de frijol desgranado por día, utilizando frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris* L.). Se realizaron pruebas durante 11 jornadas de trabajo en las estaciones experimentales de Cenicafé: "La Catalina" (Risaralda), "Naranjal" (Caldas) y "El Tambo" (Cauca). La alimentación de la máquina fue realizada de forma manual, con intervalos para el transporte del material a desgranar y para la limpieza de la gavilla sobre la máquina. Se determinaron las siguientes variables:

Eficiencia operativa de la máquina respecto al método manual. Para esto se utilizó la Ecuación 1:

$$\eta = \left(\frac{R_m - R_c}{R_c} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde: η: Eficiencia relativa (%); R_m: Rendimiento de la máquina (kg jornal^{-1}); R_c: Rendimiento del método convencional (manual) (kg jornal^{-1}).

Jornales requeridos con el método convencional, determinado mediante la Ecuación 2.

$$J_c = \frac{R_m}{R_c} \quad (2)$$

Donde: J_c: jornales requeridos con el método convencional.

Porcentaje de uso de jornales, determinado mediante la Ecuación 3.

$$\eta_2 = \left(\frac{J_c - J_m}{J_c} \right) \quad (3)$$

Donde: η_2: Porcentaje de reducción en el uso de jornales (%); J_m : Jornales requeridos con la desgranadora.

Consumo enérgetico por jornada: determinado mediante la Ecuación 4

$$CE = P \times t \quad (4)$$

Donde: CE: Consumo energético por jornada (kWh) P: Potencia Nominal del motor (kW). t: Tiempo de operación por jornada (h).

Consumo energético por jornada ajustado, con un factor de uso del 75%, se determinó con la Ecuación 5.

$$CE_{ajustado} - P \times t \times 0{,}75 \quad (5)$$

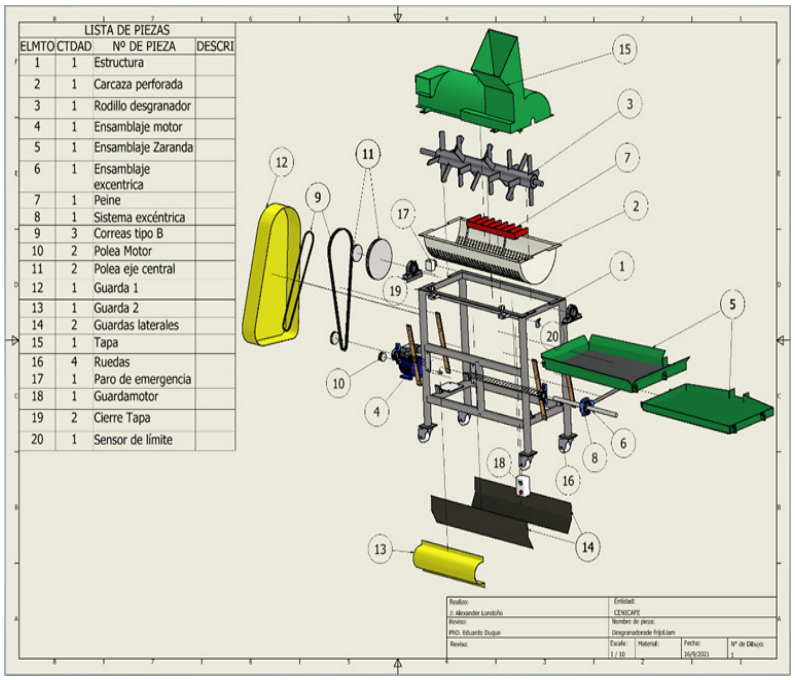
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Construcción de la desgranadora de frijol

El prototipo alcanzó un rendimiento promedio de 275 kilogramos de frijol desgranado por día, con un 0% de daño mecánico, lo cual representa una mejora significativa frente al desgrane manual cuyo rendimiento se estima en 47 kilogramos por jornal. Esto implica un aumento del 485,1% de eficiencia (Tabla 1). Adicionalmente, durante las pruebas, el prototipo funcionó sin atascos ni fallos mecánicos, demostrando un diseño robusto y confiable. En términos de seguridad, incorpora un paro de emergencia, un sensor de tapa que evita el funcionamiento con el eje expuesto, y guardas en los mecanismos de transmisión, lo que permite cumplir con estándares básicos de seguridad operacional y reduce riesgos de accidentes.

Tabla 1. Valores de eficiencia, jornales y consumo energético de la máquina desgranadora de frijol.

Variable	Unidad	Valor
Eficiencia Operativa (1)	%	485,1
Eficiencia Relativa (2)	jornales	5,85
Uso de jornales (3)	%	83
Consumo energético jornada (4)	kWh	15,89
Consumo energético ajustado (5)	kWh	11,91



LISTA DE PIEZAS			
ELMTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRI
1	1	Estructura	
2	1	Carcaza perforada	
3	1	Rodillo desgranador	
4	1	Ensamblaje motor	
5	1	Ensamblaje Zaranda	
6	1	Ensamblaje excentrica	
7	1	Peine	
8	1	Sistema excéntrica	
9	3	Correas tipo B	
10	2	Polea Motor	
11	2	Polea eje central	
12	1	Guarda 1	
13	1	Guarda 2	
14	2	Guardas laterales	
15	1	Tapa	
16	4	Ruedas	
17	1	Paro de emergencia	
18	1	Guardamotor	
19	2	Cierre Tapa	
20	1	Sensor de límite	

Figura 1. Plano general del diseño de la desgranadora de frijol.

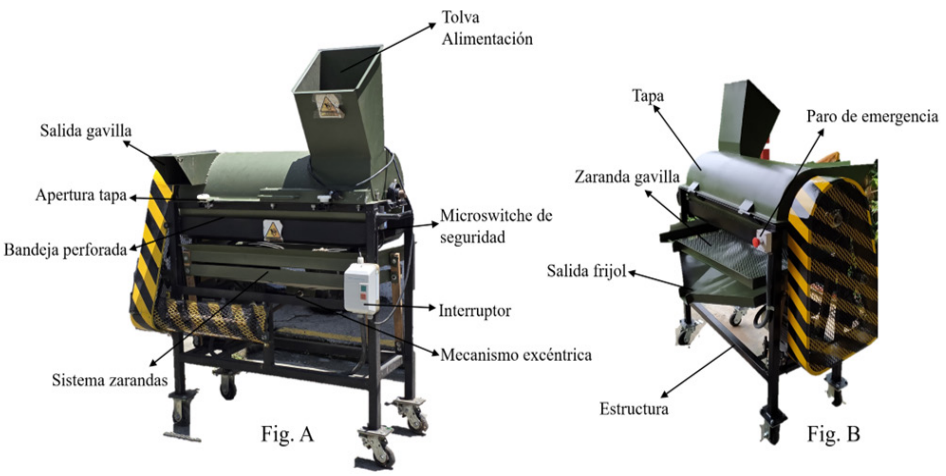


Figura 2 Vista frontal (A) y vista posterior (B)

CONCLUSIÓN

El diseño actual del prototipo, junto con sus materiales de estructura metálica y demás componentes, permiten su escalabilidad a distintas dimensiones, facilitando la adaptación de la máquina para su transporte en campo, fabricación y distribución. Asimismo, se contempla la posibilidad de incorporar motores de combustión a gasolina, lo que permitiría llevar el equipo directamente hasta los lotes de cultivo, incrementando la eficiencia operativa y evitando el transporte manual de la masa de frijol hasta la máquina.

Gracias al aumento del rendimiento en el proceso de desgrane, este equipo representa una potencial reducción en los costos de mano de obra para pequeños y medianos productores de café y frijol. Además, su diseño posibilita el uso asociativo, beneficiando a un mayor número de agricultores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos por la asesoría y colaboración a: Juan Rodrigo Sanz Uribe, Líder de la disciplina de Poscosecha de Cenicafé; Santiago Jaramillo Cardona, Investigador de la disciplina de Fitotecnia; Hugo Mauricio Salazar Echeverry, Investigador de la Disciplina de Economía y a Cenicafé por financiación para la construcción y evaluación.

REFERENCIAS

Jaramillo, S. (2023). Recomendaciones para el manejo agronómico del cultivo de fríjol arbustivo en el sistema intercalado con café. Avances Técnicos Cenicafé 551, 1–12. https://doi.org/10.38141/10779/0551

Jaramillo, S., & Jaramillo-Jiménez, A. (2025). Nuevas variedades de fríjol arbustivo biofortificado adaptadas al sistema intercalado con café. Avances Técnicos Cenicafé 571. https://doi.org/10.38141/10779/0571

Jaramillo, S., & Salazar, H. M. (2021). Cultivos intercalados: Una alternativa para aumentar los ingresos y la sostenibilidad de cafetales. Avances Técnicos Cenicafé 534, 1–8. https://doi.org/10.38141/10779/0534

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Evaluación geoespacial del pisoteo de maquinaria en caña de azúcar mediante análisis automatizado de telemetría y líneas de surcado

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Geospatial assessment of machinery trampling in sugarcane using automated telemetry and crop line analysis

Julián Felipe Betancourt Baquero[1], Julian David Ome Narvaez[2], Camilo Andrés Vélez Angulo[2], Julián Fernando Mateus Rodríguez[2] and Christian José Mendoza Castiblanco[1]

Palabras clave:
Autoguiado,
Conservación del suelo
Cosecha mecanizada
Surcado
Tráfico agrícola controlado

RESUMEN

La gestión eficiente del tráfico de maquinaria es un reto clave para los ingenios azucareros, dado que el pisoteo excesivo incrementa la compactación y afecta la regenración del cultivo. Disponer de herramientas precisas para evaluar el pisoteo real permite optimizar el uso de tecnologías como el piloto automático, reducir el tráfico sobre el área productiva e impulsar esquemas de Tráfico Agrícola Controlado (TAC). En este contexto, se desarrolló una herramienta computacional para cuantificar de manera objetiva el impacto del tránsito de maquiniaria en caña de azúcar. La metodología integró datos de telemetría de maquinaria con líneas de surcado obtenidas por dron, procesados automáticamente mediante un script en Python con el objetivo de que se automatice el analisis y se cuente con una herramienta flexible y robusta para la investigación y administración de maquinaria. Se evaluaron máquinas con y sin piloto automático, comparando la precisión de guiado y el porcentaje de pisoteo fuera del surco cosechado. Los resultados evidenciaron que el uso de piloto automático redujo la dispersión lateral y el pisoteo en áreas productivas, mejorando la eficiencia operativa.

Keywords:
Autosteering
Soil conservation
Mechanized harvesting
Rowing
Controlled traffic farming

ABSTRACT

Efficient management of machinery traffic is a key challenge for sugar mills, as excessive trampling increases soil compaction and affects crop regeneration. Having precise tools to evaluate actual trampling enables optimization of technologies such as auto-steering, reduction of traffic over productive areas, and promotion of Controlled Traffic Farming (CTF) schemes. In this context, a computational tool was developed to objectively quantify the impact of machinery traffic in sugarcane. The methodology integrated machinery telemetry data with crop row lines obtained by drone, automatically processed through a Python script, aiming to automate the analysis and provide a flexible, robust tool for machinery research and management. Machines with and without auto-steering were evaluated, comparing guidance accuracy and the percentage of trampling outside the harvested row. Results showed that the use of auto-steering reduced lateral dispersion and trampling in productive areas, improving operational efficiency.

[1]Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia , Bogotá, Colombia. jbetancourtb@unal.edu.co; cjmendozac@unal.edu.co
[2]Programa de Agronomía, Área de Agricultura Digital, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), Florida, Valle del Cauca, Colombia. jdome@cenicana.org; cavelez@cenicana.org; mateus@cenicana.org

CC BY NC SA

En el sector de la caña de azúcar, la mecanización agrícola ha incrementado la eficiencia de las operaciones, pero también ha generado desafíos agronómicos, siendo el pisoteo de la maquinaria uno de los más significativos. El tránsito constante de equipos pesados, como tractores y cosechadoras, provoca la compactación del suelo, lo que se ha demostrado que afecta negativamente la estructura del suelo, la infiltración de agua, el desarrollo radicular y, en última instancia, el rendimiento de los cultivos, especialmente en los ciclos de rebrote (Quevedo, et. al., 2025). Este problema se acentúa en las áreas de cultivo, donde la presión del suelo por el paso de las máquinas puede limitar severamente la capacidad de la planta para regenerarse y alcanzar su máximo potencial productivo.

La gestión del pisoteo es una necesidad crítica en la agroindustria cañera para optimizar la sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo. En este contexto, la implementación de tecnologías de agricultura de precisión ha emergido como una solución prometedora. Específicamente, el uso de piloto automático con corrección RTK en la maquinaria de cosecha ha demostrado ser una estrategia eficaz para mitigar este problema (Celades, 2019 ;Brunini & Petrucci, 2019). Esta tecnología permite mantener las trayectorias de las máquinas alineadas con los surcos del cultivo, lo que reduce la dispersión lateral, minimiza los daños a las cepas y, en consecuencia, disminuye el área pisoteada. Sin embargo, para que los productores puedan evaluar el retorno de la inversión de esta tecnología y validar su impacto agronómico, se necesitan herramientas robustas que cuantifiquen de manera objetiva el pisoteo real en el campo.

Ante la necesidad de una herramienta de evaluación precisa y automatizada, se desarrolló un script en Python que integra datos de telemetría de la maquinaria de cosecha con la geometría de las líneas de surcado del cultivo. Este sistema proporciona un método reproducible y escalable para estimar y comparar el nivel de pisoteo entre diferentes operaciones. El objetivo principal de este trabajo es presentar esta herramienta y los resultados obtenidos de su aplicación en un estudio comparativo. La investigación se enfocó en evaluar el impacto del piloto automático al cuantificar el área pisoteada por cosechadoras con y sin esta tecnología, aportando evidencia técnica clave para la toma de decisiones sobre la adopción de sistemas de autoguiado en la agroindustria de la caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología fue diseñada para integrar y analizar de forma automatizada dos tipos de datos geoespaciales: la telemetría de las cosechadoras y la geometría de las líneas de surcado. Es por ello que se considero la parametrización de la cosecha mecanizada en el cultivo de caña de azúcar generada por el proyecto CATE (cosecha, alce, transporte y entrega de caña) de CENICAÑA en 2024, esta geometria se presenta en la Figura 1.

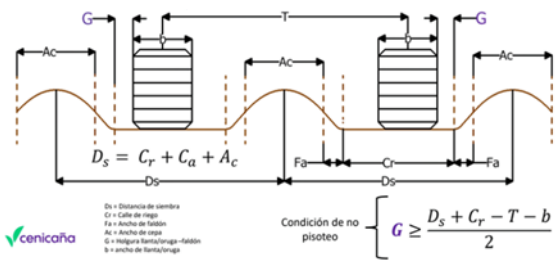


Figura 1. Parametrización de la geometría del surco. Adaptado de CATE, 2024.

Para la recolección de datos, se utilizaron archivos de telemetría provenientes de cosechadoras que operaban en diferentes campos, los cuales contenían la posición geográfica de las máquinas en intervalos de tiempo regulares. De manera simultánea, se obtuvieron las líneas de surcado de los lotes evaluados, las cuales representaban el patrón de siembra y servían como referencia del área productiva, estas provenientes de fotogrametria realiazad con imágenes de dron a los 60 diás de la cosecha.

El script fue desarrollado en Python (Van Rossum & Drake, 2019) diseñado para procesar esta información. El algoritmo inicia con un filtrado de datos para asegurar

la relevancia del análisis. Se descartaron los datos de telemetría que se encontraban fuera del área de cultivo. Adicionalmente, para concentrar el análisis en la operación de cosecha, se eliminaron las trayectorias con un rumbo que difería significativamente de la orientación de los surcos (más de 15°), así como los datos donde el rendimiento o la presión del cortador de base se encontraban por debajo de un umbral establecido. Una vez depurados los datos, el script reconstruyó la trayectoria de las máquinas de cosecha y, utilizando parámetros técnicos de su geometría (ancho de trocha, ancho de neumáticos), generó polígonos (buffers) que representaban el área pisoteada por las llantas. Posteriormente, mediante una operación de intersección espacial con las líneas de surcado, se cuantificó el área productiva afectada por este tránsito. Un aspecto clave de la herramienta fue su capacidad para segmentar los resultados según la condición de la máquina (con o sin piloto automático), lo que permitió una comparación directa del impacto de esta tecnología en la Figura 2 se presenta un diagrama de flujo de la herramienta.

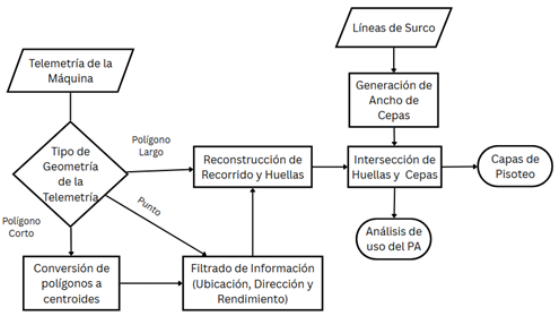


Figura 2. Esquema del flujo de trabajo del script de pisoteo. Elaboración propia

Para la evaluación, se definieron indicadores técnicos específicos, como la coincidencia angular, que medía la alineación de la máquina con los surcos, y el área pisoteada de la cepa, que cuantificaba la superficie del surco afectada. El script fue desarrollado con bibliotecas de Python especializadas en análisis geoespacial, como Geopandas y Shapely, y la visualización de los resultados se realizó en un Sistema de Información Geográfica (SIG) como QGIS (QGIS.org, 2025)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo de este estudio produjo como resultado principal un script en Python, denominado CosechaDBG.py, diseñado específicamente para el análisis geoespacial automatizado del pisoteo de maquinaria en cultivos de caña de azúcar. Esta herramienta computacional integra de manera eficiente y reproducible datos de telemetría y geometrías de surcos, permitiendo la cuantificación objetiva del área afectada por el tránsito de cosechadoras. La arquitectura del script, que incluyó funciones para la detección de codificación, la limpieza de datos, y el filtrado por criterios de ubicación, rumbo y rendimiento, demostró ser robusta y flexible para procesar información heterogénea proveniente de diferentes fuentes, en la Figura 3 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos con el script en diferentes condiciones de guiado.

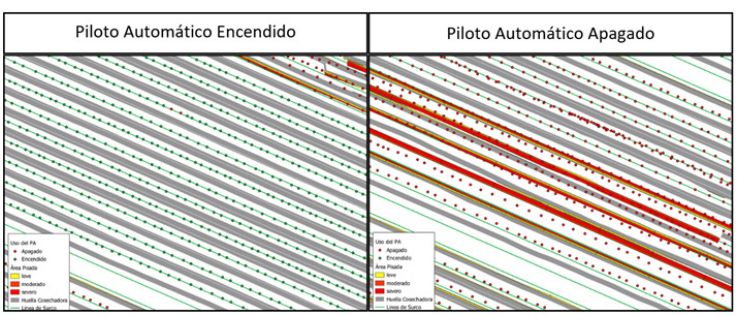


Figura 3. Comparación del pisoteo en función del uso del piloto automático. Elaboración propia.

El uso de la herramienta permitió llevar a cabo un análisis comparativo del pisoteo en 22.8 hectáreas del Ingenio Mayagüez, evaluando la eficacia de la tecnología de piloto automático (PA). Los resultados obtenidos evidenciaron una reducción promedio del 12% en la severidad del área total pisada de la cepa cuando se utilizó el piloto automático, en comparación con las operaciones realizadas sin esta asistencia, en la siguiente figura se presenta el pisoteo total encontrado por cada condición de autoguiado y en cada ensayo analizado. Este hallazgo valida la capacidad del sistema de autoguiado para mantener la trayectoria de la maquinaria alineada con los surcos, minimizando así el daño directo al cultivo.

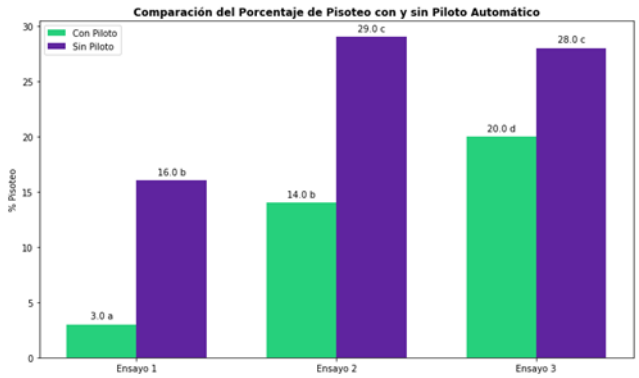


Figura 4. . Comparación del uso del piloto automático en zonas pisadas. Elaboración propia.

Un análisis más detallado de los datos de telemetría reveló que, a pesar de que el piloto automático se activó entre el 35% y el 60% del tiempo total de la labor, solo el 8% del total del pisoteo registrado ocurrió durante los periodos en los que el sistema estaba en uso. Está marcada diferencia resalta la efectividad del PA para mitigar el pisoteo, lo que sugiere que una mayor adopción y un uso más constante de esta tecnología podrían generar beneficios agronómicos y económicos aún más significativos.

CONCLUSIÓN

La implementación del script de análisis de pisoteo, a partir de datos de telemetría, permitió cuantificar con alta precisión el impacto de la cosecha mecanizada. Los resultados evidenciaron que el uso de sistemas de piloto automático con tecnología RTK reduce significativamente el área pisoteada sobre la cepa. Este efecto mejora la eficiencia operativa de la maquinaria y favorece la regeneración del cultivo, al minimizar el daño a cepas remanentes, disminuir la compactación del suelo y reducir la necesidad de resiembra.

El desarrollo de esta herramienta establece un precedente para consolidar soluciones tecnológicas orientadas a la toma de decisiones agronómicas basadas en datos. Su futura implementación como plataforma web institucional en CENICAÑA permitirá la evaluación continua del pisoteo, integrando otros módulos de análisis y ofreciendo una visión más completa del desempeño de labores de campo. Esto facilitará la adopción de estándares de calidad medibles y auditables, impulsando estrategias de Tráfico Agrícola Controlado (TAC) y promoviendo sistemas de producción más sostenibles, eficientes y rentables.

La herramienta desarrollada, proyectada como plataforma web institucional de CENICAÑA, permitirá evaluar de forma continua el pisoteo de la maquinaria en caña de azúcar, integrando datos geoespaciales y módulos de análisis. Favorecerá decisiones agronómicas basadas en evidencia, optimizará la sostenibilidad productiva y facilitará la capacitación técnica, impulsando estrategias de Tráfico Agrícola Controlado y operaciones mecanizadas más eficientes.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra profunda gratitud a quienes nos acompañaron, apoyaron e inspiraron en este camino profesional. A nuestras familias, por su amor, valores y respaldo incondicional, base de lo que somos hoy. A los compañeros investigadores de CENICAÑA, en especial a los pertenecientes a la Agronomía y al CATE

por su guía y criterios técnicos fundamentales para el éxito del proyecto. También agradecemos a nuestras universidades —Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá), Universidad del Valle y Universidad ICESI— por su formación integral, educación sólida y los espacios que marcaron nuestra trayectoria académica. Reconocemos especialmente a los profesores que, con su dedicación y pasión, nos impulsaron a superar límites y comprometernos con los retos de un sector estratégico para Colombia: la agroindustria de la caña de azúcar.

Finalmente nos permitimos expresar nuestro deseo de presentar este trabajo en el formato de ponencia oral.

REFERENCIAS

Brunini, R. G., & Petrucci, E. A. (2019). Operational performance of sugarcane harvests with and without the use autopilot. Agrarian, 12(43), 79–88. https://doi.org/10.30612/agrarian.v12i43.7110

CATE. (2024). Condiciones de campo y su impacto en las buenas prácticas de corte mecánico. Comité Técnico – Procaña. CENICAÑA.

Celades, J. A. (2019). Tráfico controlado en cosecha de caña de azúcar: propuesta metodológica de validación con un caso de estudio [Proyecto aplicado]. Repositorio Institucional UNAD. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/31583

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. (2025). Informe anual 2024. Cali, Colombia: Autor. https://www.cenicana.org/pdf_privado/informe_anual/ia_2024/ia_2024.pdf

QGIS.org. (2025). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org

Quevedo Amaya, Y. M., Cepeda Quevedo, A. M., González López, N., & Mateus Rodríguez, J. F. (2025). Manejando la resiembra en caña de azúcar (Serie Divulgativa No. 20). CENICAÑA.

Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Propuesta de clasificación de la cobertura y uso del suelo (LCLU) en un cultivo de cítricos

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Land cover and land use classification (LCLU) proposal in a citrus crop

Maria Camila Alvarez Bedoya[1]*, Heidy Andrea Toro Monsalve[2], Liseth Natalia Loaiza[3], Catalina Rodriguez Cardona, Sergio Alejandro Quiñonez Gómez, Vanesa Rivera Morales, Isabella Torres Santamaría, Sofia Vásquez Jaramillo, and Manuela Ramos Ospina[4]

Palabras clave:
Aprendizaje de máquina
Clasificación de la cobertura del suelo
Cultivo de cítricos
Vehículo aéreo no tripulado

RESUMEN

La agricultura de precisión demanda herramientas capaces de generar información detallada y oportuna para optimizar la gestión de los cultivos. En este contexto, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) equipados con sensores multiespectrales constituyen una alternativa eficaz para obtener datos de alta resolución y realizar clasificaciones de coberturas y usos del suelo. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta metodológica para la clasificación de coberturas y usos del suelo en un cultivo de cítricos (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck y *Citrus × latifolia*), diferenciando entre: cultivo cítrico, construcciones, bosque y suelo desnudo. La metodología integra el procesamiento de imágenes aéreas con la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático, específicamente Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) y la red neuronal U-Net. Los resultados preliminares corresponden a la generación de ortomosaicos multiespectrales y modelos digitales de elevación de alta resolución espacial, que servirán como base para las fases de etiquetado manual y validación de modelos de clasificación. La propuesta representa un avance en la aplicación de la agricultura digital, con potencial para optimizar la planificación agrícola y mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos citrícolas.

ABSTRACT

Keywords:
Machine learning
Land cover classification
Citrus crop
Unmanned aerial vehicle

Precision agriculture demands tools capable of generating detailed and timely information to optimize crop management. In this context, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) equipped with multispectral sensors represent an effective alternative for acquiring high-resolution data and performing accurate land cover and land use (LCLU) classifications. This work aims to develop a methodological approach for LCLU classification in a citrus crop (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck and *Citrus × latifolia*), distinguishing among citrus cultivation, built-up areas, forest, and bare soil. The methodology integrates aerial image processing with the application of machine learning algorithms, specifically Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and the convolutional neural network U-Net. Preliminary results correspond to the generation of multispectral orthomosaics and high-resolution digital elevation models, which will serve as the foundation for subsequent phases of manual labeling and classification model validation. This proposal represents a step forward in the application of digital agriculture, with the potential to optimize agricultural planning and improve sustainability on citrus productive systems.

[1]https://orcid.org/0009-0005-4116-6845
[2]https://orcid.org/0009-0002-4453-2888
[3]https://orcid.org/0009-0003-6821-0645
[4]https://orcid.org/0000-0001-5922-535X
*Corresponding author: mcalvarezb@eafit.edu.co

CC BY NC SA

La gestión eficiente de una finca de producción agrícola exige un conocimiento detallado de las características y condiciones de sus cultivos, aspecto clave para la toma de decisiones que impulsen la productividad y la sostenibilidad (Bongiovanni 2004). No obstante, los métodos tradicionales de monitoreo suelen ser costosos, lentos y localizados, lo que limita la capacidad de los agricultores para implementar prácticas de manejo adaptativas y oportunas (Gebbers and Adamchuk 2010). A este desafío se suma la variabilidad climática, que incrementa la vulnerabilidad de los cultivos, favorece la aparición de enfermedades y compromete la rentabilidad de estos sistemas (Ivanchuk 2025).

En este contexto, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) equipados con sensores multiespectrales se han consolidado como una herramienta eficaz para la adquisición de información de alta resolución en menor tiempo y con costos reducidos (Berrío M et al. 2015; Rose et al. 2023). Estas tecnologías permiten calcular índices de vegetación como el NDVI, útiles para detectar vigor, estrés hídrico o deficiencias nutricionales (Bouguettaya et al. 2022; Kim et al. 2023). Asimismo, los enfoques de clasificación de imágenes han evolucionado desde métodos basados en píxeles hacia técnicas orientadas a objetos (OBIA), que ofrecen mayor robustez frente a la heterogeneidad de coberturas (Vilar et al. 2020; Bispo dos Santos and Conti 2022). Asimismo, el desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático y profundo, tales como Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) y redes neuronales convolucionales tipo U-Net, ha demostrado mejorar significativamente la precisión de la clasificación de coberturas en escenarios de alta complejidad (Bouguettaya et al. 2022; Yan et al. 2024).

En el caso de fincas con cultivos de cítricos como la naranja 'valencia' (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) y el limón Tahití (*Citrus × latifolia*), la caracterización de la cobertura del suelo es importante para optimizar el manejo agronómico, al facilitar la planificación de labores, el diseño de drenajes y la distribución eficiente de los recursos. La integración de imágenes adquiridas con VANT y algoritmos de clasificación avanzados representa, por tanto, una oportunidad para fortalecer la agricultura digital y de precisión en este tipo de sistemas (Rose et al. 2023; Khalil et al. 2024).

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta metodológica para la clasificación de coberturas del suelo (cultivo cítrico, construcción, bosque y suelo desnudo) en una finca citrícola, a partir de imágenes aéreas de alta resolución capturadas con dron y procesadas mediante algoritmos de aprendizaje automático. La propuesta, actualmente en ejecución, contempla la construcción de un conjunto de datos, el diseño y validación de modelos de clasificación, y la contrastación con observaciones de campo. Los resultados esperados buscan sentar las bases para la implementación de estrategias de gestión agrícola más precisas, sostenibles y replicables en otros sistemas productivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en un distrito de producción agrícola y ganadera, ubicado en las estribaciones de la cordillera Central de los Andes, en el límite suroccidental del departamento de Antioquia, Colombia. El área presenta un rango altitudinal entre 570 y 680 m s. n. m., clima de sabana tropical y diversidad de especies de cítricos, principalmente naranja y limón. La cobertura del terreno está conformada por pastizales y huertos de cítricos, con un gradiente que se extiende desde pasturas jóvenes en el occidente hasta cultivos maduros en el oriente.

Diseño experimental y recolección de datos

El área total de estudio comprende 447 hectáreas, divididas en seis parcelas experimentales de 100 × 100 m. En estas parcelas se realizaron observaciones de campo y se establecieron etiquetas manuales de las coberturas, utilizadas para el entrenamiento y la validación de los modelos de clasificación. Para la adquisición de información, se efectuaron vuelos con un dron DJI Mavic 3M a una altura de 120 m, obteniendo aproximadamente 10.000 imágenes en bandas multiespectrales y RGB. Adicionalmente, se georreferenciaron puntos de control y sitios relevantes dentro del área de estudio, con el fin de garantizar precisión en los procesos de clasificación y validación.

Procesamiento de imágenes y construcción de ortomosaicos

Las imágenes capturadas se procesaron en **Pix4D**,

generando ortomosaicos multiespectrales y RGB con una resolución espacial de 10 cm por píxel, así como un modelo digital de superficie (MDS) y un modelo digital del terreno (MDT). Posteriormente, la información fue organizada y visualizada en QGIS, donde se realizó la delimitación y generación de etiquetas manuales de las diferentes coberturas presentes en las parcelas experimentales. Actualmente, el proyecto se encuentra en esta fase, cuyos resultados se presentarán en la sección de resultados.

Clasificación de coberturas: En la siguiente etapa, la clasificación de la cobertura y uso del suelo se implementará en "Python", empleando tres algoritmos: "Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM)" y la red neuronal **U-Net** cítricos (Vilar et al. 2020; Yan et al. 2024). Estos modelos serán entrenados y validados a partir de las etiquetas generadas, con el propósito de comparar el desempeño de los métodos en la identificación de coberturas dentro del cultivo de cítricos (Bouguettaya et al. 2022).

Validación y análisis de precisión: La evaluación de la exactitud de los modelos se realizará mediante una matriz de confusión, calculada a partir del índice de intersección sobre unión (IoU) con un umbral de 0.1. Asimismo, se calcularán métricas de desempeño como Precisión, Exhaustividad (Recall), F1-Score, Error absoluto medio (MAE) y error porcentual medio (%MAE), con el fin de cuantificar la capacidad de discriminación de los algoritmos y establecer comparaciones entre ellos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado del procesamiento de las imágenes capturadas mediante el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), se generaron cinco ortomosaicos (especificaciones en Tabla 1) y dos productos de elevación del terreno para la zona de estudio.

Tabla 1. Especificaciones de los productos ópticos derivados de VANT.

Banda	Longitudes de onda (nm)	Resolución imagen original (px)	Resolución ortomosaico (cm/píxel)
Verde	560 ± 16	2592 × 1944	10
Rojo	650 ± 16	2592 × 1944	
Borde rojo	730 ± 16	2592 × 1944	
Infrarrojo cercano (NIR)	860 ± 26	2592 × 1944	
RGB	400–700 (visible)	5280 × 3956	

Tabla 2. Resumen estadístico de los modelos digitales del terreno (DTM) y de superficie (DSM).

Producto	Resolución (cm/píxel)	Valor mínimo (m)	Valor máximo (m)	Media (m)	Desviación estándar (m)	Rango (m)
DTM	10	581.5	679.6	622.8	21.0	98.1
DSM		581.5	683.6	625.1	21.0	102.1

La obtención de ortomosaicos multiespectrales y modelos de elevación son el primer paso y más fundamental para la clasificación de las coberturas del suelo. Cada producto aporta información complementaria, siendo esencial para alimentar el modelo de aprendizaje automático con variables espectrales y estructurales del paisaje. El ortomosaico RGB, permite una interpretación visual clara de las coberturas superficiales, facilitando la validación con el conocimiento del paisaje obtenido en las salidas de campo. Las bandas Red Edge y NIR tienen una alta sensibilidad a diferencias en la vegetación, siendo determinantes para distinguir entre coberturas vegetales densas (cultivos y bosque) y suelos desnudos o construcciones. Complementario a los datos ópticos, los modelos de elevación son útiles para disminuir falsos positivos generados por sombras o cambios topográficos. La fusión de estas fuentes de información de alta resolución, permite establecer una

base robusta con la cual se continuará el desarrollo del estudio, empezando por la generación de etiquetas manuales distinguiendo las cuatro clases de coberturas predefinidas para posteriormente preparar la base de datos que será ingestada por los modelos de aprendizaje automatico.

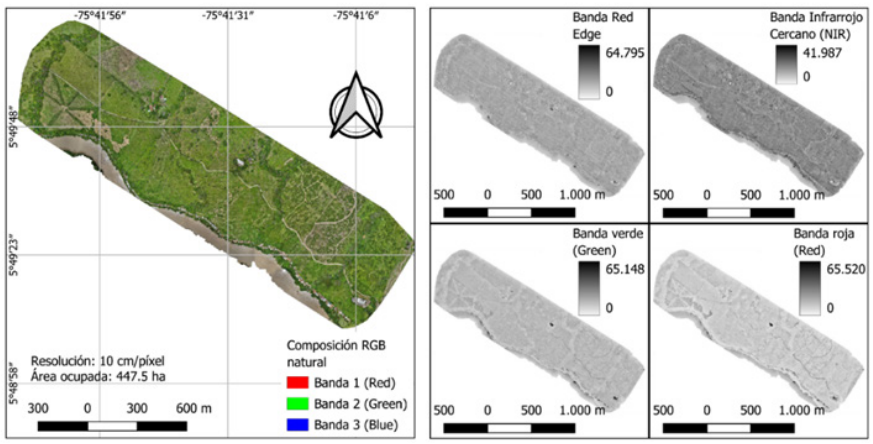


Figura 1. Ortomosaicos RGB y multiespectrales.

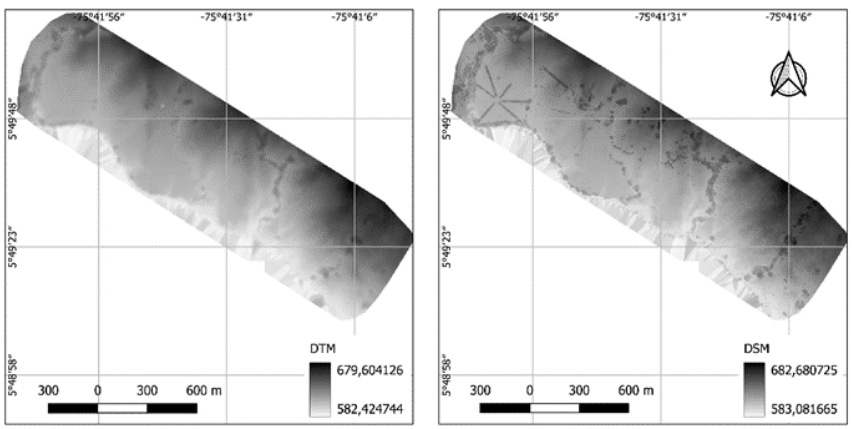


Figura 2. Mapas de elevación DTM y DSM.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se planteó una propuesta metodológica orientada a la clasificación de coberturas del suelo en un cultivo de cítricos mediante el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) y algoritmos de aprendizaje automático. El proyecto aún se encuentra en ejecución y los avances presentados corresponden a la generación de ortomosaicos multiespectrales y modelos de elevación. Estos resultados iniciales confirman el potencial de la sensórica remota y los VANT en la agricultura de precisión, al ofrecer productos de alta resolución espacial que facilitan la caracterización del terreno y permiten sentar bases sólidas para el análisis de coberturas.

Como trabajo futuro, se desarrollará el etiquetado manual de las coberturas y la implementación de los modelos de machine learning seleccionados (Random Forest, SVM y U-Net), seguido de su evaluación con métricas de desempeño y validación en campo. Esta fase permitirá determinar el modelo más eficiente en la identificación de coberturas en sistemas citrícolas.

El impacto potencial de esta propuesta radica en su aplicabilidad para optimizar el manejo agronómico, apoyar la planificación de labores y mejorar la distribución de recursos. Además, su carácter replicable abre la posibilidad de transferir la metodología a otros cultivos y regiones, contribuyendo al fortalecimiento

de la agricultura digital y al diseño de estrategias productivas más sostenibles.

REFERENCIAS

Berrío M VA, Mosquera T J, Alzate V DF (2015) Uso de drones para el analisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. 13:. https://doi.org/https://doi.org/10.24054/limentech.v13i1.1600

Bispo dos Santos GA, Conti LA (2022) Coastal land cover mapping using UAV imaging on the southeast coast of Brazil. J Coast Conserv 26:. https://doi.org/10.1007/s11852-022-00886-z

Bouguettaya A, Zarzour H, Kechida A, Taberkit AM (2022) Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: a review. Neural Comput Appl 34:9511–9536

Gebbers R, Adamchuk VI (2010) Precision agriculture and food security. Science (1979) 327:828–831

Ivanchuk N (2025) Cambio Climático En La Agricultura: Cómo Adaptarse. In: EOS Data Analytics

Khalil R, Khan MS, Hasan Y, et al (2024) Supervised NDVI Composite Thresholding for Arid Region Vegetation Mapping. Engineering, Technology and Applied Science Research 14:14420–14427. https://doi.org/10.48084/etasr.7202

Kim S, Bae SH, Kim MK, Kang LH (2023) Deep Learning Performance Comparison Using Multispectral Images and Vegetation Index for Farmland Classification. International Journal of Aeronautical and Space Sciences 24:1533–1545. https://doi.org/10.1007/s42405-023-00617-0

Rose MB, Mills M, Franklin J, Larios L (2023) Mapping Fractional Vegetation Cover Using Unoccupied Aerial Vehicle Imagery to Guide Conservation of a Rare Riparian Shrub Ecosystem in Southern California. Remote Sens (Basel) 15:. https://doi.org/10.3390/rs15215113

Vilar P, Morais TG, Rodrigues NR, et al (2020) Object-based classification approaches for multitemporal identification and monitoring of pastures in agroforestry regions using multispectral unmanned aerial vehicle products. Remote Sens (Basel) 12:. https://doi.org/10.3390/rs12050814

Yan H, Liu G, Li Z, et al (2024) SCECA U-Net Crop Classification for UAV Remote Sensing Image

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Comportamiento de tres índices de vegetación en caña de azúcar

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Behavior of three vegetation indices in sugarcane

Samir Darío Vélez Ruiz[1]*, Enrique Alejandro Torres Prieto[1], Oscar Mauricio Vélez Terranova[1], Cristian Alexis Pérez Peña[1], Marlon Esteban Bellaizac Cuero[1], José Luciano Mejía Arias[1] and Isabella Delgado Aramburo[1]

Palabras clave:
Agricultura de precisión
Análisis multitemporal
Google Earth Engine
Percepción remota
Sentinel-2

RESUMEN

El estudio analizó la dinámica temporal de tres índices de vegetación (NDVI, GNDVI y EVI) en caña de azúcar de alto rendimiento agrícola en Palmira, Valle del Cauca (Colombia), con el propósito de establecer valores de referencia para el monitoreo del cultivo. Se evaluaron 74 suertes entre 2019 y 2022 a partir de 115 escenas Sentinel-2 procesadas en Google Earth Engine, agrupadas en 13 intervalos mensuales de edad. Los resultados evidenciaron que el NDVI alcanzó valores cercanos a 0,8 entre los 6 y 8 meses, mostrando saturación en condiciones de alta biomasa. El GNDVI, menos sensible en fases iniciales, presentó mayor variabilidad en la fase de maduración, confirmando su utilidad en la estimación de biomasa previa a cosecha. El EVI mantuvo un coeficiente de variación superior al 10% durante la fase de rápido crecimiento (4–10 meses), preservando su capacidad de discriminar vigor en doseles densos. En conclusión, el NDVI es útil en fases tempranas, pero debe complementarse con el EVI en etapas avanzadas. Los valores de referencia propuestos fortalecen el monitoreo fenológico y la toma de decisiones agronómicas.

Keywords:
Precision agriculture
Multitemporal analysis
Google Earth Engine.
Remote Sensing
Sentinel-2

ABSTRACT

The study analyzed the temporal dynamics of three vegetation indices (NDVI, GNDVI, and EVI) in high-yield sugarcane fields in Palmira, Valle del Cauca (Colombia), with the aim of establishing reference values for crop monitoring. A total of 74 fields were evaluated between 2019 and 2022 using 115 Sentinel-2 scenes processed in Google Earth Engine, grouped into 13 monthly age intervals. The results showed that NDVI reached values close to 0.8 between 6 and 8 months, indicating saturation under high biomass conditions. GNDVI, less sensitive in early stages, exhibited greater variability during maturation, confirming its usefulness for biomass estimation prior to harvest. EVI maintained a coefficient of variation above 10% during the rapid growth phase (4–10 months), preserving its ability to discriminate vigor in dense canopies. In conclusion, NDVI is useful in early stages but should be complemented with EVI in advanced phases. The proposed reference values strengthen phenological monitoring and support agronomic decision-making.

[1]Semillero de investigación Agroinnovación Tecnológica para la sostenibilidad de los Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería y Administración Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
*Corresponding author: savelezr@unal.edu.co

CC BY NC SA

La sostenibilidad de los sistemas agrícolas depende de decisiones oportunas basadas en información objetiva y continua. En el Valle del Cauca, la caña de azúcar es un pilar productivo que aporta 2,6 % al PIB agrícola y genera más de 260.000 empleos (Procaña 2022). En este contexto, la percepción remota facilita la toma de decisiones mediante indicadores biofísicos y espectrales que capturan la variación espacio-temporal del cultivo.

Los índices de vegetación (IV) se derivan de las propiedades espectrales del dosel, lo que permite monitorear densidad y estado fisiológico. Sin embargo, en coberturas vegetales altas, el NDVI tiende a saturarse, perdiendo sensibilidad para distinguir variaciones de biomasa (Huete et al. 2002)

El monitoreo satelital de caña se ha realizado con MODIS, Landsat y Sentinel-2, consolidando series multitemporales para el seguimiento del desarrollo y la zonificación de manejo (García et al. 2017). Sin embargo, el uso exclusivo del NDVI resulta problemático en suertes agrícolas de alta biomasa debido a la saturación. En consecuencia, índices menos propensos a saturarse, como el GNDVI, que sustituye el rojo por el verde y es más sensible a la clorofila, y el EVI, que incorporan correcciones atmosféricas, han adquirido relevancia como indicadores alternativos en la agricultura de precisión

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El estudio se realizó en Palmira, Valle del Cauca, en dos haciendas San José (SJ) y Josepilla (JP) de cultivo intensivo caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) que abarcan 1.268 ha. El análisis, desarrollado entre 2019 y 2022, permitió un seguimiento multitemporal del crecimiento y la fenología en 74 suertes agrícolas. En este periodo, la precipitación anual varió entre 805 y 1.461 mm, según registros de la Red Meteorológica Automatizada de Cenicaña(Cenicaña 2024).

Información satelital

Se utilizaron imágenes Sentinel-2 nivel 2A (corregidas atmosféricamente). La visualización y el enmascaramiento de nubes se realizaron en Google Earth Engine (GEE), siguiendo enfoques metodológicos similares a los implementados por Luciano et al. (2021) y Das et al. (2023) en el monitoreo y la estimación de la productividad en caña de azúcar. En total, se analizaron 115 escenas satelitales, durante el período comprendido entre enero de 2019 y diciembre de 2022.

Índices de vegetación

Para garantizar el uso de píxeles puros de vegetación y evitar mezcla espectral con el suelo, se aplicó un buffer negativo de 10 m sobre los polígonos de las suertes, siguiendo un procedimiento similar al empleado por Rahman and J. Robson (2016). Se calcularon tres índices de vegetación (NDVI, GNDVI y EVI; ver Tabla 1), ampliamente usados en el monitoreo agrícola de caña de azúcar. El valor medio de cada índice por suerte se obtuvo mediante la función reduce Region en GEE.

Tabla 1. Índices de vegetación utilizados.

Índice de vegetación	Fórmula Sentinel-2	Aplicaciones en caña de azúcar
NDVI	$\frac{B8 - B4}{B8 + B4}$	(García et al. 2017; Dimov et al. 2022)
GNDVI	$\frac{B8 - B3}{B8 + B3}$	(Rahman and Robson 2020; Marques Ramos et al. 2020)
EVI	$2{,}5 * \frac{B8 - B4}{B8 + 6 * B4 - 7{,}5 * B2 + 1}$	(García et al. 2017; Luciano et al. 2021; Das et al. 2023)

B8: NIR, **B4**: Red, **B3**: Green, **B2**: Blue.

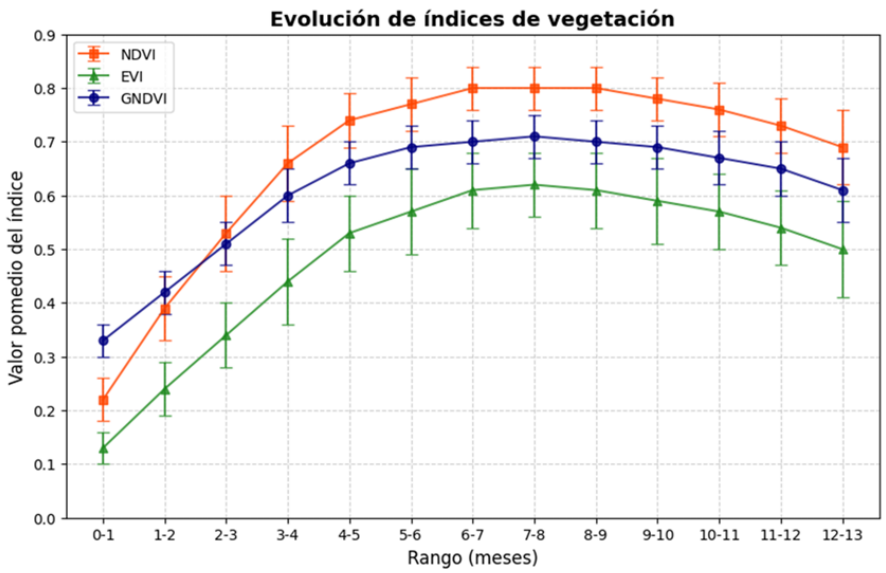
Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo multitemporal de la respuesta espectral de caña de azúcar, utilizando series mensuales de NDVI, EVI y GNDVI por suerte. Las observaciones se agruparon en 13 intervalos fenológicos (0–1 hasta 12–13 meses) y, para cada índice e intervalo, se calcularon media, desviación estándar y coeficiente de variación (CV) con el software InfoStat.

Los valores de referencia de EVI y GNDVI se definieron directamente a partir de los promedios mensuales observados y se compararon con los promedios del NDVI en los mismos intervalos. El CV se utilizó como métrica principal de sensibilidad espectral. Este procedimiento permitió representar el comportamiento multitemporal de los índices, identificar fases de crecimiento, estabilización y declive, y proponer valores de referencia para EVI y GNDVI. Solo se consideraron suertes con productividad final mayor a 100 t/ha, con datos de rendimiento suministrados por la administración de las haciendas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra que el NDVI sigue el patrón esperado de un cultivo vigoroso: incremento rápido hasta los 5 meses, máximo entre los 6 y 8 meses (0,8) y descenso gradual después de los 9 meses de edad. Esta tendencia coincide con el estudio realizado por García et al. (2017), quienes construyeron series temporales mensuales de NDVI en caña de azúcar con datos satelitales de MODIS, en las cuales el índice de vegetación se comportó de manera proporcional al desarrollo del cultivo, alcanzando sus valores máximos entre los 6 y 7 meses de edad. De manera similar, el EVI y el GNDVI aumentaron hasta el 6 meses, alcanzando sus picos entre los 7 y 8 meses (0,62 y 0,71, respectivamente).



Rango de edad (meses)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13
NDVI	0.22	0.39	0.53	0.66	0.74	0.77	0.80	0.80	0.80	0.78	0.76	0.73	0.69
GNDVI	0.33	0.42	0.51	0.60	0.66	0.69	0.70	0.71	0.70	0.69	0.67	0.65	0.61
EVI	0.13	0.24	0.34	0.44	0.53	0.57	0.61	0.62	0.61	0.59	0.57	0.54	0.50

Figura 1. Evolución temporal de los índices de vegetación.

Al analizar el coeficiente de variación (CV) como indicador de sensibilidad espectral (ver Figura 2), se observa una estabilización con baja variabilidad del NDVI, donde el CV desciende de 18,71% a aproximadamente 5% entre los 6 y 10 meses de edad lo que evidencia su saturación en doseles densos, tal como reporta Vasconcelos et al. (2023).

Estos resultados indican que, en la fase de rápido crecimiento (4–10 meses), el NDVI pierde sensibilidad

y requiere ser complementado con el EVI, más adecuado para monitorear cultivos cerrados al conservar su sensibilidad espectral (García et al. 2017; de Oliveira Maia et al. 2023). En este estudio, las medias mensuales de EVI y GNDVI constituyen valores de referencia útiles para apoyar el NDVI en el monitoreo de caña de azúcar en etapas avanzadas (ver Figura 1).

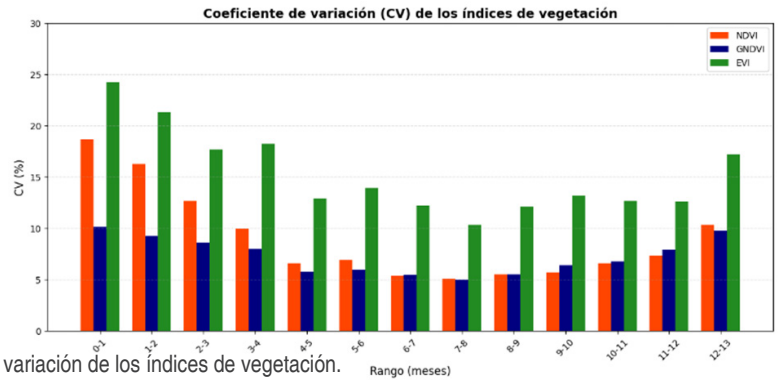


Figura 2. Coeficiente de variación de los índices de vegetación.

CONCLUSIÓN

Los resultados confirman la saturación espectral del NDVI en etapas avanzadas del cultivo de caña de azúcar, perdiendo así capacidad discriminante frente a diferencias de vigor. En ese contexto, el EVI se posiciona como el índice principal para el seguimiento del cultivo en fases de alta cobertura, al distinguir variaciones de crecimiento y estrés. Por otro lado, durante la etapa de maduración, el GNDVI puede usarse como complemento al NDVI en el monitoreo del cultivo.

Los valores de referencia para el EVI y GNDVI permiten complementar la interpretación operativa del NDVI, fortaleciendo el monitoreo del cultivo de caña de azúcar y la toma de decisiones agronómicas.

REFERENCIAS

Cenicaña (2024) Consultas en línea a la base de datos de la RMA. In: Meteoportal. https://www.cenicana.org/apps/meteoportal/public/informacion_diaria. Accessed 12 Mar 2025

Das A, Kumar M, Kushwaha A, et al (2023) Machine learning model ensemble for predicting sugarcane yield through synergy of optical and SAR remote sensing. Remote Sens Appl 30:100962. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100962

de Oliveira Maia FC, Bufon VB, Leão TP (2023) Vegetation indices as a Tool for Mapping Sugarcane Management Zones. Precis Agric 24:213–234. https://doi.org/10.1007/s11119-022-09939-7

Dimov D, Uhl JH, Löw F, Seboka GN (2022) Sugarcane yield estimation through remote sensing time series and phenology metrics. Smart Agricultural Technology 2:100046. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100046

García CE, Montero D, Soto MA, Valencia JM (2017) Estimación de productividad en caña de azúcar desde la percepción remota. Análisis Geográficos 53:35–49

Huete A, Didan K, Miura T, et al (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sens Environ 83:195–213. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2

Luciano AC dos S, Picoli MCA, Duft DG, et al (2021) Empirical model for forecasting sugarcane yield on a local scale in Brazil using Landsat imagery and random forest algorithm. Comput Electron Agric 184:106063. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106063

Marques Ramos AP, Prado Osco L, Elis Garcia Furuya D, et al (2020) A random forest ranking approach to predict yield in maize with uav-based vegetation spectral indices. Comput Electron Agric 178:105791. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105791

Procaña (2022) Contribución de la Agroindustria de la caña de azúcar en nuestra región. In: Procaña. https://procana.org/site/contribucion-de-la-agroindustria-de-la-cana-de-azucar-en-nuestra-region/. Accessed 14 Apr 2025

Rahman MM, J. Robson A (2016) A Novel Approach for Sugarcane Yield Prediction Using Landsat Time Series Imagery: A Case Study on Bundaberg Region. Advances in Remote Sensing 05:93–102. https://doi.org/10.4236/ars.2016.52008

Rahman MM, Robson A (2020) Integrating Landsat-8 and Sentinel-2 Time Series Data for Yield Prediction of Sugarcane Crops at the Block Level. Remote Sens (Basel) 12:1313. https://doi.org/10.3390/rs12081313

Vasconcelos JCS, Speranza EA, Antunes JFG, et al (2023) Development and Validation of a Model Based on Vegetation Indices for the Prediction of Sugarcane Yield. AgriEngineering 5:698–719. https://doi.org/10.3390/agriengineering5020044

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Detección de anomalías en cultivo de arroz usando aprendizaje profundo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Rice crop anomaly detection using deep learning

Dayra Yisel García Ramírez[1], Diana Katherine Rodríguez Ochoa[1], Humberto Ariza Naranjo[1], Orley Andrés Salas[2], Andrés-F Jiménez López[3] and Fabián-R Jiménez López[4]

RESUMEN

Palabras clave:
Agricultura digital
Oryza sativa L
Pyricularia
Redes neuronales convolucionales
Rhynchosporium

Este estudio tuvo como propósito comparar modelos de aprendizaje profundo para la detección de anomalías en cultivos de arroz, con el fin de contribuir a la agricultura de precisión y a la gestión temprana de problemas fitosanitarios. Para ello, se construyó un banco de imágenes capturadas con dron y dispositivos móviles en cultivo de arroz, las cuales fueron procesadas y etiquetadas para entrenar redes neuronales convolucionales-RNC. Se compararon arquitecturas como ResNet50, EfficientNet y MobileNet, evaluando su desempeño mediante métricas de precisión, exhaustividad y F1-score. Los resultados muestran que el modelo basado en ResNet50 alcanzó una precisión del 78,47%, superando a las demás configuraciones en la identificación de patrones asociados a enfermedades y estrés por aplicación de herbicidas. La implementación de este tipo de sistemas puede reducir tiempos de diagnóstico y optimizar la aplicación de insumos. La aplicación de técnicas de visión por computadora y aprendizaje profundo constituye una herramienta prometedora para fortalecer la agricultura digital, facilitando la toma de decisiones informadas en el manejo del cultivo.

ABSTRACT

Keywords:
Digital agriculture,
Oryza sativa L
Pyricularia
Convolutional neural networks
Rhynchosporium

The purpose of this study was to compare deep learning models for anomaly detection in rice crops, with the goal of contributing to precision agriculture and the early management of phytosanitary problems. To this end, a database of images captured by drones and mobile devices in rice crops was built, which were processed and labeled to train convolutional neural networks. Architectures such as ResNet50, EfficientNet, and MobileNet were compared, evaluating their performance using precision, recall, and F1-score metrics. The results show that the ResNet50-based model achieved an accuracy of 78,47%, outperforming the other configurations in identifying patterns associated with diseases and stress from herbicide application. The implementation of this type of system can reduce diagnosis times and optimize input application. The application of computer vision and deep learning techniques constitutes a promising tool to strengthen digital agriculture, facilitating informed decision-making in crop management.

[1] Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Agrotecnologías, sostenibilidad y Sistemas Forestales-DIGITAL-FAS, FarmTechnology, Universidad de los Llanos, Colombia. dgarcia@unillanos.edu.co; diana.rodriguez.ochoa@unillanos.edu.co; humberto.ariza@unillanos.edu.co
[2]Ingeniero Agrónomo. Fedearroz - Agrosavia, Colombia, orley.salas@unillanos.edu.co
[3]Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Macrypt, FarmTechnology, Universidad de los Llanos.Colombia. ajimenez@unillanos.edu.co.
[4]Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. fabian.jimenez02@uptc.edu.co.

CC BY NC SA

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cereales de mayor relevancia a nivel mundial, al ser alimento básico de más de la mitad de la población del planeta y constituir un pilar fundamental en la seguridad alimentaria global (Hervert-Hernández, 2022). No obstante, su productividad enfrenta limitaciones derivadas de múltiples factores bióticos y abióticos, que ocasionan pérdidas significativas en el rendimiento y en la calidad del grano (Shah et al., 2024). La detección temprana y precisa de estas anomalías resulta determinante para establecer medidas de manejo oportunas.

Tradicionalmente, el monitoreo fitosanitario del arroz ha dependido de inspecciones manuales en campo, las cuales requieren experiencia técnica especializada, tiempo y recursos. Frente a este desafío, ha surgido un creciente interés en aplicar herramientas de agricultura digital y tecnologías emergentes para optimizar la gestión agronómica (Simhadri et. al., 2023).

Los algoritmos de aprendizaje profundo, en especial, las RNC, han mostrado un alto desempeño en tareas de clasificación y reconocimiento de patrones visuales en diferentes áreas de la agricultura de precisión (Wang et al., 2025; Zhou et al., 2019). Sin embargo, la aplicación de estas metodologías en arroz aún presenta desafíos, relacionados con la visibilidad de los síntomas de enfermedades, los diferentes estadios fenológicos y la disponibilidad de bases de datos suficientemente robustas y representativas.

En este marco, la hipótesis de este estudio sostiene que la implementación de modelos de aprendizaje profundo puede mejorar la detección de anomalías en el cultivo de arroz, superando las limitaciones de los métodos tradicionales de monitoreo. En ese sentido el objetivo es evaluar modelo basado en RNC para identificar anomalías asociadas a factores bióticos y abióticos en arroz. Este trabajo busca contribuir al fortalecimiento de la agricultura digital.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en parcelas experimentales de arroz (*Oryza sativa* L.) localizadas en la vereda Santa Rosa, Villavicencio, Meta. La adquisición de imágenes se realizó de forma no ortogonal mediante un dron DJI Flip equipado con cámara RGB de 12 MP, a una altura de 2 m, las cuales se etiquetaron de forma manual y mediante dispositivos móviles con cámara RGB, a través de la aplicación Cybertracker, que permitió el etiquetado al momento de la captura. La clasificación de anomalías fue, piricularia (200 imágenes), escaldado (92 imágenes) y estrés por herbicida (20 imágenes).

Posteriormente, la base de imágenes se procesó en Python para convertirlas a un tamaño de 250x250 píxeles y se realizó aumentación de datos quedando una base de 712 imágenes por cada clase. Con estas imágenes se entrenaron y validaron modelos de aprendizaje profundo basados en redes neuronales convolucionales, utilizando arquitecturas previamente reportadas en la literatura (ResNet50, MobileNet y EfficientNet), 46 épocas, con algoritmo de early stopping paciencia=5, métrica=val_loss. Los modelos se corrieron en una workstation Dell con procesador Intel Core ultra 9 285k, con 64 GB de RAM y 2TB de disco duro. Para el entrenamiento se empleó el 70% de las imágenes, y el restante 15% para validación y 15% para prueba. El desempeño de los modelos se evaluó mediante métricas de precisión, exhaustividad, F1-score y la matriz de confusión. Los análisis se realizaron con el software de código abierto TensorFlow en Python 3.8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se generó una base de imágenes a partir de las capturas realizadas en los lotes de cultivo de arroz la cual se aumentó por rotación, espejo y corrimiento, quedando un total de 712 imágenes por clase. Teniendo como resultado un primer conjunto de datos estructurado y confiable.



Figura 1. Imágenes de las clases estudiadas. Fuente: Autores

El entrenamiento de los modelos de aprendizaje profundo permitió establecer diferencias en el desempeño de las arquitecturas evaluadas (Tabla 1), Las métricas por clase se relacionan en la (Tabla 2). El modelo ResNet50 obtuvo los mejores resultados con una precisión del 78,47%, un F1-score de 0,779 y una exhaustividad de 77,6%, superando a los otros dos modelos. Estos hallazgos coinciden con estudios donde arquitecturas optimizadas en parámetros demostraron mejor rendimiento en la clasificación de imágenes agrícolas (Zhou et al., 2019).

Tabla 1. Desempeño de los modelos de aprendizaje profundo en la detección de anomalías en arroz.

Modelo	Precisión (%)	Recall (%)	F1-score
ResNet50	78,47	77,60	0,7779
MobileNet	72,93	72.77	0,7266
EfficientNet	76,22	76,46	0,7629

Fuente: Autores.

Tabla 2. Métricas por clase.

	ResNet50			MobileNet			EfficientNet		
Clase	**Precisión (%)**	**Recall (%)**	**F1-score**	**Precisión (%)**	**Recall (%)**	**F1-score**	**Precisión (%)**	**Recall (%)**	**F1-score**
Escaldado	80,4	73,6	0,77	70,9	81,4	0,76	0,77	0,81	0,79
Herbicida	88,0	81,0	0,84	81,2	75,0	0,78	0,78	0,80	0,79
Piricularia	66,9	78,2	0,72	66,7	61,9	0,64	0,74	0,69	0,71

Fuente: Autores.

En términos de clasificación, en el modelo ResNet50, la matriz de confusión muestra los valores normalizados de escaldado 0,74, herbicida 0,81 y piricularia 0,78. Al encontrarse por encima de 0,7 se puede inferir que es un resultado preliminar aceptable. Para mejorar los resultados se puede seguir aumentando la diversidad del banco de imágenes para robustecer el entrenamiento de los modelos.

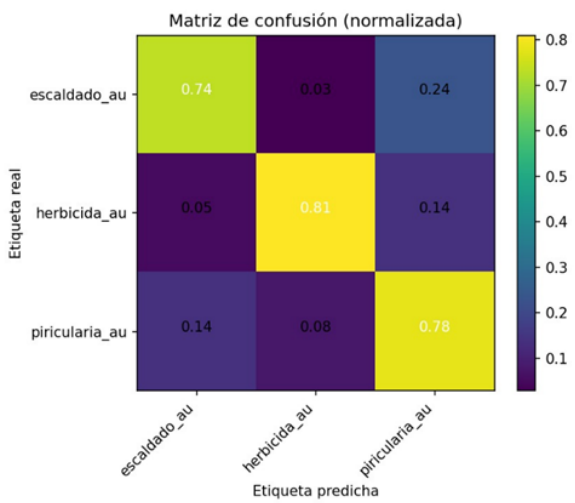


Figura 2. Matriz de Confusión de ResNet50. Fuente: Autores.

Adicional a las imágenes RGB se podrían implementar imágenes multiespectrales, especialmente para diferenciar estrés o deficiencias nutricionales, lo cual sugiere que la integración de múltiples fuentes de datos puede mejorar la capacidad de los algoritmos (Zhang et al., 2018).

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que el uso de redes neuronales convolucionales constituye una herramienta potencial para la detección y clasificación de anomalías en el cultivo de arroz, alcanzando una precisión global del 78,47%.

Los modelos de aprendizaje profundo, constituye una estrategia prometedora para el monitoreo temprano de problemáticas sanitarias de cultivos. Sin embargo, se reconoce la necesidad de ampliar la base de datos con imágenes, así como explorar arquitecturas de modelos más robustas que mejoren la precisión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de los Llanos por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de esta investigación. Se reconoce el aporte de Fedearroz, quienes permitieron el acceso a sus cultivos para la toma de imágenes y observaciones de campo. Finalmente, los autores declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Hervert-Hernández, D. (2022). El papel de los cereales en la nutrición y en la salud en el marco de una alimentación sostenible. Nutrición Hospitalaria, 39(SPE3), 52-55. DOI: 0.20960/nh.04312

Shah, S. R., Shah, S. M. W., Bibi, H., & Baig, M. M. (2024). Early Detection of Rice Leaf Blast Disease using Deep-Learning Techniques. International Journal of Computer Science & Network Security, 211-221.

Simhadri, C. G., & Kondaveeti, H. K. (2023). Automatic recognition of rice leaf diseases using transfer learning. Agronomy, 13(4), 961. DOI: 10.3390/agronomy13040961

Wang, S., Xu, D., Liang, H., B, Y., Li, X., Zhou, J., Su, C., Wei., Y. 2025. Advances in Deep Learning Applications for Plant Disease and Pest Detection: A Review. Remote Sensing. 17, 698-728. DOI: 10.3390/rs17040698

Zhang, D., Zhou, X., Zhang, J., Lan, Y., Xu, C., & Liang, D. (2018). Detection of rice sheath blight using an unmanned aerial system with high-resolution color and multispectral imaging. PloS one, 13(5), e0187470. DOI:10.1371/journal.pone.0187470

Zhou, G., Zhang, W., Chen, A., He, M., & Ma, X. (2019). Rapid detection of rice disease based on FCM-KM and faster R-CNN fusion. IEEE access, 7, 143190-143206 DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2943454

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Estimación de características morfológicas del cilantro con espectroscopía óptica *in situ*

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimation of morphological characteristics of cilantro using *in situ* optical spectroscopy

Sol Angie Arenas[1]*, Shary Vera[1], Fabián Mendoza[1], Laurie Morales[1] and Aldemar Reyes[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Espectroscopia de reflectancia
Firmas espectrales
Regresión PLS
VIS-NIR

La espectroscopía óptica de reflectancia permite obtener información sobre las propiedades biofísicas y bioquímicas de los cultivos. Este estudio evaluó firmas espectrales obtenidas con un micro-espectrómetro para estimar altura y área foliar del cilantro. Se registraron mediciones espectrales a 10 cm sobre el dosel empleando un adaptador óptico de 8°. La altura de las plantas se midió directamente en campo con cinta métrica desde la base del tallo hasta el ápice, mientras que el área foliar se estimó mediante análisis de imágenes en el software ImageJ a partir de fotografías con referencia métrica. Con estos datos se desarrollaron modelos Partial Least Squares (PLS) con validación Leave-One-Out (LOO). Los resultados evidenciaron correlaciones significativas en el rango VIS-NIR (700–822 nm), destacando un pico en ~750 nm.os modelos para altura (RPD=4,5) y área (RPD = 3,06) presentaron buen desempeño en el entrenamiento, pero su capacidad predictiva disminuyó en validación externa ($R^2 \leq 0{,}25$). Estos hallazgos confirman el potencial de los sensores ópticos para estimar características morfológicas en cilantro, aunque resaltan la necesidad de ampliar la base de datos y considerar variabilidad fenológica para mejorar la robustez del modelo.

ABSTRACT

Keywords:
Reflectance spectroscopy
spectral signatures
PLS regression
NIR

Optical reflectance spectroscopy provides non-destructive information on the biophysical and biochemical properties of crops. This study evaluated spectral signatures obtained with a portable micro-spectrometer to estimate plant height and leaf area of cilantro. Spectral measurements were taken at 10 cm above the canopy using an 8° optical adapter. Plant height was measured directly in the field with a measuring tape from the stem base to the apex, while leaf area was estimated through image analysis in ImageJ software using photographs with metric reference. Based on these data, Partial Least Squares (PLS) regression models with Leave-One-Out (LOO) cross-validation were developed. Results showed significant correlations in the VIS–NIR range (700–822 nm), with a prominent peak at ~750 nm. Models for height (RPD = 4.5) and leaf area (RPD=3.06) performed well during training, but predictive ability decreased in external validation ($R^2 \leq 0.25$). These findings confirm the potential of optical sensors to estimate morphological traits in cilantro, while highlighting the need to expand the database and incorporate phenological variability to improve model robustness.

[1]Estudiantes Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
[2]Docente, Escuela de Ingeniería de los Recursos Hídricos y del Ambiente, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
*Corresponding author: sol.arenas@correounivalle.edu.co

CC BY NC SA

La agricultura de precisión requiere herramientas de monitoreo rápido y no destructivo que permitan estimar variables agronómicas con precisión. Entre ellas, la espectroscopía óptica de reflectancia mide la radiación reflejada por el dosel en diferentes longitudes de onda, siendo sensible a cambios fisiológicos y estructurales en las plantas (Valero Ubierna, 2020). En cultivos de hoja como el cilantro (*Coriandrum sativum* L.), de ciclo corto y alta demanda comercial, resulta estratégico contar con métodos que relacionan la señal espectral con parámetros morfológicos clave como la altura y el área foliar, los cuales influyen directamente en la productividad y el momento óptimo de cosecha. Bajo este contexto, se planteó la necesidad de evaluar la relación entre la reflectancia espectral a escala de dosel y variables morfológicas del cilantro, con el propósito de generar modelos predictivos mediante regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS). Este estudio busca aportar al desarrollo de herramientas de agricultura digital aplicadas a hortalizas de ciclo corto, que permitan estimar características morfológicas de forma rápida y no destructiva, en este caso asociadas a la producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en la estación experimental del Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas de la Universidad del Valle, sede Meléndez, ubicada en Santiago de Cali, Colombia (3°22′30″ N, 76°32′04″ O), a una altitud de 990 metros sobre el nivel del mar. La zona de estudio presenta una temperatura media anual de 24 °C, una precipitación promedio de 1.400 mm y suelos de textura franco arcillosa a arcillosa. El cultivo establecido fue de cilantro, dispuesto en dos surcos de 0,7 metros de ancho por 18 metros de longitud, con una densidad de siembra de 0,2 metros entre plantas y 0,7 metros entre surcos. En cada surco se seleccionaron cinco plantas representativas (diez plantas en total), y sobre ellas se realizaron cinco campañas de medición en campo a lo largo del ciclo fenológico, desde la emergencia hasta la etapa final previa a la cosecha. Dichas mediciones se realizaron con un micro-espectrómetro STS-VIS-NIR (Ocean Optics), con un rango de medición de 336 a 822 nm y un campo de visión de 8°. Las lecturas se realizaron a 10 cm sobre el dosel, con un ángulo solar de aproximadamente 45°, y se registraron en el software OceanView. Posterior a cada medición espectral, se evaluaron dos variables morfológicas: la altura de la planta, que se midió desde la base hasta el ápice, y el área foliar, determinada mediante fotografías digitales con referencia métrica procesadas posteriormente en el software ImageJ para la estimación de la superficie foliar.

El análisis de los datos incluyó la aplicación de correlaciones de Pearson entre las variables morfológicas y las bandas espectrales, así como la construcción de modelos de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS). Estos modelos fueron sometidos a dos esquemas de validación: en primer lugar, se aplicó el método de validación cruzada *leave-one-out* (LOO), y en segundo lugar se entrenaron modelos con los datos correspondientes a las cuatro primeras campañas, que representaron las etapas iniciales e intermedias del desarrollo del cultivo, validando posteriormente con los datos de la última campaña que correspondió a la fase final antes de la cosecha. Para la evaluación del desempeño se emplearon como métricas el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio de predicción (RMSEP), la razón de desempeño del desvío (RPD) y el índice de importancia de las variables (VIP).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo vegetativo y respuesta espectral del cilantro

Los promedios de área foliar (0,118±0,062 m^2) y altura (34,9±4,72 cm) en la última evaluación (63 días después de la siembra (DDS)) alcanzaron condiciones óptimas para la cosecha, similares a lo reportado por Paunero (2021). En cuanto a la respuesta espectral promedio por campaña, se observó un incremento progresivo de la reflectancia a lo largo del ciclo, asociado con la influencia de la estructura del dosel en la señal espectral (Kuester et al., 2018). Por otro lado, en la meseta del NIR (750-770 nm), se evidencia un pico evidente en 195 firmas espectrales individuales de las campanas 2 a 5. De acuerdo con Li et al. (2020), este fenómeno óptico es asociado a la fluorescencia inducida por la radiación solar (SIF), que se emite entre 650–800 nm, donde al alinearse con la banda O_2–A (760 nm), genera un valle espectral que la emisión de SIF rellena, lo que se observa como un pico en la firma espectral.

Relaciones espectrales y variables morfológicas

El análisis de correlación de Pearson mostró que las mayores correlaciones positivas se presentaron en el NIR: para el área foliar en 768 nm (r=0,54) y para la altura en 762 nm (r=0,52). Estos resultados se consideraron coherentes con la alta sensibilidad de esta región a la biomasa y la estructura del dosel (Lebourgeois et al., 2012), asociada a la interacción de la radiación NIR con los componentes estructurales de las hojas y tejidos vegetales (Ramalho de Oliveira et al., 2020).

Desempeño del modelo PLS

El análisis de componentes principales redujo la dimensionalidad a 38 componentes latentes para cada variable. A partir de estos, se determinó el número óptimo de componentes para el modelo, siendo 10 para el área foliar y 11 para la altura. Las métricas del modelo PLS reportaron valores de RPD que, conforme a los criterios propuestos por Wang et al. (2013; como se cita en Reyes-Trujillo et al., 2021), indicaron un buen desempeño del modelo.

De la misma manera, el análisis VIP mostró que 265 longitudes de onda superaron el umbral de uno para el área foliar, concentrándose en 700 y 822 nm (NIR), asociadas a superficie foliar y estructura del dosel. En la altura, 338 longitudes de onda con VIP>1 se distribuyeron en 450–500 nm (azul-verde) y 700–822 nm (NIR), reflejando tanto rasgos fisiológicos como estructurales. En ambas variables destacó un pico en ~750 nm, zona de transición borde rojo–NIR, reportada como clave para estimar parámetros como el leaf area index (LAI) y área foliar (Reyes-Trujillo et al., 2021).

Validación del modelo PLS

En el conjunto de entrenamiento, se evidencia un alto desempeño (R^2=0,891, RMSEP=0,011 m^2 para área foliar y R^2=0,949, RMSEP=2,226 cm para altura). No obstante, en la validación, con un modelo reducido (VIP $\geq$ 1), el rendimiento descendió (R^2=0,25 y 0,024, respectivamente), debido a la reducción del número de variables predictoras, diferencias fenológicas entre calibración y validación, baja variabilidad en las muestras y el reducido tamaño del conjunto de prueba (N=10) (Brereton, 2006; Abdi, 2010). El menor ajuste en altura se atribuyó a su dependencia de procesos fisiológicos más complejos, menos captados por la reflectancia.

CONCLUSIÓN

La espectroscopía óptica demostró potencial para estimar altura y área foliar en cilantro, con correlaciones significativas en el rango NIR (700–822 nm) y un pico en ~750 nm. La identificación de estas longitudes de onda representa un avance hacia el diseño de índices específicos para cilantro. Los modelos PLS presentaron buen desempeño en entrenamiento (RPD=4,5 para altura; 3,06 para área foliar). Se recomienda ampliar los datos y la variabilidad fenológica para robustecer los modelos y consolidar el uso de sensores ópticos en la agricultura de precisión de hortalizas de ciclo corto.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Valle por el apoyo institucional y por propiciar espacios académicos que favorezcan la investigación y el intercambio de saberes.

REFERENCIAS

Abdi, H. (2010). Partial least squares regression and projection on latent structure regression (PLS Regression). Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2(1), 97–106. https://doi.org/10.1002/wics.51

Brereton, R. G. (2006). Consequences of sample size, variable selection, and model validation and optimisation, for predicting classification ability from analytical data. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *25*(11), 1103–1111. https://doi.org/10.1016/j.trac.2006.10.005

Kuester, T., & Spengler, D. (2018). Structural and Spectral Analysis of Cereal Canopy Reflectance and Reflectance Anisotropy. *Remote Sensing, 10*(11), 1767. https://doi.org/10.3390/rs10111767.

Li, Z., Zhang, Q., Li, J., Yang, X., Wu, Y., Zhang, Z., ... & Zhang, Y. (2020). Solar-induced chlorophyll fluorescence and its link to canopy photosynthesis in maize from continuous ground measurements. Remote Sensing of Environment, 236, 111420. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111420.

Ramalho de Oliveira, L. F., & Santana, R. C. (2020). Estimation of leaf nutrient concentration from hyperspectral reflectance in Eucalyptus using partial least squares regression. *Scientia Agricola, 77*(6), e20180409. https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0409.

Paunero, I. E. (2021). Cultivation of coriander in greenhouses for fresh consumption in San Pedro, Buenos Aires, Argentina. *Horticultura Argentina, 40*(103), 7-13. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20210438777.

Reyes-Trujillo, A., Daza-Torres, M. C., Galindez-Jamioy, C. A., Rosero-García, E. E., Muñoz-Arboleda, F., & Solarte-Rodriguez, E. (2021). Estimating canopy nitrogen concentration of sugarcane crop using in situ spectroscopy. *Heliyon, 7*(3), e06566. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06566.

Valero Ubierna, C. (5 de diciembre de 2020). *Los sensores ópticos en la agricultura digital*. Plataforma Tierra. https://www.plataformatierra.es/innovacion/los-sensores-opticos-en-la-agricultura-digital

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Determinación de la pérdida foliar inducida por cosecha mecanizada en cafetales con LiDAR aerotransportado: estimación del índice de área foliar mediante la ley de Beer–Lambert

Determination of leaf loss induced by mechanized harvesting in coffee fields with airborne LiDAR: Estimation of the leaf area index using the Beer–Lambert law

Santiago Velásquez Rubio[1], Gabriel Araújo e Silva Ferraz[1], Rafael de Oliveira Faria[1], Lucas Santos Santana[2] and Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz[1]

Palabras clave:
Cosecha mecanizada de café
Defoliación postcosecha
Índice de Área Foliar (IAF)
Ley de Beer–Lambert
LiDAR aerotransportado

RESUMEN

La agricultura de precisión, mediante sensores remotos como los RPA (Remotely Piloted Aircraft). y LiDAR, ofrece herramientas, que permiten evaluar cambios estructurales en cafetales. Este estudio cuantifica la defoliación inducida por la cosecha mecanizada en cafetales mediante el Índice de Área Foliar (IAF) estimado con la ley de Beer–Lambert a partir de la fracción de huecos derivada de LiDAR aerotransportado. Se realizaron vuelos precosecha (PRE) y postcosecha (POS), normalización por Modelo Digital de Terreno (MDT) y conteo de primeros retornos e interceptados para calcular la fracción de huecos y convertirlo a IAF; se generó un mapa de clasificación de defoliación y el porcentaje global de pérdida. Los resultados muestran una caída del IAF global de 1.976 a 1.790 (–9,4%), con focos >30% co-localizados con mayor pendiente y un descenso concordante de retornos de copa (1,27 a 1,24 millones; 438,71 a 431,35 pts·m-²). Concluimos que el enfoque captura con sensibilidad cambios estructurales del dosel y permite priorizar áreas de mayor impacto.

Keywords:
Mechanized coffee harvesting
Post-harvest defoliation
Leaf Area Index (LAI)
Beer–Lambert law
Airborne LiDAR

ABSTRACT

Precision agriculture, through remote sensors such as UAVs and LiDAR, provides tools to assess structural changes in coffee plantations. This study quantifies defoliation induced by mechanized harvesting in coffee fields using the Leaf Area Index (LAI) estimated with Beer–Lambert's law from the gap fraction derived from airborne LiDAR. Pre-harvest (PRE) and post-harvest (POS) flights were carried out, along with Digital Terrain Model (DTM) normalization and counting of first and intercepted returns to calculate the gap fraction and convert it to LAI; a defoliation classification map and the global percentage of loss were generated. Results show a decrease in global LAI from 1.976 to 1.790 (–9.4%), with hotspots >30% co-located with steeper slopes and a concordant decline in canopy returns (1.27 to 1.24 million; 438.71 to 431.35 pts·m-²). We conclude that this approach sensitively captures canopy structural changes and allows prioritization of areas with greater impact.

[1]Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Brasil: santiago.rubio@estudante.ufla.br; Gabriel.ferraz@ufla.br; Rafael.faria@ufla.br; Patricia.ferraz@ufla.br
[2]Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil. santana.santos@ufvjm.edu.br

CC BY NC SA

La cosecha mecanizada de café (*Coffea arabica* L.) modifica la estructura del dosel y plantea la necesidad de indicadores cuantitativos, entre ellos el IAF, clave para el intercambio de energía, agua y carbono (dos Santos et al., 2020). La base teórica para estimarlo indirectamente es la ley de Beer–Lambert, que vincula la transmitancia (o fracción de huecos) con el IAF mediante una atenuación exponencial condicionada por la geometría de observación y el factor de proyección foliar. Wang et al., (2020) en su estudio de revisión indican que el IAF se estima indirectamente desde el gap fraction o fracción de huecos, aplicando la ley de Beer–Lambert como base teórica. Qu et al., (2020) destacan el uso de un modelo físico basado en Beer–Lambert para estimar IAF directamente desde datos LiDAR discretos, sin necesidad de calibración empírica. En cafetales, el IAF se usa como descriptor del vigor y la cobertura, y su seguimiento apoya el manejo agronómico (Castro-Pacheco et al., 2024). El objetivo del presente proyecto es estimar el IAF precosecha (PRE) y postcosecha (POS) con Beer–Lambert a partir de LiDAR, cuantificar el porcentaje de defoliación y cartografiar sus clases, complementándolo con métricas de la nube de puntos para contextualizar los cambios estructurales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Hacienda Bom Jardim (Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, Brasil; 21°01'20.1" S, 44°55'12.2" O) (Figura 1). La plantación corresponde a café Catucaí Vermelho 785-15 Procafé, con 10 años de establecimiento, área ~0,3 ha y altitud media de 968 m s.n.m. El terreno presenta pendiente >15%. Los cafetos están dispuestos con espaciamiento de 3,5 m entre hileras y 0,5 m entre plantas. La cosecha se efectuó con cosechadora TDI Electron 2003.

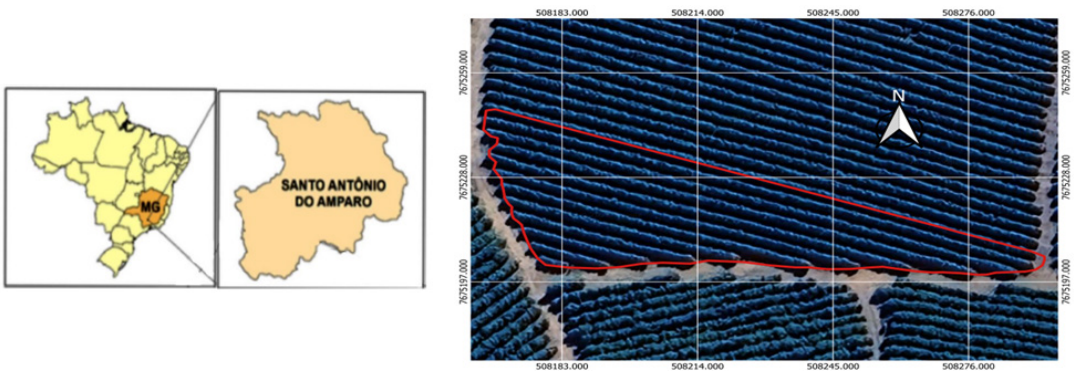


Figura 1. Mapa de la zona de estudio.

La adquisición LiDAR se realizó el 19 de mayo de 2023 mediante dos vuelos (precosecha y poscosecha) separados por aproximadamente dos horas, empleando un RPA DJI Matrice 300 RTK con sensor Zenmuse L1. El sensor operó a 160 kHz, con campo de visión de 70,4° (horizontal) × 4,5° (vertical), patrón de escaneo repetitivo y hasta tres retornos por pulso. Los vuelos se realizaron a una altura 75 metros y con velocidad de 8,3 m/s. El procesamiento se efectuó en R 4.5.1 mediante lidR, utilizando dos nubes de LiDAR aerotransportado (LAS/LAZ) de retornos discretos. Cada nube se recortó al polígono de estudio (shapefile), se aplicó filtrado de ruido y se clasificó el suelo con el algoritmo CSF utilizando como parámetros una resolución de 0,5 m, 500 repeticiones como iteración máxima y un umbral de clasificación de 0,3 m. Se generaron el MDT y el MDS para obtener el CHM = MDS – MDT, representando altura de copa sobre el suelo; para centrar el análisis en la copa, se retuvieron retornos con CHM $\geq$ 0,20 m. Finalmente, El análisis se efectuó en una grilla regular de 0,25 m en un CRS proyectado (EPSG: 31983), común para PRE y POS, construida a partir de la intersección de extensiones y un template único (misma resolución, origen y orientación). En cada celda se determinó lo valores de N (primeros retornos), Ncopa (primeros retornos con Z $\geq$ 0,30 m) y el promedio del ángulo cenital.

Primeramente, se determinaron las variables de entrada para determinar el IAF en PRE y POS, basándose en la ley de Beer–Lambert, el cual modela la transmitancia a lo largo de un trayecto en un medio absorbente/dispersor. En este caso, la transmitancia se interpreta

como la probabilidad de que un rayo de luz (o un pulso LiDAR) pase a través del follaje sin ser interceptado por hojas (P_{huecos}) (Qu et al., 2020). Si casi todos los primeros retornos pegan en copa, P_{huecos} es bajo (dosel denso); si muchos alcanzan el suelo, P_{huecos} es alto (dosel abierto). Se estimó utilizando la ecuación 1.

$$P_{huecos} = 1 - \frac{N_{copa}}{N} \quad (1)$$

Donde; P_{huecos}: Probabilidad de huecos, N_{copa}: Número de primeros retornos interceptados por copa, N: Número de primeros retornos.

Otra variable es el coeficiente k(θ), que es el coeficiente de extinción direccional del dosel, que traduce cómo la geometría de observación y la orientación de las hojas que convierten la transmitancia (P_{huecos}) en IAF. El coeficiente se expresa con la ecuación 2.

$$k(\theta) = \frac{G(\theta)}{\cos\theta} \quad (2)$$

Donde; k(θ): Coeficiente de extinción direccional del dosel, G(θ): Factor de proyección foliar (para orientación aleatoria se adopta G(θ) = 0,5), θ: Ángulo cenital de observación del rayo láser. Para cada celda de 0,25 m se calculó θ como el promedio de los valores de ScanAngle/ScanAngleRank de los pulsos que inciden en ella. Se eligió θ por celda porque reduce sesgos espaciales debidos a variaciones de geometría (p. ej., bordes del swath) frente a un θ único promedio.

Con los valores de P_{huecos} y k(θ), se estimó el IAF para cada escáner, utilizando la ecuación 3.

$$IAF = -\frac{\ln(P_{huecos})}{k(\theta)} \quad (3)$$

Donde; P_{huecos}: Probabilidad de huecos, k(θ): Coeficiente de extinción direccional del dosel.

El porcentaje de pérdida total se calculó utilizando la ecuación 4.

$$\%Perdida\ total = \frac{\sum(IAF_{PRE} - IAF_{PQS})}{\sum(IAF_{PRE})} * 100 \quad (4)$$

Adicionalmente, como métricas complementarias, se compararon entre épocas: (i) la densidad de puntos (pulsos·m-²) y el conteo total de retornos. Las celdas con soporte insuficiente (N < 8) o con P_{huecos} fuera de (0,1] se marcaron como NA (celdas sin datos). Solo donde IAF resultó NA se realizó imputación mediante un proxy volumétrico derivado de vóxeles, manteniendo inalteradas las celdas con valores válidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten interpretar coherentemente la dinámica estructural del cafetal antes y después de la cosecha mecanizada. En la Figura 2, las clases espaciales del porcentaje de defoliación se concentran en corredores coincidentes con mayor pendiente (15%); este patrón es consistente con un incremento local de la interacción planta–máquina (vibración, contacto y deslizamiento del cabezal) que favorece el desprendimiento de hojas en laderas, fenómeno ya señalado para la cosecha mecanizada de café como factor que eleva la defoliación respecto a situaciones más benignas de operación (de Oliveira et al., 2007; Santinato et al., 2019).

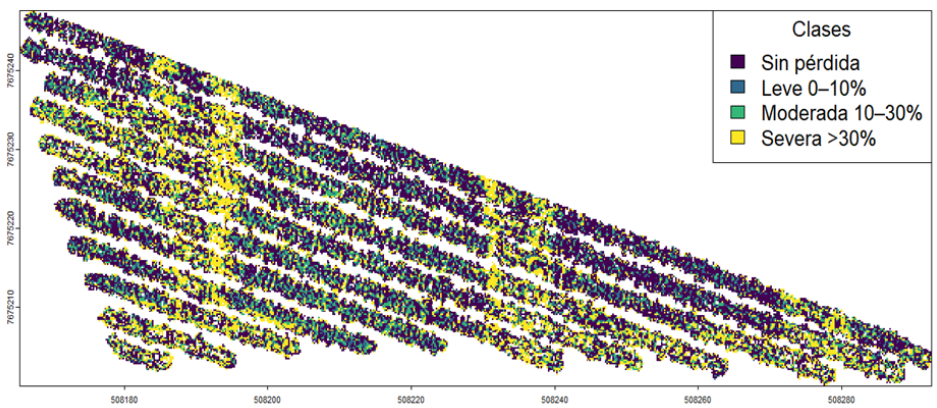


Figura 2. Mapa del porcentaje de defoliación del cultivo de café discretizado en clases.

Los modelos de IAF muestran una disminución global de 1.976 (PRE) a 1.790 (POS), equivalente a un 9,4% de pérdida de área foliar. Este valor se sitúa en el rango inferior de reducciones reportadas tras la cosecha: estudios con medición remota y verificación en campo han encontrado descensos de IAF o área foliar entre 12–17% según año y condiciones operativas (dos Santos et al., 2023). La menor magnitud observada aquí es plausible por tratarse de un único ciclo y por la combinación de parámetros de escaneo y geometría del dosel; además, la agregación espacial amortigua las pérdidas puntuales severas visibles en la Figura 2. Aunque se detectan píxeles con pérdidas >30%, el promedio espacial del lote es de 9,4%. Esta aparente "paradoja" es consistente con la literatura: la defoliación inducida por cosecha es altamente heterogénea y se concentra en zonas sensibles (bordes de calles, cambios de pendiente, radios de giro), mientras que grandes porciones del área experimentan pérdidas leves; al integrar todo el dominio, el porcentaje global se reduce (Santinato et al., 2019). En términos de métricas LiDAR, la nube de copa pasó de 1,27 millones de puntos (438,71 puntos·m-²) en PRE a 1,24 millones (431,35 puntos·m-²) en POS. La reducción concordante de conteo y densidad de retornos es esperable cuando disminuye la superficie foliar efectiva: hay menos elementos interceptando pulsos y, por ende, menos retornos de copa. Resultados en café han mostrado que métricas geométricas derivadas de nubes 3D se correlacionan de forma robusta con atributos biológicos como área foliar y cobertura, sustentando su uso para monitorear defoliación y vigor (dos Santos et al., 2020).

CONCLUSIÓN

Este estudio demostró que el IAF derivado de LiDAR mediante Beer–Lambert cuantifica y mapea la defoliación postcosecha en café: el IAF global disminuyó de 1.976 a 1.790 (–9,4%), con focos severos en laderas, coherentes con la operación mecanizada. La caída conjunta de IAF y de densidad/conteo de retornos respalda la interpretación estructural. El trabajo aporta un flujo reproducible para monitoreo operativo y sienta bases para integrar métricas volumétricas y validaciones de campo en futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Núcleo de Estudos em Sistemas Agrícolas (NESA), a la Hacienda Bom Jardim por facilitar el lugar de investigación, al CNPq (Processo nº 310186/2023-4, 302584/2025-0 y 444384/2024), a FAPEMIG (Processo nº APQ-00661-22) y a CAPES por el apoyo financiero, al Programa de Posgraduación en Ingeniería Agrícola y a la Universidade Federal de Lavras por su respaldo académico e institucional.

REFERENCIAS

Castro-Pacheco, S. A., González-Lutz, M. I., Araya-Alfaro, J. M., Vargas-Chinchilla, M. & Gutiérrez-Soto, M. V. 2024. Visual assessment of leaf area index in coffee (Coffea arabica L.) fields. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 28(3), e274355.

Dos Santos, L. M., Ferraz, G. A. S., Barbosa, B. D. S., Diotto, A. V., Andrade, M. T., Conti, L. & Rossi, G. 2020. Determining the leaf area index and percentage of area covered by coffee crops using UAV RGB images. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 13, 6401–6409.

Dos Santos, L. M., Ferraz, G. A. S., Carvalho, M. A. F., Vilela, M. S. & Estima, P. H. O. 2023. Preliminary study on the potential use of RPA images to quantify the influence of the defoliation after coffee harvesting to its yield. Agronomy Research 21(S3), 1555–1566.

Qu, Y., Shaker, A., Korhonen, L., Silva, C. A., Jia, K., Tian, L. & Song, J. 2020. Direct estimation of forest leaf area index based on spectrally corrected airborne LiDAR pulse penetration ratio. Remote Sensing 12(217), 1–17.

Santinato, F., Ruas, R. A. A., da Silva, R. P., Paixão, C. S. S. & Ormond, A. T. S. 2019. Morphological and productive influence of harvest on coffee plants. Australian Journal of Crop Science 13(1), 144–150

Wang, Y. & Fang, H. 2020. Estimation of LAI with the LiDAR technology: A review. Remote Sensing 12(3457), 1–28.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Discriminação de cercosporiose e ferrugem em cafeeiros com base em análise espectral e modelos de Machine Learning

Distinguishing between cercosporiosis and rust in coffee plants based on spectral analysis and Machine Learning models

Elias Horácio Zavala[1], Gabriel Araújo e Silva Ferraz[1], Halima Khalid[1], Mirian de Lourdes Oliveira[1], Rosalra Alves de Morais[1] and Shéfany Airane Dos Santos Silva[1]

Palabras clave:
Cercosporiose
Ferrugem do cafeeiro
Random forest
Sensoriamento hiperespectral

RESUMO

Este estudo avaliou a aplicação de imagens hiperespectrais para a detecção e classificação de doenças foliares no cafeeiro (*Coffea arabica*), focando na cercosporiose e ferrugem. Utilizando uma câmera Cubert ULTRIS 5 e o software CUVIS Touch®, foram adquiridas imagens de 75 folhas, incluindo amostras sadias e infectadas. Os dados espectrais, com 51 comprimentos de onda entre 450 e 850 nm, foram processados e analisados no R, com filtragem, normalização e uso do algoritmo Random Forest para classificação. O modelo apresentou acurácia de 95,24% no teste, com sensibilidade de 100% para cercosporiose e folhas sadias, e 85,71% para ferrugem. A análise da importância espectral indicou que as regiões do infravermelho próximo (746-842 nm) e vermelho foram as mais relevantes, com bandas específicas destacadas. Testes estatísticos confirmaram diferenças significativas entre as classes. Os resultados indicam que a combinação de sensoriamento hiperespectral e aprendizado de máquina pode ser útil para o diagnóstico de doenças no cafeeiro, auxiliando no manejo fitossanitário dentro da agricultura de precisão.

Keywords:
Cercosporiosis
Coffee rust
Random Forest
Hyperspectral sensing

ABSTRACT

This study evaluated the application of hyperspectral imaging for the detection and classification of leaf diseases in coffee plants (Coffea arabica), focusing on cercosporiosis and rust. Using a Cubert ULTRIS 5 camera and CUVIS Touch® software, images were acquired from 75 leaves, including healthy and infected samples. The spectral data, with 51 wavelengths between 450 and 850 nm, were processed and analysed in R, with filtering, normalisation and use of the Random Forest algorithm for classification. The model showed 95.24% accuracy in the test, with 100% sensitivity for cercosporiosis and healthy leaves, and 85.71% for rust. Spectral importance analysis indicated that the near-infrared (746-842 nm) and red regions were the most relevant, with specific bands highlighted. Statistical tests confirmed significant differences between classes. The results indicate that the combination of hyperspectral sensing and machine learning can be useful for diagnosing diseases in coffee plants, assisting in phytosanitary management within precision agriculture.

[1]Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Brasil. elias.zavala@estudante.ufla.br; gabriel.ferraz@ufla.br; halima.khalid1@estudante.ufla.br; mirian.silva1@ufla.br; rosalra.morais2@estudante.ufla.br; sthefanyairane@gmail.com

CC BY NC SA

A identificação precoce e precisa de doenças foliares é um desafio central na agricultura de precisão, especialmente em culturas de alto valor econômico como o cafeeiro (*Coffea arabica*). Patógenos como *Cercospora coffeicola* (cercosporiose) e *Hemileia vastatrix* (ferrugem) afetam severamente a produtividade e a qualidade dos grãos. Os métodos tradicionais de diagnóstico, baseados em inspeção visual, são frequentemente limitados pela subjetividade e pela semelhança entre sintomas em estágios iniciais. Nesse contexto, o uso do sensoriamento hiperespectral surge como uma alternativa promissora, permitindo a detecção precoce de alterações fisiológicas nas folhas, muitas vezes antes da manifestação visível dos sintomas.

A espectroscopia de imagem hiperespectral oferece cobertura contínua do espectro eletromagnético com alta resolução, capturando assinaturas espectrais detalhadas associadas ao estado de saúde das plantas. Estudos recentes, como os de FENG et al., (2022) e ORLANDO et al., (2024), demonstram que a região do infravermelho próximo (NIR) é particularmente sensível a mudanças bioquímicas provocadas por patógenos. Essa sensibilidade abre caminho para o uso de algoritmos de aprendizado de máquina capazes de diferenciar doenças foliares com alto grau de precisão, mesmo quando as diferenças visuais são sutis ou inexistentes.

Modelos supervisionados, como o Random Forest, têm se destacado na análise de dados hiperespectrais devido à sua robustez em contextos de alta dimensionalidade e conjuntos de dados reduzidos, cenário comum em experimentos agrícolas. Trabalhos como os de LI; ZHANG; WANG, (2021) e HAN; KIM, (2021) mostram que esses algoritmos conseguem identificar padrões espectrais complexos e gerar classificações confiáveis. No entanto, ainda persistem lacunas quanto à definição padronizada das faixas espectrais mais relevantes para a diferenciação entre doenças com sintomatologia semelhante, como cercosporiose e ferrugem.

Diante disso, torna-se fundamental investigar quais comprimentos de onda são mais eficientes na distinção entre diferentes tipos de estresse foliar no cafeeiro. A identificação e validação estatística dessas bandas críticas são passos essenciais para o desenvolvimento de índices espectrais específicos e modelos preditivos mais robustos. Este estudo tem como objetivo identificar as regiões espectrais mais relevantes para a diferenciação entre doenças foliares com sintomas sobrepostos, combinando dados espectrais de alta resolução com algoritmos de aprendizado de máquina. Dessa forma, busca-se contribuir para o avanço de sistemas de diagnóstico precoce e para o fortalecimento da agricultura de precisão no manejo fitossanitário do café.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido com imagens hiperespectrais de folhas de *Coffea arabica*, abrangendo amostras saudáveis e infectadas por *Cercospora coffeicola* (cercosporiose) e *Hemileia vastatrix* (ferrugem). As imagens foram capturadas com a câmera Cubert ULTRIS 5 (Figura 1),

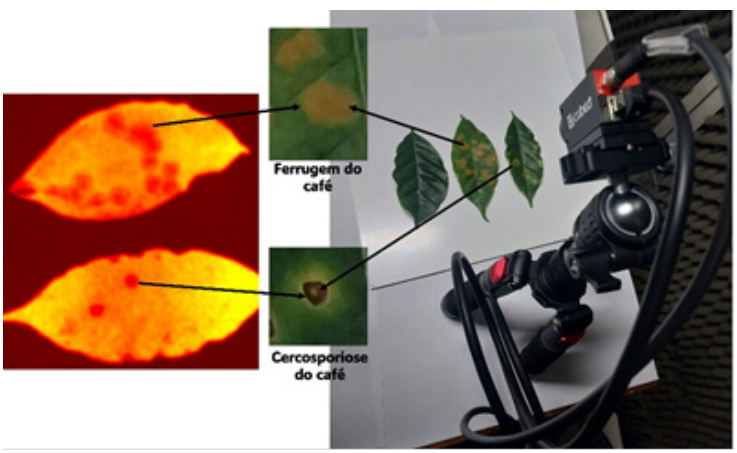


Figura 1. Aquisição de imagens hiperespectrais para detecção de ferrugem e cercosporiose.

acoplada ao software CUVIS Touch®, responsável pela aquisição e calibração dos dados. Antes das coletas, foi realizada a calibração radiométrica com uso de painel de referência para assegurar a precisão espectral. O software gravou os dados em diversos formatos, incluindo arquivos .cu3s, curvas espectrais e planilhas .xlsx com valores de reflectância para 51 comprimentos de onda (450 a 850 nm, resolução de ~8 nm). Foram coletadas 25 folhas por condição, totalizando 75 amostras mantidas sob controle de temperatura até a aquisição. As regiões analisadas nas folhas foram escolhidas com base na presença de sintomas visuais, como manchas e alterações de cor.

O processamento dos dados foi realizado no ambiente R® (v4.3.0), com etapas de padronização, filtragem de ruído via filtro de Savitzky-Golay (janela de 11 pontos) e normalização com base em um padrão de reflectância conhecido. A análise exploratória envolveu a geração de curvas espectrais médias e a comparação entre as classes para identificar bandas com maior poder discriminativo. Para a classificação das doenças, utilizou-se o algoritmo Random Forest, com divisão estratificada dos dados em treino (70%) e teste (30%), validação cruzada repetida (5 folds, 3 repetições) e ajuste de hiperparâmetros (mtry entre 5 e 30; ntree = 500). O desempenho do modelo foi avaliado por meio de métricas como acurácia, índice Kappa, sensibilidade e F1-score.

A importância relativa das bandas espectrais foi calculada pela métrica *Mean Decrease Gini*, complementada por análise de variância (ANOVA) e testes post-hoc de Tukey (α=0,05) para verificar diferenças significativas entre os grupos. As bandas foram também agrupadas em regiões espectrais azul (450–495 nm), verde (495–570 nm), vermelho (620–750 nm) e infravermelho próximo (750–850 nm) para avaliar sua contribuição na discriminação das doenças. Todas as etapas de processamento e análise foram realizadas com scripts personalizados no ambiente RStudio®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas (Figura 2) espectrais revelam variações significativas na reflectância entre folhas saudáveis, com cercosporiose e com ferrugem. As folhas saudáveis exibem baixa reflectância nas regiões do azul (450–500 nm) e do vermelho (620–710 nm), acompanhada de um aumento acentuado no infravermelho próximo (NIR, 720–850 nm) padrão típico de dosséis fisiologicamente íntegros. Essa integridade estrutural se traduz em níveis elevados de reflectância nas bandas 754, 762 e 818 nm. Em contraste, a cercosporiose apresenta quedas acentuadas no NIR, particularmente em 746 e 754 nm, indicando degradação tecidual e perda de integridade celular. A ferrugem promove alterações mais suaves, um leve achatamento da curva no NIR e discreto aumento no vermelho, sugerindo danos menos severos quando comparados à cercosporiose.

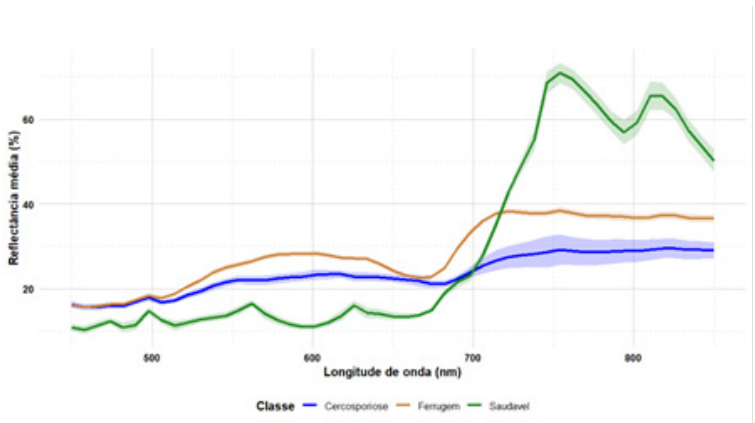


Figura 2. Curvas medias médias de refletância por classe

O modelo Random Forest apresentou acurácia (95,24%) na classificação de doenças foliares (Cercosporiose e ferrugem), com desempenho consistente entre treino (94,44%) e teste (95,24%), indicando boa generalização. O valor de Kappa (0,9286) demonstra boa concordância entre predições e observações, reforçando a confiabilidade do modelo, conforme observado em estudos recentes sobre aprendizado de máquina aplicado à agricultura de precisão

(Li et al., 2021). A escolha de mtry = 5, determinada por validação cruzada, está alinhada com recomendações de HAN; KIM, (2021), que destacam a importância da seleção de hiperparâmetros para evitar sobreajuste em dados com alta dimensionalidade.

A análise por classe indicou boa sensibilidade para Cercosporiose e folhas saudáveis (ambas com 100%), enquanto a ferrugem apresentou um valor um pouco inferior (85,71%) (Figura 3). Essa redução pode estar relacionada à semelhança visual entre as lesões causadas por ferrugem e cercosporiose em estágios mais avançados, o que pode dificultar a distinção entre essas doenças uma limitação também relatada por PENG et al., (2022) e Salehi et al., (2024) ao utilizar visão computacional na identificação de doenças em culturas agrícolas. A especificidade foi satisfatória, atingindo 100% para as classes Ferrugem e Saudável, o que sugere que o modelo teve baixo índice de falsos positivos nessas categorias. Esse desempenho é relevante para aplicações práticas em campo, como apontado por KNIZIA et al., (2025), que destacam a importância da acurácia interclasse em sistemas de detecção automatizada no contexto da agricultura de precisão.

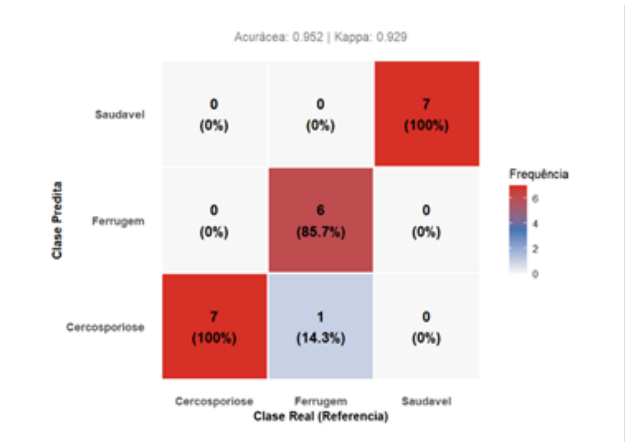


Figura 3. Desempenho da classificação hiperespectral por matriz de confusão.

A ausência de *overfitting* (gap treino-teste de 0,0476%) corrobora achados de (Charilaou & Battat, 2022), que demonstram que técnicas de validação cruzada repetida, como a empregada neste estudo, são eficazes para garantir a robustez de modelos em conjuntos pequenos. No entanto, a leve queda na acurácia de validação cruzada (87,53%) em relação ao teste sugere que a performance pode variar com novas amostras, um fenômeno discutido por (González-Domínguez et al., 2023) em análise de incertezas em modelos preditivos para fitopatologia.

A análise da importância dos comprimentos de onda (Figura 4) indicou que a região do infravermelho próximo (NIR), especialmente entre 746 e 842 nm, foi a mais

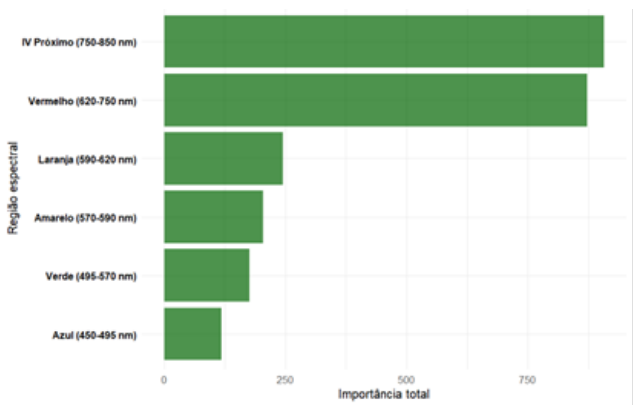


Figura 4. Importância das regiões espectrais no diagnóstico das doenças.

relevante para a classificação foliar (Cercosporiose, Ferrugem e Saudável), com destaque para 746, 754 e 762 nm, que apresentaram importância acima de 88%. As faixas espectrais NIR (750–850 nm) e vermelho (620–750 nm) mostraram maior contribuição total, enquanto as regiões azul e verde tiveram baixa relevância, corroborando estudos como os de Orlando et al. (2024) e Feng et al. (2022) sobre a sensibilidade do NIR a alterações estruturais e bioquímicas associadas a patógenos. Folhas saudáveis apresentaram maior reflectância em bandas como 754, 762 e 818 nm, refletindo integridade tecidual, enquanto a Cercosporiose exibiu reduções acentuadas em 746 e 754 nm, e a Ferrugem mostrou comportamento intermediário, com picos em 730 e 722 nm, indicando padrões espectrais distintos úteis para a discriminação automatizada.

Os testes estatísticos (ANOVA) confirmaram a significância dessas diferenças, com valores F elevados (acima de 400 para os três primeiros comprimentos) e p-valores <0.001, indicando distinções estatisticamente robustas. A caracterização espectral com base na importância das bandas e sua distribuição estatística fortalece a aplicabilidade de sensores hiperespectrais na agricultura de precisão. A identificação de bandas críticas permite o desenvolvimento de índices espectrais otimizados para o diagnóstico precoce de doenças em café, com implicações diretas na tomada de decisão agronômica. Estudos como o de (Falcioni et al., 2023) reforçam essa abordagem, sugerindo que algoritmos de seleção de bandas, combinados com modelos de aprendizado de máquina, podem reduzir a complexidade espectral sem comprometer a acurácia, tornando a tecnologia mais viável para uso em campo.

CONCLUSÕES

Os resultados reforçam o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta na detecção de doenças do cafeeiro, como a Cercosporiose e a Ferrugem. As diferenças de reflectância observadas entre folhas saudáveis e infectadas foram especialmente evidentes nas faixas do azul (450–495 nm), verde (495–570 nm) e infravermelho próximo (700–850 nm), indicando alterações fisiológicas associadas às doenças. A eficácia do modelo Random Forest, utilizado na classificação espectral, foi evidenciada por uma acurácia nos dados de teste (92,21%) e um desempenho consistente na validação cruzada (87,53%), com gap de apenas 4,68%, o que indica robustez e baixa tendência ao *overfitting*. Esses achados demonstram que a combinação entre dados hiperespectrais e algoritmos de aprendizado de máquina pode subsidiar estratégias precisas de monitoramento fitossanitário em cultivos de café.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a UFLA, PPGEA, las agencias de financiación CNPq (proyecto 310186/2023-4), FAPEMIG (proyecto APQ-00661-22) y CAPES por su apoyo en forma de becas.

REFERÊNCIAS

Charilaou, P. & Battat, R. (2022). Machine learning models and over-fitting considerations. World Journal of Gastroenterology, 28(5), 605–607. https://doi.org/10.3748/wjg.v28.i5.605

Falcioni, R., Antunes, W. C., Demattê, J. A. M. & Nanni, M. R. (2023). Reflectance Spectroscopy for the Classification and Prediction of Pigments in Agronomic Crops. Plants, 12(12). https://doi.org/10.3390/plants12122347

Feng, Z. H., Wang, L. Y., Yang, Z. Q., Zhang, Y. Y., Li, X., Song, L., He, L., Duan, J. Z. & Feng, W. (2022). Hyperspectral Monitoring of Powdery Mildew Disease Severity in Wheat Based on Machine Learning. Frontiers in Plant Science, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.828454

González-Domínguez, E., Caffi, T., Rossi, V., Salotti, I. & Fedele, G. (2023). Plant Disease Models and Forecasting: Changes in Principles and Applications over the Last 50 Years. Em Phytopathology (Vol. 113, Número 4, p. 678–693). American Phytopathological Society. https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0362-KD

Han, S. & Kim, H. (2021). Optimal feature set size in random forest regression. Applied Sciences (Switzerland), 11(8). https://doi.org/10.3390/app11083428

Knizia, D., Yuan, J., Meksem, K. & Kassem, M. A. (2025). Harnessing Machine Learning for Transformation in Agricultural Sciences: A Review. Journal of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Bioinformatics, 16–28. https://doi.org/10.5147/jaimlb.vi.256

Li, L., Zhang, S. & Wang, B. (2021). Plant Disease Detection and Classification by Deep Learning - A Review. Em IEEE Access (Vol. 9, p. 56683–56698). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069646

Orlando, V. S. W., Galo, M. de L. B. T., Martins, G. D., Lingua, A. M., de Assis, G. A. & Belcore, E. (2024). Hyperspectral Characterization of Coffee Leaf Miner (Leucoptera coffeella) (Lepidoptera: Lyonetiidae) Infestation Levels: A Detailed Analysis. Agriculture (Switzerland), 14(12). https://doi.org/10.3390/agriculture14122173

Peng, Y., Dallas, M. M., Ascencio-Ibáñez, J. T., Hoyer, J. S., Legg, J., Hanley-Bowdoin, L., Grieve, B. & Yin, H. (2022). Early detection of plant virus infection using multispectral imaging and spatial–spectral machine learning. Scientific Reports, 12(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-06372-8

Salehi, B., Mireei, S. A., Jafari, M., Hemmat, A. & Majidi, M. M. (2024). Integrating in-field Vis-NIR leaf spectroscopy and deep learning feature extraction for growth-stage dependent and independent genotyping of wheat plants. Biosystems Engineering, 238, 188–199. https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2024.01.016

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Agrupamiento no supervisado de cultivares de *Coffea arabica* usando altura estimada por LiDAR e imagen RGB de RPA con K-means

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Unsupervised clustering of *Coffea arabica* cultivars using LiDAR-estimated height and RPA RGB images with K-means

Elias Horácio Zavala[1], Santiago Velasquez Rubio[1], Edna Jeraldy Suarez Cardozo[1], Franck Morais de Oliveira[1], Gabriel Araújo e Silva Ferraz[1] and Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz[1]

Palabras clave:
Agricultura digital y de precisión
Fenotipado
Fusión de datos sensor–campo
Nubes de puntos

RESUMEN

Para identificar cultivares de café, la altura de planta constituye un rasgo esencial que puede obtenerse a gran escala mediante teledetección. El estudio aplica K-means para realizar agrupamiento de los cultivares de café Arara y Mundo Novo a partir de alturas estimadas en campo, con imágenes RGB y con LiDAR, y evalúa la correlación entre métodos para verificar su consistencia y su potencial discriminativo. Primeramente, se obtuvieron datos de altura de 90 plantas en campo utilizando una regla graduada. Después, se generaron nubes de puntos en el área de estudio obtenidos con un LiDAR SLAM GS-100G e imágenes RGB con un RPA DJI Mavic 3T. Los datos se alinearon en CloudCompare y se extrajeron alturas por planta en R con el paquete lidR para 90 individuos. Las alturas promedio por fuente mostraron correlaciones de 0,92 (LiDAR y campo), 0,93 (RGB y campo) y 0,96 (LiDAR y RGB), evidenciando alta concordancia entre teledetección y campo. El modelo K-means separó claramente las variedades de café con una exactitud de 94,44% y un Kappa de 0,8889. Se concluye que la altura estimada por teledetección es un descriptor robusto para discriminar cultivares y podría habilitar aplicaciones operativas de fenotipado.

Keywords:
Digital and precision agriculture
Phenotyping
Sensor-field data fusion
Point clouds

ABSTRACT

For coffee cultivar identification, plant height is an essential trait that can be obtained on a large scale using remote sensing. This study applies K-means to perform grouping Arara and Mundo Novo coffee cultivars based on field-estimated heights, RGB images, and LiDAR, and evaluates the correlation between methods to verify their consistency and discriminatory potential. First, height data were obtained from 90 plants in the field using a graduated ruler. Point clouds were then generated in the study area using a SLAM GS-100G LiDAR and RGB images using a DJI Mavic 3T RPA. The data were aligned in CloudCompare, and plant heights were extracted in R using the lidR package for 90 individuals. The average heights per source showed correlations of 0.92 (LiDAR and field), 0.93 (RGB and field), and 0.96 (LiDAR and RGB), demonstrating high agreement between remote sensing and field. The K-means model clearly separated the coffee varieties with an accuracy of 94.44% and a Kappa of 0.8889. It is concluded that the height estimated by remote sensing is a robust descriptor for discriminating cultivars and enables operational phenotyping applications.

[1]Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Brasil. elias.zavala@estudante.ufla.br; santiago.rubio@estudante.ufla.br; edna.cardozo@estudante.ufla.br; franck.oliveira1@estudante.ufla.br; gabriel.ferraz@ufla.br; patricia.ferraz@ufla.br

CC BY NC SA

El café (*Coffea arabica* L.) es uno de los productos agrícolas más comercializados, con más de 10 millones de hectáreas. Brasil lidera la producción y exportación y es el segundo mayor consumidor (Wright et al., 2024). En este contexto, estimar con precisión parámetros agronómicos es clave para la gestión. No obstante, medir manualmente la altura de plantas es laborioso, poco escalable y propenso a errores, mientras que tecnologías remotas como LiDAR ofrecen alternativas eficientes (Bento et al., 2025).

En los últimos años, K-mean se ha aplicado con éxito en agricultura y análisis de nubes de puntos: (Mu et al., 2020) lo combinaron con watershed para segmentar copas con LiDAR aéreo; (Soares et al., 2021) mostraron que imágenes RGB de drones generan DSM y permiten estimar altura y biomasa con alta concordancia respecto a campo; y (Zhu et al., 2025) emplearon Constrained K-means integrando teledetección y topografía para predicciones espaciales más robustas.

Con base en ello, en este estudio K-means se emplea para agrupar dos cultivares de *Coffea arabica* L. (Arara y Mundo Novo) según su altura medida por tres métodos (campo, RGB y LiDAR) y, complementariamente, se analiza la correlación entre estas fuentes para validar la consistencia y su potencial en la discriminación varietal.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la estación experimental agrícola de la Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais, Brasil (21°13'38"S; 44°57'37"W), en un área cultivada con dos variedades de *Coffea arabica*: Arará y Mundo Novo. Se adoptó un muestreo sistemático, seleccionando 30 plantas de referencia a lo largo de las hileras de cultivo. Para cada planta de referencia se consideraron además las plantas adyacentes a la derecha y a la izquierda, totalizando 90 plantas evaluadas (45 de cada variedad). La variable analizada fue la altura, medida desde el nivel del suelo hasta el ápice de la planta. Para obtener los datos de campo, se utilizó una regla graduada.

El área de estudio y las plantas de referencia analizadas se muestran en la Figura 1.

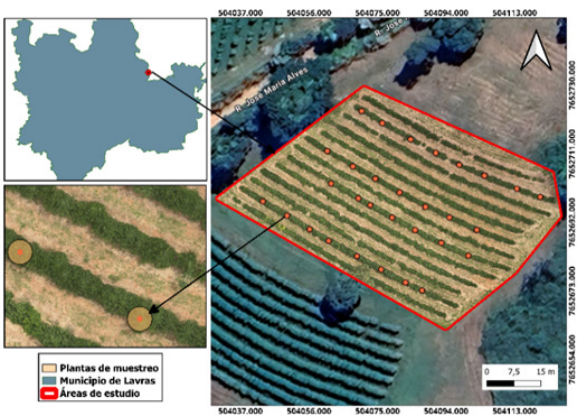


Figura 1. Área de estudio y plantas de referencia seleccionadas para la evaluación de altura. Los puntos rojos indican las plantas de referencia.

Se efectuaron dos levantamientos complementarios: (i) LiDAR con el sensor SLAM GS-100G (Geosun), registrado en GeosunMeasure v2.1.0, transportado manualmente a lo largo de las hileras a velocidad y altura constantes para asegurar uniformidad en la densidad de retornos y consistencia de la nube de puntos; y (ii) RPA DJI Mavic 3T Enterprise con cámara RGB de 20 MP (zoom óptico hasta 56×), cuyas imágenes se procesaron en Pix4D Mapper Enterprise v4.5.6 mediante fotogrametría digital para generar una nube de puntos RGB.

Las nubes tridimensionales se preprocesaron en CloudCompare v2.12.alpha, alineando los escaneos a un sistema común de coordenadas. Posteriormente, los datos se analizaron en R con el paquete lidR, del cual se extrajeron métricas de altura por planta. En una primera

etapa, se calcularon estadísticas descriptivas (mínimo, máximo y media) para las 90 plantas. Con el fin de reducir la variabilidad individual y representar de forma más robusta cada unidad experimental, se promedió la altura de la planta de referencia con la de sus dos adyacentes, resultando en 30 unidades analíticas independientes (cada una formada por tres plantas), utilizadas para estimar la correlación de Pearson entre las alturas obtenidas en campo, por LiDAR y por fotogrametría RGB, evaluando así la consistencia y concordancia entre métodos.

Completada esta etapa, se aplicó un algoritmo de agrupamiento mediante K-means, con el objetivo de identificar categorías de plantas en función de su altura y explorar patrones de comportamiento similares. A diferencia de la etapa de correlación, en esta fase se consideraron nuevamente las 90 plantas originales, con el fin de maximizar la representatividad en la clusterización. La validación se realizó de forma externa, contrastando los grupos obtenidos con las etiquetas de referencia derivadas de la variedad y de las mediciones de campo. El desempeño del agrupamiento se evaluó mediante métricas estándar exactitud global, índice Kappa de Cohen, sensibilidad y especificidad, lo que permitió garantizar la solidez estadística y la confiabilidad de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta un análisis descriptivo de los datos, incluyendo los valores mínimo, promedio y máximo para cada variable evaluada.

Tabla 1. Análisis descriptivo de las 90 plantas y los promedios.

	Variedad	Colecta	Mínimo	Promedio	Máximo
90 plantas (total)	*Arara*	*Campo*	1,51	1,80	2,28
		LiDAR	1,51	1,77	2,27
		RGB	1,20	1,74	2,16
	Mundo Novo	*Campo*	1,53	2,48	2,78
		LiDAR	2,27	2,51	2,81
		RGB	2,18	2,47	2,90
30 plantas (média)	*Arara*	*Campo*	1,57	1,80	1,93
		LiDAR	1,55	1,77	2,03
		RGB	1,57	1,74	1,92
	Mundo Novo	*Campo*	2,04	2,48	2,71
		LiDAR	2,32	2,51	2,41
		RGB	2,26	2,47	2,90

El análisis descriptivo inicial de las 90 plantas reveló un mayor rango entre los valores mínimos y máximos, lo que refleja la variabilidad natural entre individuos. Al agrupar las plantas en grupos de tres y utilizar la media de cada grupo, se observó una reducción significativa de la dispersión, lo que aumenta la robustez de las comparaciones entre métodos y reduce la sensibilidad a los valores atípicos. Este enfoque contribuye a la consistencia estadística y justifica el uso de la media como base para el posterior análisis de correlación entre métodos.

La Figura 2 muestra el mapa de correlación entre las variables.



Figura 2. Mapa de correlación entre los datos de altura em LiDAR, RGB y campo.

Las correlaciones entre los promedios de altura obtenidos con los diferentes métodos oscilaron entre 0,92 y 0,96, valores que, según (Mukaka, 2012), indican una correlación positiva muy alta. Este resultado demuestra que las estimaciones obtenidas con imágenes LiDAR y RGB son altamente consistentes con las mediciones de campo, en nuestro caso incluso superiores. En la misma línea, (Bento et al., 2025) compararon alturas derivadas de RGB/SfM y LiDAR en café y reportaron R = 0,85 (R^2 = 0,72; RMSE = 0,44 m) sin diferencias estadísticas entre sensores, reforzando la confiabilidad de la teledetección para estimar altura. Por lo tanto, se confirma que los métodos basados en teledetección pueden utilizarse de forma fiable para medir la altura de las plantas de café, cumpliendo así el objetivo de validar alternativas automatizadas a las mediciones tradicionales.

La Figura 3 muestra la distribución tridimensional de las observaciones según las variables estudiadas, luego de aplicar el algoritmo K-means para su agrupamiento en dos clases.

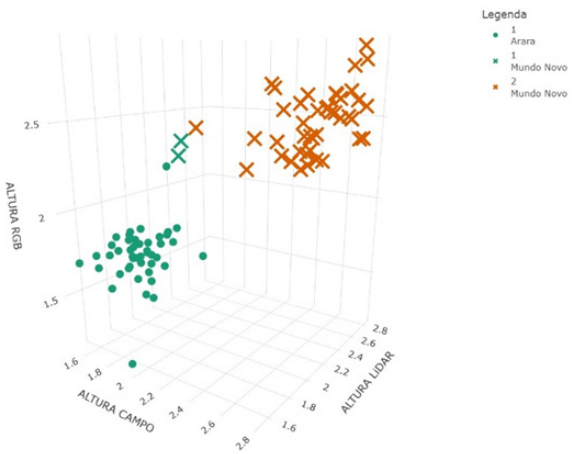


Figura 3. Resultados del agrupamiento obtenidos por K-means.

Se observa una separación bien definida entre los grupos, lo que evidencia que las variables seleccionadas tienen poder discriminativo para diferenciar los individuos. El grupo representado en verde (Arara) concentra valores más bajos en las tres variables, mientras que el grupo en naranja (Mundo Novo) agrupa los valores más altos. Los criterios finales del modelo indican un desempeño sobresaliente en la aplicación de fenotipado de precisión, permitiendo una diferenciación eficaz entre cultivares, con una exactitud del 97,78% (IC95%: 0,922–0,9973) y un índice Kappa de 0,9556, lo que evidencia una concordancia muy fuerte con

los datos de referencia. La sensibilidad fue 1,0000, mostrando que todos los individuos del grupo positivo fueron correctamente identificados, mientras que la especificidad de 0,9556 indica que se produjeron muy pocos errores en la clasificación del grupo negativo.

CONCLUSIÓN

Este estudio demostró que la altura derivada de campo, LiDAR y fotogrametría RGB es un descriptor robusto para diferenciar cultivares: las tres fuentes presentaron correlaciones muy altas (r=0,92–0,96), y el K-means logró una alta precisión (exactitud 94,44%; Kappa 0,8889) con clara separación entre Arara y Mundo Novo. Estos hallazgos validan el uso operativo de teledetección para fenotipado varietal y orientan futuras investigaciones hacia series temporales, rasgos morfológicos adicionales y escalas productivas mayores.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Núcleo de Estudos em Sistemas Agrícolas (NESA), al CNPq (Processo nº 310186/2023-4, 302584/2025-0 y 444384/2024), a FAPEMIG (Processo nº APQ-00661-22) y a CAPES por el apoyo financiero, al Programa de Posgraduación en Ingeniería Agrícola y a la Universidade Federal de Lavras por su respaldo académico e institucional.

REFERENCIAS

Bento, N. L., Ferraz, G. A. e. S., Santana, L. S., Faria, R. de O., Rossi, G. & Bambi, G. (2025). Plant Height and Soil Compaction in Coffee Crops Based on LiDAR and RGB Sensors Carried by Remotely Piloted Aircraft. Remote Sensing, 17(8). https://doi.org/10.3390/rs17081445

Mu, Y., Zhou, G. & Wang, H. (2020). CANOPY LIDAR POINT CLOUD DATA K-MEANS CLUSTERING WATERSHED SEGMENTATION METHOD. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 6(3/W1), 67–73. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-VI-3-W1-2020-67-2020

Mukaka, M. M. (2012). Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. Em Malawi Medical Journal (Vol. 24, Número 3). www.mmj.medcol.mw

Soares, D. A. A., Alzeneide, J., Lopes, S., Alves, E., Milton, B., Cardoso, J., Carolinne, R. & De Sousa, M. (2021). BOLETIM DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO 140 Estimativa da Biomassa de Milho por Imagens RGB de Drones. www.embrapa.br/meio-norte]

Wright, D. R., Bekessy, S. A., Lentini, P. E., Garrard, G. E., Gordon, A., Rodewald, A. D., Bennett, R. E. & Selinske, M. J. (2024). Sustainable coffee: A review of the diverse initiatives and governance dimensions of global coffee supply chains. https://doi.org/10.1007/s13280

Zhu, F., Zhu, C., Fang, Z., Lu, W. & Pan, J. (2025). Using Constrained K-Means Clustering for Soil Texture Mapping with Limited Soil Samples. Agronomy, 15(5). https://doi.org/10.3390/agronomy15051220

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Integración de teledetección e inteligencia artificial para mapear el rendimiento de la caña de azúcar

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Integration of remote sensing and artificial intelligence to map sugarcane yield

Julian David Ome Narvaez[1], Camilo Andres Veléz Angulo[1] and Diego Ferney Sandoval[2]

Palabras clave:
Agricultura de precisión
Inteligencia artificial
Predicción de rendimiento
Radar de apertura sintética (SAR)
Teledetección
XGBoost

RESUMEN

Este estudio desarrolló un modelo predictivo para estimar el rendimiento de caña de azúcar (toneladas por hectárea) utilizando imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) del satélite Sentinel-1. A diferencia de los sensores ópticos, las imágenes SAR permiten capturar información estructural y de humedad del cultivo en cualquier condición climática, lo cual resulta esencial en regiones tropicales. El modelo fue implementado con el algoritmo XGBoost, integrando variables SAR agrupadas temporalmente a lo largo de las etapas del ciclo del cultivo. El modelo alcanzó un R^2 de 0.87 y un RMSE de 11.35 TCH en el conjunto de prueba, demostrando una alta precisión y solidez en la predicción. Estos resultados evidencian el potencial del modelado geoespacial basado en SAR como una herramienta escalable para la agricultura de precisión, facilitando la asignación eficiente de recursos y la planificación de la cosecha en la agroindustria azucarera.

Keywords:
Precision agriculture
Artificial intelligence.
Sugarcane yield prediction
Synthetic Aperture Radar (SAR)
Remote Sensing
XGBoost

ABSTRACT

This study developed a predictive model for estimating sugarcane yield (tons per hectare) using Synthetic Aperture Radar (SAR) images from Sentinel-1. Unlike optical sensors, SAR imagery provides structural and moisture-related information under all weather conditions, which is a critical advantage in tropical regions. The model was implemented with the XGBoost algorithm, integrating temporally grouped SAR features from different crop stages. The predictive model achieved an R^2 of 0.87 and an RMSE of 11.35 TCH on the test set, demonstrating high accuracy and robustness. These results highlight the potential of SAR-based geospatial modeling as a scalable tool for precision agriculture, enabling efficient resource allocation and improved harvest planning in the sugarcane agroindustry.

[1]Programa de Agronomía, Área de Agricultura Digital, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), Florida, Valle del Cauca, Colombia. jdome@cenicana.org; cavelez@cenicana.org
[2]Área Agricultura de Precisión, Ingenio Providencia, El Cerrito, Valle del Cauca, Colombia. dsandoval@providenciaco.com

CC BY NC SA

La agroindustria de la caña de azúcar en Colombia constituye un pilar económico fundamental, aportando el 21,1% del PIB agrícola del Valle del Cauca y con una superficie cultivada cercana a 238.350 hectáreas (Asocaña, 2022). En este escenario, la predicción espacial del rendimiento antes de la etapa de maduración resulta esencial, ya que permite orientar de manera más eficiente esta práctica agronómica. Del mismo modo, disponer de esta información con anticipación facilita la planificación de la cosecha y la molienda en los ingenios, lo que contribuye a una programación más precisa de la logística, a la reducción de costos y a un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles. Tradicionalmente, estas estimaciones se han obtenido a partir de mapas de productividad generados en campo durante la cosecha; sin embargo, se trata de un insumo retrospectivo que describe el rendimiento alcanzado, pero no permite anticiparlo para apoyar prácticas agronómicas o la planificación logística.

En consecuencia, los mapas de productividad generados por monitores en las cosechadoras, además de producirse únicamente al final del ciclo, presentan limitaciones técnicas y operativas, pues requieren calibraciones frecuentes, implican altos costos y demandan un procesamiento de datos complejo que restringe su uso generalizado (Fulton & Port, 2018). Ante este panorama, la teledetección se ha consolidado como una alternativa eficaz para anticipar la variabilidad productiva. No obstante, en regiones tropicales como Colombia, la nubosidad persistente reduce la disponibilidad de imágenes ópticas (Molijn et al., 2019). En contraste, el Radar de Apertura Sintética (SAR) ofrece ventajas al operar en el espectro de microondas, lo que permite capturar información estructural y de humedad del cultivo bajo cualquier condición climática (McNairn & Brisco, 2004). Diversos estudios han confirmado el potencial del SAR en caña de azúcar, especialmente mediante polarizaciones cruzadas, para caracterizar la biomasa y detectar la variabilidad espacial del rendimiento (Baghdadi et al., 2009; Den Besten et al., 2021a).

Sin embargo, aprovechar la riqueza informativa del SAR para fines predictivos requiere metodologías capaces de procesar grandes volúmenes de datos y de identificar relaciones no lineales entre variables. En este sentido, la integración de imágenes SAR con algoritmos de aprendizaje automático constituye una oportunidad estratégica para desarrollar modelos robustos y precisos de predicción del rendimiento. Estas técnicas permiten extraer patrones complejos a partir de datos satelitales, climáticos y agronómicos, fortaleciendo la capacidad de anticipar la productividad y de apoyar decisiones clave bajo esquemas de agricultura de precisión (Canata et al., 2021; Das et al., 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología aplicada en este estudio se estructuró bajo el marco ASUM-DM (Agile Data Science Unified Methodology), el cual permitió organizar el flujo de trabajo en fases iterativas de comprensión del problema, preparación de datos, modelado, evaluación y despliegue. Este marco se seleccionó por su capacidad para integrar múltiples fuentes de información y garantizar la trazabilidad en proyectos de ciencia de datos.

Conjunto de datos

Se construyó un dataset multifuente a partir de registros correspondientes a los años 2021, 2022 y 2023, con un volumen aproximado de un millón de observaciones. La base de datos incluyó:

Imágenes SAR Sentinel-1: escenas en polarizaciones VV y VH con resolución espacial de 10 m y frecuencia de revisita de 12 días. De cada lote se extrajo la retrodispersión en VV, VH y la relación VH/VV. Se consideraron imágenes mensuales desde el tercer hasta el noveno mes del ciclo del cultivo. Las observaciones de los meses 3 a 8 se agruparon mediante estadísticos (media, mediana y desviación estándar), mientras que las del mes 9 se mantuvieron de forma independiente para capturar información previa a la cosecha.

Variables climáticas: se calculó la precipitación acumulada en dos periodos clave: de 3 a 6 meses y de 6 a 9 meses, con el fin de representar la influencia diferenciada de la lluvia en las fases de crecimiento y maduración inicial.

Variables agronómicas: las variables categóricas consideradas fueron la variedad de caña, restringida únicamente a CC 05-430, CC 01-1940 y CC 85-92; el grupo de humedad, derivado de la zonificación agroecológica; y el megambiente de cultivo.

Datos de productividad real: el rendimiento de caña de azúcar (TCH) se obtuvo a partir de monitores de rendimiento basados en cámaras estereoscópicas instaladas en las cosechadoras. Previo a su uso, se aplicó un proceso de validación de calidad de datos para eliminar inconsistencias y garantizar la confiabilidad de los registros.

Preparación de datos

El preprocesamiento incluyó:

Imputación de valores faltantes mediante media o moda, según el tipo de variable.
Codificación one-hot de variables categóricas.
Normalización de variables numéricas.

Modelado

Se entrenó un único modelo supervisado de aprendizaje automático basado en XGBoost, seleccionado por su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos heterogéneos y capturar relaciones no lineales entre variables. Los hiperparámetros del modelo fueron ajustados mediante un esquema de optimización bayesiana, en combinación con validación cruzada k-fold (k=5), lo que permitió maximizar la precisión y minimizar el error de predicción.

Para la división de datos en entrenamiento y prueba (75%–25%), se garantizó un balance entre años y ubicación espacial de los registros. De este modo, la evaluación del modelo consideró escenarios con diferentes condiciones climáticas, variedades y zonas de cultivo, fortaleciendo la capacidad de generalización de las predicciones.

Evaluación

El desempeño del modelo se evaluó mediante el Coeficiente de Determinación (R^2) y el Error Cuadrático Medio (RMSE). Estas métricas permitieron cuantificar tanto la capacidad explicativa como la precisión de las predicciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presentan los resultados de la predicción frente a los valores observados de toneladas de caña por hectárea (TCH) en el conjunto de entrenamiento. El modelo XGBoost alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.89 y un RMSE de 10.35 TCH, con una pendiente ajustada de 1.02, lo que evidencia un excelente ajuste entre lo predicho y lo observado. Estos resultados indican que el modelo fue capaz de capturar de manera adecuada las relaciones entre las variables SAR y la productividad del cultivo, confirmando su capacidad para identificar patrones no lineales en los datos.

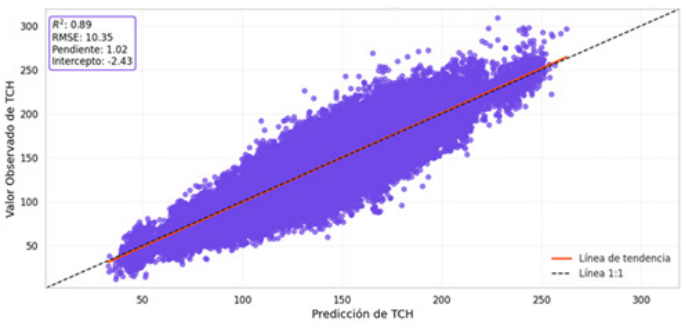


Figura 1. Relación entre valores predichos y observados de TCH en el conjunto de entrenamiento.

En la Figura 2, correspondiente al conjunto de prueba, el modelo mantuvo un desempeño robusto, con un R^2 de 0.87 y un RMSE de 11.35 TCH. La pendiente ajustada de 1.01 muestra que el modelo generaliza correctamente a datos no vistos, con un sesgo mínimo respecto a la línea 1:1. Aunque el error es ligeramente mayor que en el conjunto de entrenamiento, la consistencia de los resultados confirma la estabilidad del enfoque. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que han demostrado la efectividad de XGBoost en el modelado de rendimientos agrícolas a partir de datos satelitales, al ofrecer un equilibrio óptimo entre precisión y eficiencia computacional (Zhu et al., 2023; Das et al., 2023).

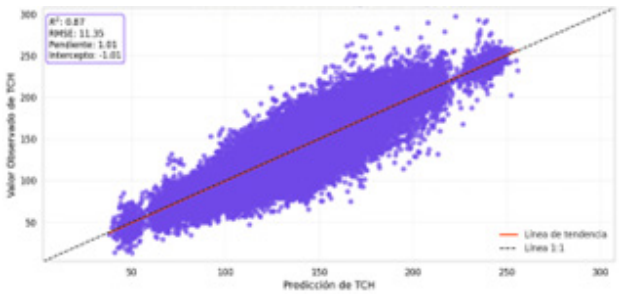


Figura 2. Relación entre valores predichos y observados de TCH en el conjunto de prueba.

La Figura 3 presenta la comparación espacial entre el TCH real y el predicho en un lote del dataset de prueba. El modelo reprodujo con precisión la variabilidad intra-lote, con una diferencia promedio menor a una tonelada entre lo observado (170.7 TCH) y lo estimado (170.3 TCH). Estos resultados confirman la utilidad del enfoque SAR para capturar variaciones locales de productividad, incluso bajo condiciones de nubosidad, lo que representa una ventaja frente a los sensores ópticos en regiones tropicales (McNairn & Brisco, 2004; Molijn et al., 2019).

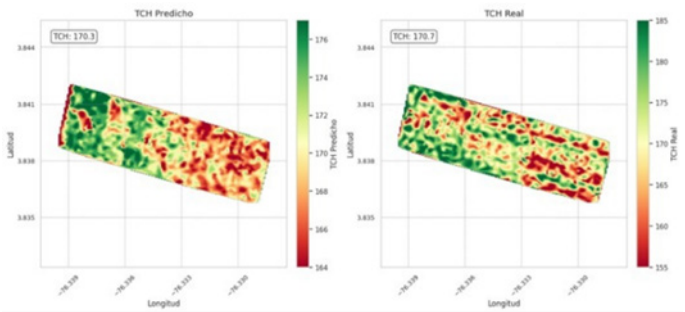


Figura 3. Comparación espacial de la productividad predicha y observada de caña de azúcar en un lote representativo (TCH).

No obstante, la señal SAR presenta limitaciones físicas que deben reconocerse: la saturación en coberturas altas de caña reduce su sensibilidad en etapas avanzadas de maduración, y la humedad en lotes recién regados o con eventos de alta precipitación puede confundirse con incrementos de biomasa, generando sobreestimaciones de rendimiento. Aun así, la integración de SAR con algoritmos de aprendizaje automático como XGBoost confirma su potencial en agricultura de precisión, en línea con lo reportado en otros contextos (Canata et al., 2021; Den Besten et al., 2021a), y aporta evidencia práctica para la planificación logística y el manejo diferenciado de lotes productivos en el sector agroindustrial colombiano.

CONCLUSIÓN

Este estudio desarrolló y evaluó un modelo de predicción del rendimiento de caña de azúcar a partir de imágenes SAR Sentinel-1 integradas con aprendizaje automático. El algoritmo XGBoost alcanzó un desempeño destacado (R^2 = 0.87; RMSE = 11.35 TCH), mostrando capacidad para estimar con precisión las toneladas de caña por hectárea y representar la variabilidad intra-lote. Estos resultados confirman el valor del enfoque para apoyar prácticas de agricultura de precisión y aportar insumos relevantes en la planificación de cosecha.

No obstante, el uso de información SAR presenta limitaciones que deben considerarse. La señal tiende a saturarse en coberturas altas de caña, reduciendo la sensibilidad en etapas avanzadas de desarrollo. Además, la retrodispersión puede verse afectada por la humedad asociada a riegos o eventos de precipitación, lo que incrementa el riesgo de sobreestimar el rendimiento. Para mitigar este efecto se incluyeron variables de precipitación acumulada, aunque su influencia no se elimina por completo y constituye un aspecto a profundizar en trabajos posteriores. Asimismo, aunque la división del dataset garantizó un balance entre años y zonas, la

validación y funcionamiento del modelo se restringe a las tres variedades utilizadas en el entrenamiento.

En conjunto, los resultados deben interpretarse como un avance significativo pero aún parcial hacia modelos predictivos robustos en caña de azúcar. Futuros trabajos deberán ampliar la validación a más variedades y ciclos productivos, así como integrar nuevas fuentes de información que reduzcan los efectos de saturación y confusión de la señal.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña) por el apoyo institucional y la orientación técnica en el desarrollo de este trabajo. Mi gratitud al Ingenio Providencia por la provisión de datos, fundamentales para la construcción y validación del modelo. Asimismo, reconozco a la Maestría en Ciencia de Datos de la Universidad Icesi por el acompañamiento académico y metodológico que hizo posible integrar la ciencia de datos y la teledetección en este estudio. Finalmente, extiendo mi agradecimiento a los asesores y colegas que contribuyeron con sus aportes para enriquecer este proceso investigativo.

REFERENCIAS

Asocaña. (2022). Informe Anual del Sector Azucarero en Colombia. Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia.

Baghdadi, N., Cresson, R., Todoroff, P., Moinet, J., & Bailly, J. S. (2009). Multitemporal observations of sugarcane by TerraSAR-X images. Remote Sensing of Environment, 113(8), 1721–1731.

Canata, T. F., Wei, M. C. F., Maldaner, L. F., & Molin, J. P. (2021). Sugarcane yield mapping using high-resolution imagery data and machine learning technique. Remote Sensing, 13(2), 232.

Das, A., Kumar, M., Kushwaha, A., Dave, R., Dakhore, K. K., Chaudhari, K., & Bhattacharya, B. K. (2023). Machine learning model ensemble for predicting sugarcane yield through synergy of optical and SAR remote sensing. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 30, 100962.

Den Besten, N., Dunne, S. S., Mahmud, A., Jackson, D., Aouizerats, B., de Jeu, R., ... & van der Zaag, P. (2021a). Understanding Sentinel-1 backscatter response to sugarcane yield variability and waterlogging. Remote Sensing of Environment, 290, 113555.

Fulton, J. P., & Port, K. (2018). Yield monitors: History, performance, and current trends. Computers and Electronics in Agriculture, 152, 124–139.

McNairn, H., & Brisco, B. (2004). The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: A review. Canadian Journal of Remote Sensing, 30(3), 525–542.

Molijn, R. A., Iannini, L., Vieira Rocha, J., & Hanssen, R. F. (2019). Sugarcane productivity mapping through C-band and L-band SAR and optical satellite imagery. Remote Sensing, 11(9), 1109.

Zhu, L., Liu, X., Wang, Z., & Tian, L. (2023). High-precision sugarcane yield prediction by integrating 10-m Sentinel-1 VOD and Sentinel-2 GRVI indexes. European Journal of Agronomy, 149, 126889.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Estimación del rendimiento agrícola en caña de azúcar mediante índices de vegetación derivados de Sentinel-2

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimating agricultural yield in sugarcane using vegetation indices derived from Sentinel-2

Karen Vanessa Rodríguez Solano[1]*, Samir Darío Vélez Ruiz[1], Juan José Martínez Espinosa[1], Enrique Alejandro Torres Prieto[1], Oscar Mauricio Vélez Terranova[2]

Palabras clave:
Etapa fenológica
Modelos estadísticos
Rendimiento agrícola
Variables regresoras.

RESUMEN

La estimación del rendimiento en caña de azúcar es compleja por la variabilidad de suelo, prácticas agrícolas y clima en el Valle del Cauca. Este estudio, realizado en dos haciendas de Palmira (2019–2022), evaluó índices de vegetación de Sentinel-2 en dos etapas fenológicas (3–5 y 7–9 meses). Tras análisis de correlación de Pearson, se compararon modelos estadísticos OLS y LMM; este último mostró mejor desempeño, con el NDVI más predictivo en fases tempranas y el EVI como estabilizador en etapas avanzadas. Los resultados confirman la utilidad de la teledetección y la modelación estadística para estimaciones robustas de rendimiento.

Keywords:
Phenological stage
Statistical models
Agricultural yield
Regressor variables

ABSTRACT

Sugarcane yield estimation is complex due to the variability of soil, agricultural practices, and climate in the Cauca Valley. This study, conducted on two farms in Palmira (2019–2022), evaluated Sentinel-2 vegetation indices at two phenological stages (3–5 and 7–9 months). After Pearson correlation analyses, the OLS and LMM models were compared; the latter showed better performance, with NDVI being more predictive in the early stages and EVI acting as a stabilizer in the later stages. The results confirm the usefulness of remote sensing and statistical modeling to obtain robust yield estimates.

[1]Semillero de Investigación Agroinnovación Tecnológica para la Sostenibilidad de los Recursos Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. karodriguezs@unal.edu.co; savelezr@unal.edu.co; jumartinezes@unal.edu.co; eatorresp@unal.edu.co;
[2]Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. ovelez@unal.edu.co
*Corresponding author: karodriguezs@unal.edu.co

CC BY NC SA

El monitoreo y predicción del rendimiento agrícola constituyen un desafío clave en la agricultura moderna, especialmente para cultivos de alto valor como la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Esto se debe a la influencia de múltiples factores como el clima, el manejo agronómico y agrícola y las características del suelo. Por ende, contar con herramientas que permitan estimar el rendimiento de forma anticipada facilita la planificación, gestión e identificación temprana de suertes con bajo desempeño, lo cual posibilita implementar medidas correctivas oportunas que beneficien al sistema agrícola.

En el Valle del Cauca, la caña de azúcar representa un sector estratégico para la industria regional y nacional, pues genera más de 280.000 empleos directos e indirectos y aporta al PIB agrícola (Procaña, 2022). En este contexto, la agricultura de precisión basada en indicadores biofísicos y espectrales ofrece ventajas frente a métodos convencionales que suelen ser destructivos, costosos y de representatividad limitada.

Sin embargo, la estimación temprana del rendimiento agrícola enfrenta limitaciones asociadas tanto al entorno del cultivo como a la calidad de los datos y las tecnologías disponibles. Un factor importante es la variabilidad en el cultivo como el riego, la nutrición o el desarrollo fenológico que implica que sea más complejo la parametrización de las variables (de França e Silva et al., 2024). Además, los sensores satelitales pueden verse afectados por otras condiciones como la nubosidad en la zona que interviene en la obtención de datos (Aklilu Tesfaye & Gessesse Awoke, 2021).

En este marco, este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de los índices de vegetación obtenidos mediante imágenes multiespectrales derivadas del satélite Sentinel-2, en un cultivo de caña de azúcar en Palmira, Valle del Cauca. Asimismo, identificar los índices más adecuados para la estimación y correlacionar los valores obtenidos con los datos reales del rendimiento del cultivo y los modelos empleados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El estudio se realizó en dos haciendas cañicultoras de Palmira (Valle del Cauca, Colombia) el período de análisis estuvo comprendido entre entre los años 2019 y 2022, permitiendo evaluar diferentes ciclos. Las haciendas abarcan un área de 1268 hectáreas sembradas en caña de azúcar.

Datos de rendimiento agrícola e información satelital

Los registros de rendimiento (TCH) fueron suministrados por las haciendas para los ciclos 2019–2022. Se usaron 115 escenas Sentinel-2 obtenidas en Google Earth Engine (GEE), aplicando una máscara para excluir píxeles con nubosidad o sombras y conservar sólo los libres de nubes.

Cálculo de índices de vegetación

De las imágenes Sentinel-2 se calcularon tres índices de vegetación con bandas B2, B3, B4 y B8 (10 m de resolución), ampliamente usados en caña de azúcar (García et al., 2017; Mulianga et al., 2013; Rahman & Robson, 2020; Som-ard et al., 2024). El valor medio por suerte se obtuvo en GEE usando solo píxeles internos y un buffer de 10 m para evitar efectos de borde (ver Tabla 1).

Tabla 1. Índices de vegetación calculados.

Índice de vegetación	Fórmula
NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)	$\frac{B8 - B4}{B8 + B4}$
GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde)	$\frac{B8 - B3}{B8 + B3}$
EVI (índice de vegetación mejorado)	$\frac{B8 - B4}{B8 + 6 + B4 - 7{,}5 * B3 + 1}$

Nota. B2(Blue), B3 (Green), B4 (Red) y B8 (Near Infrared)

Información de climática

Los datos de precipitación acumulada se obtuvieron de las estaciones de Cenicaña (Palmira, San José y Aeropuerto) en las zonas Centro Oriente y Centro Occidente del Valle del Río Cauca.

Momentos de análisis

En la caña de azúcar, la etapa de macollamiento ocurre entre los 45 y 120 días, cuando la planta usa sus reservas de sacarosa para emitir nuevos tallos, su crecimiento es lento. Luego, entre los 4 y 10 meses, inicia el rápido crecimiento. Con base en ello, se definieron dos momentos de análisis: 1 (3–5 meses) y 2 (7–9 meses), debido a su relevancia fisiológica.

Selección de variables regresoras

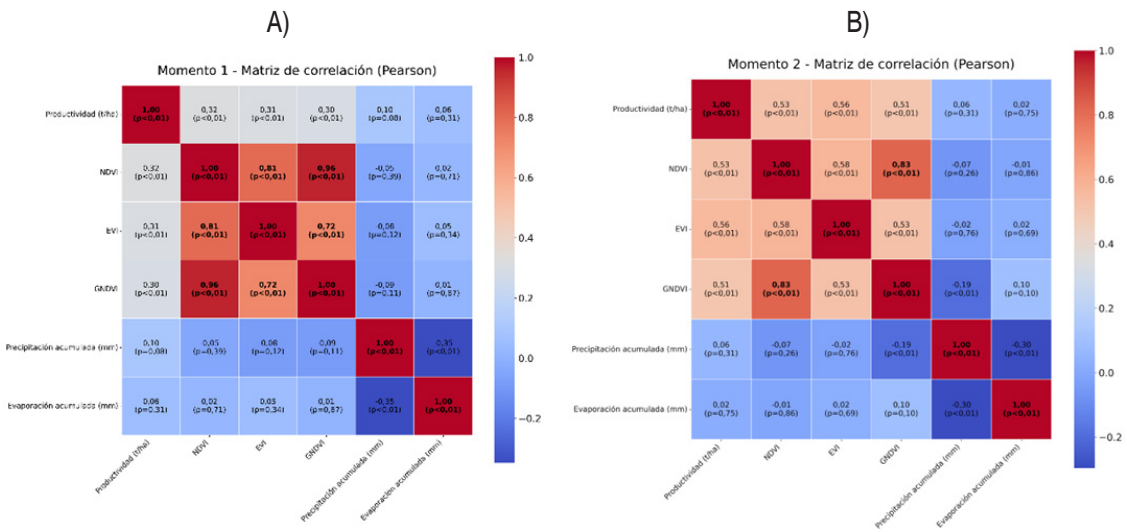
Se aplicó un análisis de correlación de Pearson entre índices de vegetación e información climática en ambos momentos, con el fin de reducir multicolinealidad y fortalecer la robustez del modelo (Akbarian et al., 2022). Se filtraron variables con $|r| \geq 0{,}70$, eliminando redundantes, y se descartaron aquellas sin correlación significativa con el rendimiento ($p>0{,}05$).

Estimación de la productividad

Se ajustaron dos modelos estadísticos con el fin de estimar el rendimiento agrícola en caña de azúcar, para cada uno de los momentos fenológicos: modelo de regresión lineal por mínimos ordinarios (OLS) y un modelo lineal mixto (LMM). Los índices de vegetación y variables climáticas se consideraron efectos fijos, mientras que las suertes anidadas en cada hacienda fueron el efecto aleatorio. Ambos modelos se validaron en RStudio con validación cruzada de 10 pliegues y su desempeño se evaluó con R^2, R^2 ajustado y MAE.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el momento 1, el NDVI mostró mayor correlación con el rendimiento, mientras que la precipitación acumulada no fue significativa ($p>0{,}05$), y se descartó. En el momento 2, se eligieron NDVI y EVI como regresores por su mayor relación con la productividad. (ver Figura 1).



Nota. A) Matriz de Pearson (momento 1). B) Matriz de Pearson (Momento 2)

Figura 1. Matrices de Pearson para las variables regresoras.

Se evidenció que el LMM superó al modelo OLS en ambos momentos fenológicos del cultivo (ver Figura 2). En la etapa intermedia (momento 1), el LMM alcanzó un R^2 de 0.87 y un R^2 ajustado de 0,86, mientras que en la etapa avanzada (momento 2) obtuvo un R^2 igual a 0,83 y un R^2 ajustado de 0,81. La cercanía entre el R^2 y R^2 ajustado indica que los modelos son estadísticamente robustos y no presentaron sobreajuste.

Los resultados mostraron diferencias en el desempeño de los índices según el modelo y el momento fenológico. En el momento 1, el NDVI explicó el 87% de la variabilidad

del rendimiento con un error menor a 12 t/ha mediante el LMM (R^2=0,87; RMSE=11,7 t/ha). Este hallazgo coincide con Khosravirad et al. (2019), quienes reportaron un R^2=0,74 al usar NDVI en etapas iniciales, lo que confirma la relevancia de estas fases para estimar el rendimiento agrícola.

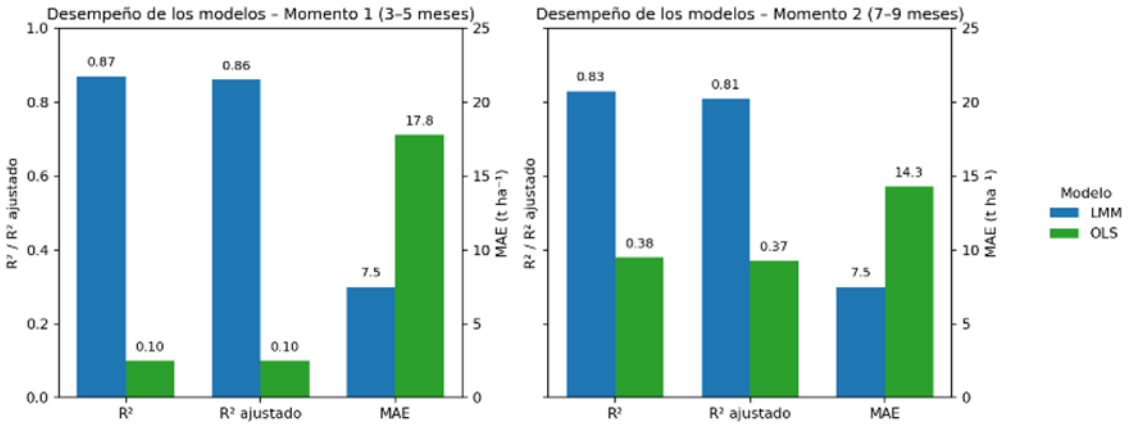


Figura 2. Desempeño de los modelos LMM y OLS.

En general, la etapa de 3 a 5 meses ofreció mejores condiciones para estimar el rendimiento por su mayor variabilidad espectral entre suertes. Este resultado contrasta con Akbarian et al. (2022), quienes identificaron las fases de crecimiento rápido como más óptimas, al mostrar mejor desempeño.

En el momento 2 se incorporó el EVI junto con el NDVI, logrando un ajuste alto en el LMM (R^2=0,83; RMSE=11,3 t/ha), aunque sin superar la etapa temprana. Esta limitación se asocia a la saturación del NDVI en fases de alta densidad, como han señalado Akbarian et al. (2023) y García et al. (2017). El EVI, menos sensible a este efecto, estabilizó el modelo, en concordancia con Das et al. (2023). Pese a la reducción de sensibilidad espectral por la estabilidad del dosel, esta fase sigue siendo útil para predicciones previas a la cosecha. Así lo evidencian Rahman & Robson (2020), quienes lograron R^2=0,87 con GNDVI dos meses antes de la cosecha; Singla et al. (2020), que identificaron el "grand growth stage" como el más informativo (R^2=0,94); y Jamnani et al. (2020), quienes alcanzaron R^2=0,81 usando promedios de fases finales con redes neuronales.

CONCLUSIÓN

Los índices de vegetación derivados del Sentinel-2 resultaron útiles para estimar el rendimiento de caña de azúcar, destacando el NDVI en fases tempranas y el EVI en etapas avanzadas, donde contribuye a evitar la saturación y estabilizar los modelos. La etapa fenológica del cultivo es un factor importante a tener en cuenta al momento de realizar una estimación del rendimiento agrícola, la fase vegetativa temprana mostró mayor precisión debido a la variabilidad espectral entre suertes.

El modelo lineal mixto (LMM) ofreció un mayor desempeño, es decir, tiene mejor capacidad de capturar la variabilidad de la respuesta espectral del cultivo, permitiendo el mejor ajuste de los datos al modelo. El estudio confirma la importancia de la teledetección en la agricultura de precisión, especialmente en cultivos de alto valor como la caña de azúcar, al mejorar su planificación, monitoreo y sostenibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al semillero de investigación Agroinnovación Tecnológica para la sostenibilidad de los Recursos Naturales por su colaboración técnica y metodológica durante el desarrollo de este trabajo. Extiendo mis agradecimientos a las personas que apoyaron en la recolección, procesamiento y análisis de datos, así como a las haciendas por suministrar la información necesaria para este estudio.

REFERENCIAS

Akbarian, S., Xu, C., Wang, W., Ginns, S., & Lim, S. (2022). Sugarcane yields prediction at the row level using a novel cross-validation approach to multi-year multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*, *198*, 107024. https://doi.org/10.1016/j.

compag.2022.107024

Akbarian, S., Xu, C., Wang, W., Ginns, S., & Lim, S. (2023). An investigation on the best-fit models for sugarcane biomass estimation by linear mixed-effect modelling on unmanned aerial vehicle-based multispectral images: A case study of Australia. Information Processing in Agriculture, 10(3), 361–376. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.03.005

Aklilu Tesfaye, A., & Gessesse Awoke, B. (2021). Evaluation of the saturation property of vegetation indices derived from sentinel-2 in mixed crop-forest ecosystem. Spatial Information Research, 29(1), 109–121. https://doi.org/10.1007/s41324-020-00339-5

Cenicaña. (2024, July). Consultas en línea a la base de datos de la RMA. Meteoportal. https://www.cenicana.org/apps/meteoportal/public/informacion_diaria

Das, A., Kumar, M., Kushwaha, A., Dave, R., Dakhore, K. K., Chaudhari, K., & Bhattacharya, B. K. (2023). Machine learning model ensemble for predicting sugarcane yield through synergy of optical and SAR remote sensing. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 30, 100962. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100962

de França e Silva, N. R., Chaves, M. E. D., Luciano, A. C. dos S., Sanches, I. D., de Almeida, C. M., & Adami, M. (2024). Sugarcane Yield Estimation Using Satellite Remote Sensing Data in Empirical or Mechanistic Modeling: A Systematic Review. Remote Sensing, 16(5), 863. https://doi.org/10.3390/rs16050863

García, C. E., Montero, D., Soto, M. A., & Valencia, J. M. (2017). Estimación de productividad en caña de azúcar desde la percepción remota. In Análisis Geográficos (Issue 53). https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/analisis_geograficos_53_2017.pdf

Jamnani, M. R., Liaghat, A., & Loyeh, S. (2020). Sugarcane yield prediction at farm scale using remote sensing and artificial neural network. Water Utility Journal, 24, 1–10.

Khosravirad, M., Omid, M., Sarmadian, F., & Hosseinpour, S. (2019). PREDICTING SUGARCANE YIELDS IN KHUZESTAN USING A LARGE TIME-SERIES OF REMOTE SENSING IMAGERY REGION. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W18, 645–648. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-645-2019

Mulianga, B., Bégué, A., Simoes, M., & Todoroff, P. (2013). Forecasting Regional Sugarcane Yield Based on Time Integral and Spatial Aggregation of MODIS NDVI. Remote Sensing, 5(5), 2184–2199. https://doi.org/10.3390/rs5052184

Procaña. (2022, November 21). Contribución de la Agroindustria de la caña de azúcar en nuestra región. Procaña. https://procana.org/site/contribucion-de-la-agroindustria-de-la-cana-de-azucar-en-nuestra-region/

Rahman, M. M., & Robson, A. (2020). Integrating Landsat-8 and Sentinel-2 Time Series Data for Yield Prediction of Sugarcane Crops at the Block Level. Remote Sensing, 12(8), 1313. https://doi.org/10.3390/rs12081313

Singla, S. K., Garg, R. D., & Dubey, O. P. (2020). Ensemble Machine Learning Methods to Estimate the Sugarcane Yield Based on Remote Sensing Information. Revue d'Intelligence Artificielle, 34(6), 731–743. https://doi.org/10.18280/ria.340607

Som-ard, Jaturong., Immitzer, Markus., Vuolo, Francesco., & Atzberger, Clement. (2024). Sugarcane yield estimation in Thailand at multiple scales using the integration of UAV and Sentinel-2 imagery. Precision Agriculture, 25(3), 1581–1608. https://doi.org/10.1007/s11119-024-10124-1

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Estimación de la biomasa en pasturas mediante índices de vegetación derivados de imágenes multiespectrales

Estimation of biomass in grasslands using vegetation indices derived from multispectral imagery

Juan José Martinez Espinosa[1]*, Samir Darío Vélez Ruiz[1], Enrique Alejandro Torres Prieto[1], Oscar Mauricio Vélez Terranova[1] and Raúl Andrés Molina Benavides[1]

Palabras clave:
Altura del pasto
Biomasa
Ganadería de precisión
Índices de vegetación

RESUMEN

Este estudio evaluó el potencial de índices de vegetación derivados de imágenes multiespectrales obtenidas con vehículos aéreos no tripulados (VANT) para estimar la biomasa y la altura en sistemas pastoriles. Se analizaron diferentes etapas de descanso del pasto, encontrándose una correlación significativa entre los índices NDRE y CLrg con las variables biofísicas evaluadas. Los resultados demuestran que estos índices, al no presentar colinealidad entre sí, constituyen predictores consistentes y precisos de la disponibilidad de forraje. Asimismo, la aplicación de modelos lineales mixtos (LMM) mejoró la capacidad predictiva frente a modelos ordinarios (OLS), considerando la heterogeneidad de los potreros. Este enfoque permite optimizar la planificación ganadera mediante un ajuste más adecuado de la carga animal en función del estado de recuperación del pasto, favoreciendo la eficiencia productiva y el manejo sostenible de praderas en sistemas lecheros tropicales.

Keywords:
Pastures height
Biomass
Precision livestock
Vegetation indices

ABSTRACT

This study evaluated the potential of vegetation indices derived from multispectral images obtained with unmanned aerial vehicles (UAVs) to estimate biomass and height in pastoral systems. Different stages of pasture fallow were analyzed, and a significant correlation was found between the NDRE and CLrg indices and the biophysical variables evaluated. The results demonstrate that these indices, since they do not present collinearity with each other, constitute consistent and accurate predictors of forage availability. Furthermore, the application of linear mixed models (LMMs) improved their predictive capacity compared to ordinary models (OLS), considering pasture heterogeneity. This approach allows for optimized livestock planning by more appropriately adjusting stocking rates based on pasture recovery status, promoting productive efficiency and sustainable pasture management in tropical dairy systems.

[1]Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. jumartinezes@unal.edu.co; savelezr@unal.edu.co; eatorresp@unal.edu.co ovelez@unal.edu.co; ramolinab@unal.edu.co
*Corresponding author: jumartinezes@unal.edu.co

Conocer la disponibilidad forrajera por área es esencial para ajustar la carga animal y planificar la rotación de praderas, contribuyendo a prevenir el sobrepastoreo y la degradación del suelo (Vahidi et al., 2023). La estimación de biomasa, en este sentido, constituye un componente clave para la sostenibilidad ganadera y la conservación de los recursos forrajeros. Los métodos tradicionales, como el corte, secado y pesado o el uso de dispositivos manuales, presentan limitaciones importantes: son costosos, demandan gran cantidad de mano de obra y ofrecen baja cobertura espacial y temporal, lo que reduce su eficiencia en sistemas ganaderos extensivos. Frente a estas restricciones, los sensores remotos y los índices de vegetación (IV) se han consolidado como alternativas eficaces para la estimación de biomasa en la última década (Bazzo et al., 2023).

En particular, los vehículos aéreos no tripulados (VANT) equipados con sensores multiespectrales proporcionan datos de alta resolución y permiten monitoreos frecuentes en condiciones de terreno heterogéneo. Estudios recientes han confirmado la utilidad de la teledetección en la evaluación forrajera, resaltando al NDVI como un índice de alto desempeño en sistemas pastoriles (Díaz Giraldo et al., 2021, 2024). En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo estimar la biomasa en pasturas mediante índices de vegetación derivados de imágenes capturadas con VANT.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El estudio se realizó en la finca Mi Lucha (ML), un sistema productivo ubicado en la vereda El Mesón, con coordenadas 3°29´41.85" N y 76°11´19.22" W, corregimiento de La Buitrera, municipio de Palmira, Valle del Cauca – Colombia (Figura 1), a una altura de 1587 ms.n.m., con precipitaciones anuales de 2100 mm, temperatura ambiente promedio de 24 °C. El predio consta de 14 hectáreas totales, dedicadas a la actividad ganadera bovina orientada a la producción de leche especializada, con animales de las razas ayrshire, gyrolando, jersey, entre otras. La pastura principal es el pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*), manejada rotacionalmente mediante cerca eléctrica, con periodos de ocupación de un día y periodos de descanso de 24 días.

Imágenes multiespectrales

Se utilizó una cámara MicaSense® RedEdge-MX™ de cinco bandas (azul, verde, rojo, borde rojo y NIR) acoplada a un VANT DJI Matrice 200 Series 2. El vuelo se realizó entre las 11:30 a.m. y 12:30 m, con corrección radiométrica previa mediante panel de calibración MicaSense®. El plan de vuelo se programó en DJI Pilot, fijando una altura de 120 m, resolución espacial de 7 cm²/píxel, traslape del 80% y velocidad de 6 m/s. Con el software Agisoft Metashape Pro® se realizó el ortomosaico (Figura 1) y en QGIS 3.38.2® se calcularon 10 IV (NDVI, GNDVI, NDRE, RVI, GCI, SR, CLG, CLrg, EVI y VARI), comúnmente empleados en estimación de biomasa (Figura 3).

Variables biofísicas

Se realizó un muestreo en tres potreros destinados al pastoreo, considerando distintos periodos de descanso: i) un día después del pastoreo; ii) doce días después; y iii) un día antes del siguiente pastoreo (24 días después del pastoreo). En cada potrero se seleccionaron 20 puntos de muestreo, georreferenciados con un GPS Garmin (GPSMAP 66s), señalados con estacas y globos de látex (Figura 2) para facilitar su identificación en las imágenes.

En cada punto de muestreo se delimitó un área de 0,25 m² mediante un marco (Figura 2), donde se midió la altura de las plantas (cm) y la biomasa húmeda (g/m²). La altura se determinó con una regla desde la base hasta la canopia, mientras que las muestras de biomasa húmeda se cortaron a 10 cm del suelo, de acuerdo con su hábito de crecimiento. Estudios recientes indican que el pastoreo rotacional, al dejar alrededor de 15 cm de forraje residual, mejora la recuperación y productividad frente al pastoreo continuo (Williams et al., 2019). Las muestras recolectadas se pesaron en una balanza digital OHAUS. De cada muestra se obtuvo una submuestra de 200 g, llevada al horno de aire forzado a 60 °C durante 72 h, para calcular la materia seca (MS) a partir de la diferencia entre peso verde y peso seco.

Selección de variables

Se aplicó un análisis de correlación de Pearson entre los índices de vegetación (IV) para identificar colinealidad. Aquellos con $r \geq 0,7$ fueron considerados redundantes y se descartaron, conservando solo el que

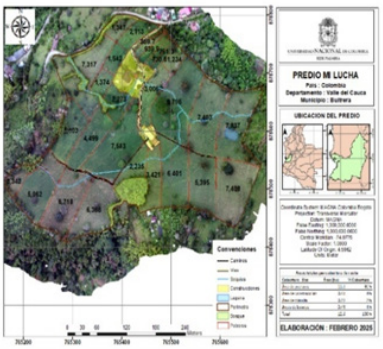


Figura 1. Mapa de la finca estudiada, Mi Lucha

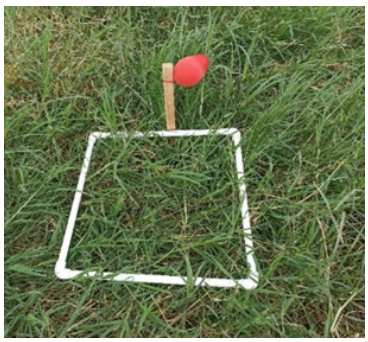


Figura 2. Puntos de muestreo mediante la ubicación de estacas de madera y bombas de látex.

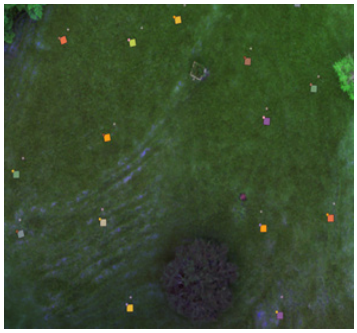


Figura 3. Muestra de imágenes desde QGIS en el ortomosaico multiespectral, del cual se extrajeron los IV.

mostró mayor correlación con altura y biomasa. Este procedimiento permitió reducir variables y minimizar el riesgo de sobreajuste en los modelos.

Estimación de biomasa y altura

La estimación de variables biofísicas se realizó mediante regresión lineal, utilizando mínimos cuadrados (OLS) y modelos de efectos mixtos (LMM), considerando el potrero (A, B y C) como efecto aleatorio para capturar la variabilidad intra e inter-pastoreo. Los datos se dividieron en 70% para entrenamiento y 30% para validación, complementando este procedimiento con una validación cruzada de 5-fold para garantizar mayor robustez en la evaluación de los modelos. El desempeño de los modelos se evaluó con R^2, R^2 ajustado y RMSE.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables seleccionadas

Los índices de vegetación NDRE y CLrg (basados en información espectral capturada en las bandas NIR y Red Edge) no evidenciaron codependencia entre sí, lo que sugiere que capturan información complementaria del estado de la vegetación. Además, ambos índices presentaron correlaciones significativas con las variables de altura y biomasa, lo que indica su potencial utilidad como predictores en el monitoreo de praderas (Figura 4).

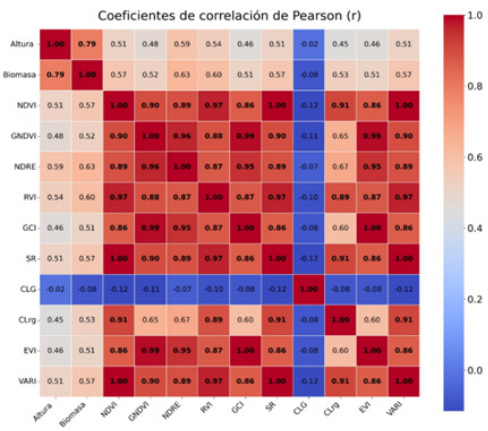


Figura 4. Coeficiente de correlación de Pearson (r).

Lo anterior concuerda con lo reportado (Guerini Filho et al., 2020) por quienes encontraron correlación positiva entre las bandas NIR y Red Edge con la biomasa en pasturas, debido a que estas reflejan el vigor y la estructura foliar, por lo que su incremento se asocia a mayor biomasa verde.

Estimación de biomasa y altura

Los modelos lineales mixtos (LMM) presentaron un mejor ajuste en comparación con los modelos de regresión lineal ordinaria (OLS) para ambas variables analizadas. En el caso de la biomasa, el modelo LMM alcanzó un coeficiente de determinación igual a 0.53 y un RMSE de

80,4 g/m², mejorando el ajuste respecto al modelo OLS (R^2=0,42, RMSE=89,2 g/m²). Para la variable altura, el modelo LMM también superó al OLS con un R^2=0,59 y un RMSE de 8,0 cm, frente a un R^2=0,32 y un RMSE de 10,3 cm del modelo OLS (Tabla 1). Un comportamiento similar fue registrado por el estudio desarrollado por (Akbarian et al., 2023) , en el cual las métricas de desempeño reportadas para los modelos de efectos mixtos fueron superiores a las del modelo de regresión lineal múltiple en la estimación de biomasa húmeda (verde) en caña de azúcar.

Tabla 1. Resultados de los modelos de regresión.

Variable	Modelo	R^2	R^2 adj	RMSE
Biomasa (g/m²)	OLS	0,42	0,32	89,2
	LMM	0,53	0,45	80,4
Altura (cm)	OLS	0,32	0,21	10,3
	LMM	0,59	0,52	8,0

Estos resultados demuestran que incorporar el potrero como efecto aleatorio permite capturar la variabilidad asociada a las condiciones propias de cada unidad experimental, efecto que el modelo OLS no considera. Este hallazgo coincide con lo reportado por (Chen et al., 2021), quienes evaluaron la relación entre el índice NDVI y la biomasa de pasto mediante un modelo de regresión lineal, explicando hasta un 39 % de la variabilidad de la biomasa en pasturas (R^2 = 0,39).

Discusión

Este estudio coincide con trabajos previos que destacan la eficacia de los índices NDRE y CLrg en la estimación de biomasa en sistemas pastoriles. (Guerini Filho et al. 2020) reportan que las bandas NIR y Red Edge muestran alta correlación con la estructura foliar, lo cual concuerda con los resultados aquí obtenidos. Además, la superioridad de los modelos lineales mixtos (LMM) sobre los modelos ordinarios (OLS) respalda lo planteado por (Chen et al. 2021), quienes demostraron que incluir efectos aleatorios mejora la capacidad predictiva en cultivos heterogéneos. En este estudio, considerar el potrero como efecto aleatorio permitió capturar la variabilidad espacial entre unidades experimentales. Aunque (Chen et al. 2021) encontraron que el NDVI explica un 39% de la variabilidad de la biomasa, los resultados de este trabajo evidencian que índices como NDRE y CLrg pueden superar dicho desempeño en condiciones tropicales. Esto resalta la necesidad de seleccionar IV no solo por su uso frecuente, sino por su relevancia biofísica y su independencia estadística.

CONCLUSIÓN

Los índices de vegetación derivados de imágenes multiespectrales resultaron efectivos para estimar biomasa y altura en sistemas pastoriles, mostrando un aumento progresivo con el tiempo de descanso de los potreros y alcanzando el mayor valor en la etapa de 24 días. NDRE y CLrg se confirmaron como predictores consistentes y no redundantes, al presentar baja colinealidad y correlaciones significativas con biomasa (R^2 = 0,63 y 0,53) y altura (R^2 = 0,59 y 0,45).

Estos resultados aportan información útil para la planificación ganadera, ya que permiten ajustar la carga animal por hectárea según la etapa de descanso, incrementando la eficiencia productiva del sistema lechero. En este sentido, el uso de índices de vegetación en fases avanzadas de recuperación de las praderas constituye una herramienta clave para maximizar la disponibilidad y calidad del forraje, al mismo tiempo que se promueve un manejo sostenible de los pastizales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los propietarios de la finca *Mi Lucha* por permitir la realización de los vuelos con dron y la recolección de muestras en sus potreros. Igualmente, se reconoce el apoyo a los compañeros Francy Zorayda Gómez Balanta, Mayra Elizabeth Tenganan Chacua y Jhon Alan Rendón López por su valiosa colaboración en el proceso de muestreo. Finalmente, se agradece a la Universidad Nacional de Colombia por brindar los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

Akbarian, S., Xu, C., Wang, W., Ginns, S., & Lim, S. (2023). An investigation on the best-fit models for sugarcane biomass estimation by linear mixed-effect modelling on unmanned aerial vehicle-based multispectral images: A case study of Australia. Information Processing in Agriculture, 10(3). https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.03.005

Bazzo, C. O. G., Kamali, B., Hütt, C., Bareth, G., & Gaiser, T. (2023). A Review of Estimation Methods for Aboveground Biomass in Grasslands Using UAV. Remote Sensing, 15(3), 639. https://doi.org/10.3390/rs15030639

Chen, Y., Guerschman, J., Shendryk, Y., Henry, D., & Harrison, M. T. (2021). Estimating pasture biomass using sentinel-2 imagery and machine learning. Remote Sensing, 13(4). https://doi.org/10.3390/rs13040603

Díaz Giraldo, R. A., Álvarez de León, M., & Pérez López, O. (2021). Uso de sensores remotos en la determinación del forraje disponible de Urochloa humidicola cv. Llanero bajo pastoreo en la Altillanura colombiana. Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales, 9(3). https://doi.org/10.17138/tgft(9)376-382

Díaz Giraldo, R. A., Álvarez de León, M., Pérez López, O., Gutiérrez Parrado, S. L., & Arango Argoti, M. A. (2024). Aplicación de dos modelos basados en teledetección para estimar la producción primaria neta aérea en un sistema pastoril en la Altillanura colombiana. Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales, 12(1). https://doi.org/10.17138/tgft(12)24-35

Guerini Filho, M., Kuplich, T. M., & Quadros, F. L. F. D. (2020). Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. International Journal of Remote Sensing, 41(8). https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1697004

Vahidi, M., Shafian, S., Thomas, S., & Maguire, R. (2023). Pasture Biomass Estimation Using Ultra-High-Resolution RGB UAVs Images and Deep Learning. Remote Sensing, 15(24), 5714. https://doi.org/10.3390/rs15245714

Williams, C. A., Kenny, L. B., & Burk, A. O. (2019). Effects of grazing system, season, and forage carbohydrates on glucose and insulin dynamics of the grazing horse. Journal of Animal Science, 97(6). https://doi.org/10.1093/jas/skz103

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Estimación de la producción de café mediante visión artificial: una propuesta alternativa a los métodos tradicionales de pronóstico

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimating coffee production using computer vision: an alternative approach to traditional forecast methods

Camilo Alberto Calle Velásquez[1], Iván Darío Aristizábal Torres[2] and Edilson Leon Moreno Cardenas[2]

Palabras clave:
Caficultura
Digitalización rural
Estimación de producción
Pronóstico agrícola
Visión artificial

RESUMEN

Este trabajo presenta una propuesta metodológica basada en visión artificial como alternativa a los métodos tradicionales de pronóstico de producción de café cereza a nivel de finca. A partir de imágenes de una muestra de frutos y de una ortofoto, se estimaron tres variables clave: número de árboles, número de frutos y peso promedio del fruto. Estas variables se integraron en un modelo inicial de estimación anticipada de cosecha de un lote de café, diseñado para superar las limitaciones de los métodos convencionales, que, al basarse en proyecciones estadísticas, resultan poco sensibles a la variabilidad real en campo. Aunque el modelo no ha sido validado completamente, logró estimar la producción (kg de café cereza) con un error relativo promedio del 16,5 %. Este método ofrece una alternativa frente a las restricciones de precisión, costo y aplicabilidad de los enfoques tradicionales, y plantea un camino prometedor para adaptar los sistemas de pronóstico agrícola a los avances en sensado remoto, digitalización predial y análisis visual automatizado, empleando equipos sencillos y un sistema computacional de bajo costo basado en visión artificial.

Keywords:
Coffee farming
Rural digitization
Yield production
Agricultural forecasting
Computer vision

ABSTRACT

This study presents a methodological proposal based on computer vision as an alternative to traditional methods for forecasting coffee cherry production at the farm level. Using images from a sample of fruits and an orthophoto, three key variables were estimated: trees number, fruits number, and mean fruit weight. These variables were integrated into an initial early yield estimation model for a coffee plot, designed to overcome the limitations of conventional methods, which, by relying on statistical projections, are often insensitive to actual field variability. Although the model has not yet been fully validated, it was able to estimate production (kg of coffee cherries) with a mean relative error of 16.5%. This approach offers an alternative to the precision, cost, and applicability constraints of traditional methods, and suggests a promising path for adapting agricultural forecasting systems to advances in remote sensing, farm-level digitalization, and automated visual analysis, using simple equipment and a low-cost computer vision-based system.

[1]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ccallev@unal.edu.co
[2]Facultad de Ciencias Agrarias, Depto. de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. idaristi@unal.edu.co; elmorenoc@unal.edu.co

CC BY NC SA

Los modelos tradicionales de pronóstico de producción en caficultura se han basado históricamente en extrapolaciones estadísticas a partir de variables climáticas, promedios históricos de producción o estimaciones subjetivas de los productores. Aunque estos enfoques han sido ampliamente utilizados, presentan limitaciones importantes para capturar la heterogeneidad intra-predial —es decir, las variaciones locales dentro de una misma finca— y para responder adecuadamente a cambios microambientales que afectan el desarrollo y maduración del fruto (Bazame et al, 2021, Ariza et al, 2021, Kittichotsatsawat et al, 2022). Esta limitada capacidad de adaptación reduce la precisión de los pronósticos, particularmente en regiones montañosas con alta diversidad edafoclimática, como muchas zonas cafeteras de Colombia. En este contexto, la creciente disponibilidad de herramientas de sensado remoto, (Mulla et al, 2013), cámaras de alta resolución y dispositivos móviles (Palacio et al, 2024), abre nuevas oportunidades para aplicar visión artificial en la generación de estimaciones más precisas, objetivas y explicables sobre el comportamiento productivo de los cultivos (Abreu et al., 2022, Johnson et al, 2022). Sin embargo, la adopción de enfoques basados en inteligencia artificial enfrenta retos en zonas rurales del país, debido a la baja conectividad, el acceso limitado a infraestructura computacional avanzada y la escasez de grandes volúmenes de datos etiquetados de calidad, (Lobell, et al, 2020). Ante esta realidad, en este trabajo se presentan resultados preliminares obtenidos con un modelo inicial de estimación de producción fundamentada exclusivamente en variables visuales observables, extraídas mediante técnicas de visión artificial aplicadas a imágenes de campo. Este enfoque se plantea como una alternativa intermedia entre los métodos convencionales y las aproximaciones de aprendizaje profundo, al ofrecer una solución de bajo costo computacional, explicable y adaptable a las condiciones rurales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la finca Montenegro (2,1 ha), ubicada en la vereda Morro Amarillo, Jardín (Antioquia, Colombia). Se delimitaron parcelas experimentales y se tomaron imágenes georreferenciadas de árboles jóvenes (4–6 meses desde su renovación) y en etapa productiva. El modelo propuesto estima la producción de un lote semanas antes de la cosecha a partir de: (i) número total de árboles, (ii) peso medio individual de frutos y (iii) número total de frutos por árbol. Debido a la alta variabilidad productiva entre árboles (desde pocos frutos hasta más de 3.500), un muestreo aleatorio requeriría más de 800 individuos, lo cual es poco práctico. Por ello, se optó por un muestreo estratificado en tres niveles, seleccionando árboles representativos de cada estrato productivo.

Las variables registradas fueron: (1) número total de árboles (conteo automatizado en imágenes), (2) número de frutos por árbol (conteo automático en superficie homogénea) y (3) peso individual estimado mediante análisis de área proyectada y color (canal “a” de CIELab) en 36 frutos por lote. Con estas variables se planteó un modelo simple para estimar la producción de café cereza, el cual esta expresado por la siguiente ecuación.

$$P_{el} = N_a * N_f * P_f \quad (1)$$

Donde: P_{el} = Producción estimada de café cereza por lote [kg]; N_a =Número de árboles por lote [adimensional]; N_f =Número de frutos por árbol [adimensional]; P_f = Peso por fruto [$g*10^{-3}$]

Para la estimación de frutos y árboles se desarrolló un código en Python basado en técnicas de template matching. Para la estimación del peso del fruto, el sistema integra dos modelos internos: un modelo de regresión ridge, que calcula el peso en estado verde, y un clasificador logístico, que determina el estado de madurez y permite estimar el peso final. Este clasificador fue entrenado con 180 datos, distribuidos en cinco grupos de 36 frutos correspondientes a las categorías: verdes pequeños, verdes medianos, verdes grandes, pintones y maduros.

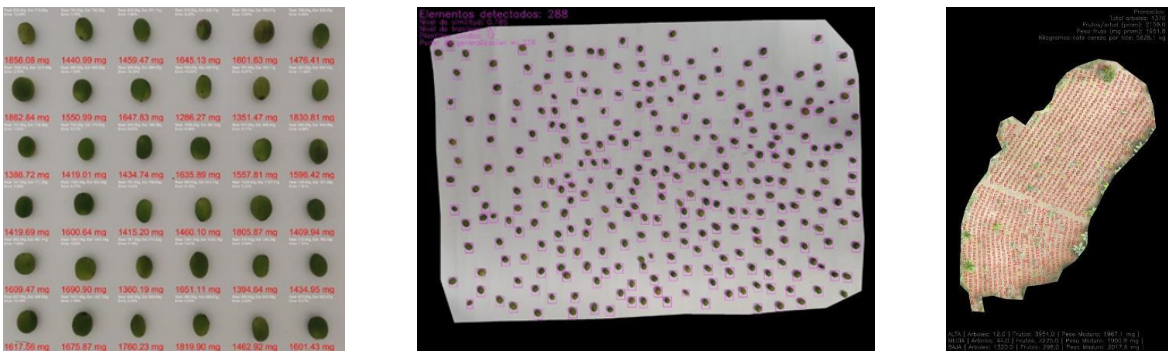
Se realizaron cuatro predicciones (una por cada lote), con una anticipación de 7 a 10 semanas a partir de la floración. La estimación del número de árboles se basó en imágenes capturadas durante la etapa de levante (meses 7 a 9 de desarrollo).

Todos los procesos de análisis implementados en el sistema se apoyan en técnicas de visión artificial accesibles, lo que facilita su escalabilidad sin requerir equipos con unidades de procesamiento gráfico (GPU). Además, el software fue diseñado para operar de forma

local, sin conexión a internet ni dependencia de servidores externos.

Las imágenes de frutos fueron tomadas con un teléfono celular Xiaomi POCO, mientras que los ortomosaicos del cultivo se generaron a partir de fotografías obtenidas con un dron Mavic Air 2, procesadas mediante OpenDroneMap con la interfaz WebODM. Los vuelos fueron programados con DroneLink bajo las siguientes condiciones: altura de 100 m, velocidad de 35 km/h y patrón de vuelo en grilla con un traslape del 80 %, para un total de 190 imágenes por vuelo.

Los datos de imágenes fueron procesados mediante algoritmos basados en técnicas deterministas y de coincidencia de plantillas, con el fin de obtener los conteos y promedios mencionados. Estos valores se integraron en la ecuación (1) para la estimación de la cosecha, (ver Figura 1).



A) Determinación del peso por fruto B) Conteo de frutos totales por árbol C) Conteo de árboles por lote

Figura 1 Imágenes obtenidas del programa para la estimación de la producción de café cereza.

Los resultados obtenidos en la variable respuesta (P_{el}) se compararon con los datos de producción real (P_{rl}) en kilogramos, suministrados para cada lote de estudio, para obtener el error relativo en la estimación [%].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados (Tabla 1) indican que es posible construir un modelo estimativo de producción a partir de las tres variables seleccionadas, sin necesidad de entrenamiento con grandes volúmenes de datos.

Tabla 1. Estimaciones de N_a, N_f, P_f y P_{el} y producción real P_{rl} de café cereza.

Lote	N_a	N_f	P_f[g*10^{-3}]	P_{el}[kg]	P_{rl}[kg]	Error relativo [%]
La Fosa	1376	2159	1704	5062	5900	14,2
Las Guacas	960	1454	1762	2460	2850	13,7
Las Guadua	1134	945	1543	1654	2140	22,7
El Patudo	833	1519*	1670*	2113	2500	15,5

* Media de los tres primeros lotes.

Los valores marcados con asterisco corresponden a los promedios obtenidos en los lotes *La Fosa, Las Guacas* y *Las Guaduas*, los cuales fueron muestreados durante el estudio y sirvieron como base para estimar la producción del lote *El Patudo*. El conteo de árboles y frutos a partir de imágenes mostró una correlación aceptable con los datos de campo, aunque se presentaron errores asociados a variaciones en la iluminación y a diferencias en el tamaño y la forma de los árboles. En las pruebas iniciales, la estimación de producción por lote presentó un error relativo promedio inferior al 17 %, lo que evidencia el potencial de un modelo visual simplificado y de bajo costo computacional para su aplicación en zonas cafeteras con baja conectividad.

La estimación del número de árboles (N_a) fue afectada por condiciones del terreno, vegetación circundante y momento de toma de las imágenes. En lotes con mayor error, las imágenes se adquirieron fuera del momento óptimo debido a labores de manejo escalonadas, generando diferencias en visibilidad y estado fenológico de los árboles (ver Figura 2).

Se observó que el lote con menor error fue registrado inmediatamente después de una jornada de limpieza, lo que facilitó una mayor claridad visual al reducir la vegetación que interfería con el análisis. Este resultado evidencia la importancia de estandarizar los momentos de toma y considerar las labores de manejo agronómico previas, con el fin de optimizar la precisión del sistema de modelado.

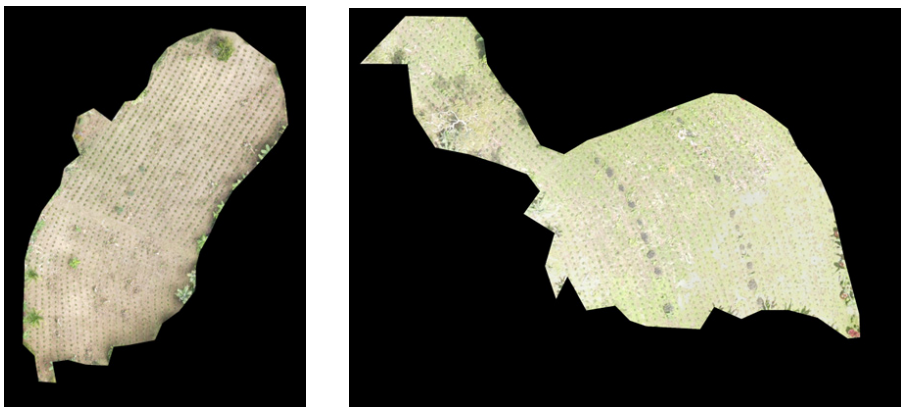


Figura 2 Imagen de dos lotes en distintas fechas para un mismo momento de desarrollo.

CONCLUSIONES

El estudio confirma la viabilidad de un modelo de estimación de producción de café cereza por lote, basado en variables observables y procesadas mediante visión artificial, como alternativa a métodos estadísticos convencionales. Aunque aún en fase de validación, los resultados preliminares muestran potencial de aplicación en caficultura y otros cultivos arbóreos en zonas rurales montañosas. La sencillez y adaptabilidad del enfoque favorecen su apropiación por parte de productores y su uso en la planificación de cosechas, además de aportar insumos para políticas públicas más precisas y ajustadas a las condiciones tecnológicas del campo colombiano.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto con código BPIN 2021000100003, Formación de Capital Humano de Alto Nivel – Universidad Nacional de Colombia Corte II Nacional y por la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín mediante el proyecto de investigación (código: 52937) "*Centro de excelencia (CE) para la innovación en mecanización y opciones energéticas para la agricultura familiar*".

REFERENCIAS

Abreu Júnior, C. A. M. de, et al. (2022). Estimating Coffee Plant Yield Based on Multispectral Images and Machine Learning Models. Agronomy, 12(12), 3195. https://doi.org/10.3390/agronomy12123195

Ariza, D., & Callejas, J. (2021).Estimación de cosechas en caficultura mediante imágenes digitales y análisis de color. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 15(2), 342–352. https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i2.12345

Bazame, H. C., Molin, J. P., Althoff, D., & Martello, M. (2021). Detection, classification, and mapping of coffee fruits during harvest with computer vision. Computers and Electronics in Agriculture, 183, 106066. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106066

Johnson, B. A., & Ordóñez, C. (2022). Explainable AI in agriculture: Towards transparent and accessible decision-making tools. Agricultural Systems, 196, 103315. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103315

Kittichotsatsawat, Y., Tippayawong, N., & Tippayawong, K. Y. (2022). Prediction of arabica coffee production using artificial neural network and multiple linear regression techniques. Scientific Reports, 12, 1–15. https://doi.org/10.1038/s41598-022-18635-5

Lobell, D. B., Asseng, S., & Field, C. B. (2020). Challenges and opportunities for improving crop yield prediction. Nature Plants, 6, 551–557. https://doi.org/10.1038/s41477-020-0658-8

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Palacio, J. C. R., Bunn, C., Rahn, E., et al. (2024). Geographic-Scale Coffee Cherry Counting with Smartphones and Deep Learning. Plant Phenomics, 6. https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0165

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Sistema de etiquetado de zonas de interés en ortofotos obtenidas mediante Dron

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Labeling system for zones of interest in Drone-derived orthophotos

Alejandra Maria Garcia Loaiza[1], Camilo Alberto Calle Velásquez[2] and Iván Darío Aristizábal Torres[1]

Palabras clave:
Café
Drones
Etiquetado de imágenes
Inteligencia artificial
Ortofotos

RESUMEN

Actualmente, los productores de café requieren herramientas tecnológicas que les permitan obtener y analizar información precisa de sus fincas. Las ortofotos generadas mediante drones ofrecen una opción accesible y de alta resolución, pero los pequeños caficultores carecen de sistemas que les permitan etiquetar dichas imágenes de forma sencilla y autónoma. Esta limitación reduce la posibilidad de generar datos útiles para entrenar modelos de inteligencia artificial aplicados al manejo de cultivos. En respuesta a esta necesidad, se desarrolló un sistema de etiquetado que inicia con la organización de ortofotos según lugar y fecha de captura. Luego, utilizando el software QGIS, se recortan manualmente los lotes sembrados en café y se almacenan en una base de datos. Posteriormente, mediante scripts en Python integrados en la consola de QGIS, se automatizan todos los procesos incluido el cambio de formato de imagen, optimizando su uso en modelos de visión por computador. Este sistema permite a los productores identificar zonas de interés en sus fincas, democratizando el acceso a tecnologías de agricultura 4.0. Además, agiliza la recolección de datos y mejora la precisión de los modelos predictivos, promoviendo una toma de decisiones más informada y eficiente.

Keywords:
Coffee
Drones
Image labeling Artificial intelligence
Orthophotos

ABSTRACT

Currently, coffee producers require technological tools that allow them to obtain and analyze accurate information about their farms. Orthophotos generated by drones offer an accessible, high-resolution option; however, small-scale farmers lack systems that enable them to label these images in a simple and autonomous way. This limitation hinders the generation of useful data for training artificial intelligence models applied to crop management. To address this need, a labeling system was developed, beginning with the organization of orthophotos by location and capture date. Then, using QGIS software, coffee plots are manually cropped and stored in a database. Later, Python scripts integrated into the QGIS console automate all processes, including image format conversion, optimizing their use in computer vision models. This system allows producers to identify areas of interest on their farms, democratizing access to agriculture 4.0 technologies. It also accelerates data collection and improves the accuracy of predictive models, promoting more informed and efficient decision-making.

1Facultad de Ciencias Agrarias, Dpto. de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. algarcialo@unal.edu.co; idaristi@unal.edu.co
[2]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.ccallev@unal.edu.co

CC BY NC SA

La producción de café (*Coffea arabica* L.) es una de las actividades agrícolas más relevantes en Colombia, no solo por su importancia económica, sino también por su valor social y cultural (Hernández, 2021). Sin embargo, los pequeños caficultores enfrentan limitaciones en el acceso a herramientas tecnológicas que les permitan monitorear de manera precisa sus cultivos.

En la actualidad, las ortofotos obtenidas mediante drones constituyen una alternativa accesible para observar características específicas del terreno y los cultivos, ofreciendo información de alta resolución (Godron, 2024). No obstante, los sistemas disponibles para su procesamiento suelen estar dirigidos a grandes productores o empresas, lo que limita el uso de estas tecnologías en la agricultura familiar (Farfán, 2022).

El problema identificado es la ausencia de plataformas sencillas que permitan a los productores etiquetar zonas de interés en ortofotos, restringiendo así la generación de bases de datos útiles para entrenar modelos de inteligencia artificial aplicados al manejo agrícola (Anfruns, 2023). La implementación de un sistema de etiquetado de ortofotos, accesible y adaptable a pequeños caficultores, facilita la generación de datos de calidad para la agricultura de precisión. Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar un sistema de etiquetado de ortofotos que permita a los productores de café seleccionar áreas de interés dentro de sus fincas y etiquetar la información de forma sencilla, con el fin de facilitar el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial aplicables a la agricultura.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la Finca Montenegro, ubicada en el municipio de Jardín, Antioquia, Colombia (5°36'31" N, 75°50'27" O), con un área aproximada de 2.1 ha, de las cuales 1.8 ha corresponden a cultivos de café (Figura 1).

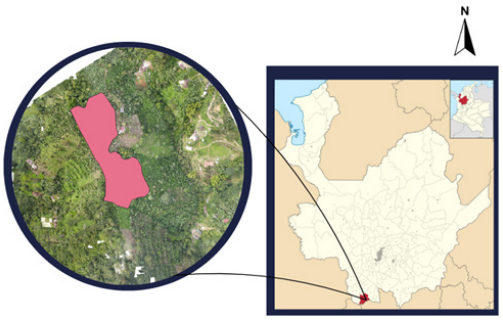
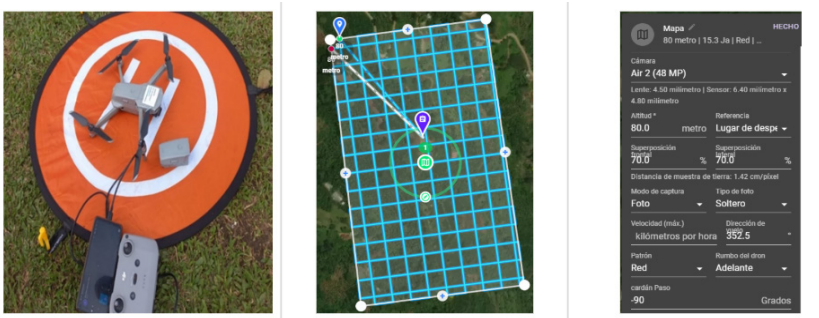


Figura 1. Finca Montenegro, Jardín, Antioquia, objeto de estudio.

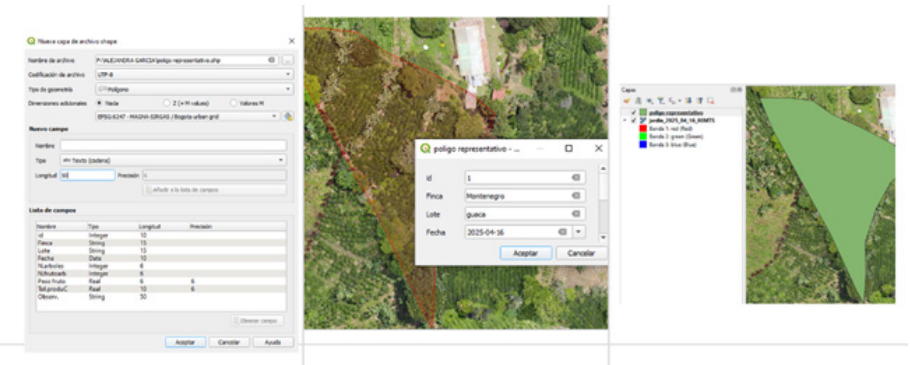
Las ortofotos se obtuvieron mediante vuelos realizados con un dron multirrotor, modelo Mavic Air 2, equipado con una cámara RGB (Figura 2). Las imágenes capturadas fueron procesadas en OpenDroneMap, a través de la interfaz WebODM, ambos programas de código abierto para fotogrametría, con el propósito de generar ortomosaicos georreferenciados de alta resolución sin necesidad de utilizar puntos de paso o control. Los parámetros de vuelo fueron los siguientes: altura de 80 m, velocidad de 32 km/h, traslape del 70 %, patrón en grilla, obteniéndose un total de 364 imágenes por vuelo.



a) Drone | b) Plan | c) Datos de vuelo

Figura 2. Captura de imágenes.

Posteriormente, las imágenes fueron cargadas en el software QGIS (v.3.34.11), donde se realizó la delimitación manual de los lotes de café mediante polígonos vectoriales (Figura 3). Estos polígonos fueron empleados como máscaras para recortar las ortofotos y conformar una base de datos clasificada por lotes y fechas de captura. Los cuales fueron almacenados como base de datos con la siguiente información: finca, lote, fecha, arboles, frutos por arbol, peso por fruto, produccion café cereza y observaciones.



a) Creación de capa b) Delimitación c) Polígono representativo

Figura 3. Proceso de creacion de poligono representativo para los lotes de la finca Montenegro.

Con el objetivo de optimizar la gestión de la información, se desarrollaron scripts en Python implementados en la consola de QGIS y en Visual Studio Code. Estos scripts permitieron automatizar procesos como la generación de imágenes, el análisis de métricas de calidad (por ejemplo, SSIM, con valores de uno que evidencian la ausencia de pérdida de información), el almacenamiento de polígonos, el recorte de lotes y la conversión de archivos de formato .tif a .png, lo que facilitó su integración en modelos de visión por computador.

El flujo metodológico incluyó las siguientes etapas (Figura 4):

Adquisición y organización de ortofotos.

Delimitación y recorte de lotes en QGIS.

Almacenamiento en base de datos estructurada.

Automatización en Python para conversión y optimización de archivos.



Figura 4. Diagrama de flujo del sistema de etiquetado y organización de base de datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La implementación del sistema de etiquetado permitió conformar una base de datos de 150 ortofotos procesadas, correspondientes a cinco lotes de café de la Finca Montenegro. Cada lote fue recortado y almacenado de manera independiente, lo que facilitó la identificación de zonas de interés y la organización de la información (Figura 5).



Figura 5. Recorte de los diferentes lotes de la finca.

El uso de QGIS en conjunto con scripts en Python optimizó el tiempo de procesamiento. El recorte manual de cada lote tomaba en promedio 1 hora, mientras que la automatización redujo este tiempo a 6 minutos por lote, representando una mejora significativa en la eficiencia del flujo de trabajo.

Además, la conversión de archivos de formato .tif a .png redujo el tamaño de almacenamiento en un 75 %, sin pérdida relevante de calidad visual (Figura 6). Esto permite que las imágenes puedan ser procesadas en computadores de mediana capacidad e incluso en dispositivos móviles, ampliando la accesibilidad para pequeños productores.

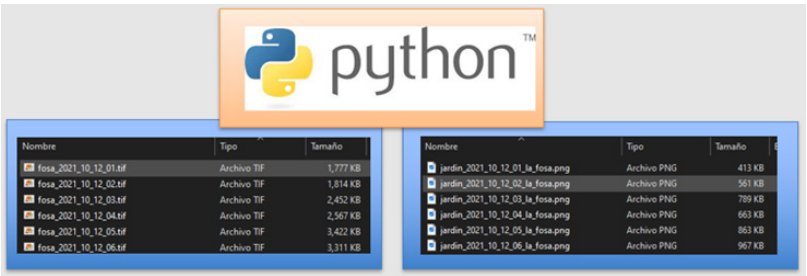


Figura 6. Comparativo de cambio tamaño de archivo.

CONCLUSIÓN

El sistema propuesto democratiza el acceso a tecnologías de agricultura 4.0, permitiendo que caficultores con recursos limitados generen datos útiles para entrenar modelos de inteligencia artificial. En comparación con sistemas comerciales, el presente enfoque ofrece una solución gratuita, abierta y adaptable a diferentes escenarios productivos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por financiar el proyecto de investigación “Centro de excelencia (CE) para la innovación en mecanización y opciones energéticas para la agricultura familiar”. (código: 52937)“

REFERENCIAS

Anfruns Espuña, L. (2023). *Uso e implementación de sensores RGB y multiespectrales instalados en drones para el monitoreo de cultivos de café*. GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, (31), 5–38. https://doi.org/10.21138/GF.800

Farfán Vanegas, C. (2022). *Oportunidades en el uso de drones para los cultivos del agro colombiano*. Seminario de Investigación de Especialización.

Godron. (2024, mayo 8). *Drones en la fotogrametría: Ventajas y aplicaciones*. ENTERPRISE. https://enterprise.godron.mx/drones-en-la-fotogrametria/

Hernández, R. (2021, junio 21). *Café colombiano: un producto con mucha historia*. Radio Nacional de Colombia. https://www.radionacional.co/actualidad/campo-colombiano/cafe-colombiano-un-producto-con-mucha-historia

QGIS. (2009). *QGIS. Una introducción suave a SIG*. https://docs.qgis.org/3.40/es/docs/gentle_gis_introduction/preamble.html

OpenDroneMap. (s.f.). *WebODM: Open source drone mapping*. https://www.opendronemap.org/webodm/

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Uso de un sistema RTK portátil para la georeferenciación precisa de árboles de café

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Using a portable RTK system for the accurate georeferencing of coffee trees

Estefania Jiménez Gómez[1], Camilo Alberto Calle Velásquez[2], Edilson León Moreno Cárdenas[3] and Iván Darío Aristizábal Torres[3]

RESUMEN

Palabras clave:
Agricultura de precisión
Café
GNSS
Precisión RTK
Tecnologías apropiadas

Este trabajo evaluó la implementación del sistema de bajo costo simpleRTK2B para la georeferenciación precisa de árboles de café en fincas del suroeste antioqueño. Se desarrolló un sistema integrado compuesto por un receptor GNSS con corrección RTK, una interfaz gráfica amigable en Python, y herramientas SIG como QGIS y ArcGIS. Se compararon puntos tomados con RTK y con un GPS convencional, obteniéndose una precisión promedio de ±0,72 m con RTK frente a 24,95 m con GPS. El error absoluto calculado en ArcGIS evidenció diferencias de hasta 70 m en puntos críticos, lo que resalta la relevancia del RTK para aplicaciones agrícolas. El sistema también mostró ser accesible para pequeños productores gracias a su bajo costo y facilidad de uso. Estos resultados confirman que la tecnología RTK, combinada con herramientas digitales apropiadas, puede ser una solución efectiva para reducir la brecha tecnológica en la agricultura familiar, mejorar la planificación productiva y facilitar la toma de decisiones basada en datos geoespaciales.

ABSTRACT

Keywords:
Precision agriculture
Coffee
GNSS
Accuracy RTK
Appropriate technologies

This study evaluated the implementation of the low-cost simpleRTK2B system for the precise georeferencing of coffee trees on farms in the southwestern region of Antioquia. An integrated system was developed, consisting of an RTK-corrected GNSS receiver, a user-friendly Python graphical interface, and GIS tools such as QGIS and ArcGIS. Points collected with RTK and a conventional GPS were compared, yielding an average accuracy of ±0.72 m for RTK versus 24.95 m for GPS. The absolute error calculated in ArcGIS revealed differences of up to 70 m at critical points, highlighting the relevance of RTK for agricultural applications. The system also proved accessible to small-scale farmers due to its low cost and ease of use. These results confirm that RTK technology, when combined with appropriate digital tools, can be an effective solution to reduce the technological gap in family farming, enhance productive planning, and support decision-making based on geospatial data.

[1] Facultad de Ciencias Agrarias, Dpto. Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. esjimenezg@unal.edu.co
[2]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ccallev@unal.edu.co
[3]Facultad de Ciencias Agrarias, Depto. de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. elmorenoc@unal.edu.co; idaristi@unal.edu.co

CC BY NC SA

La agricultura familiar en América Latina representa un componente esencial para la seguridad alimentaria, la generación de empleo y la gestión sostenible de los recursos naturales. Este sistema de producción, caracterizado por unidades gestionadas por familias que dependen principalmente de su trabajo, es responsable de aproximadamente el 80% de las explotaciones agrícolas en la región (FAO, 2022). En Colombia, La actividad cafetera ha representado parte importante de la actividad económica colombiana (Gutiérrez, J. C., 1993), especialmente en regiones montañosas, donde los pequeños y medianos productores desempeñan un papel central en la producción y conservación del paisaje cafetero. A pesar de su relevancia, estos sistemas productivos enfrentan barreras significativas para la incorporación de tecnologías avanzadas, como la agricultura de precisión y la georreferenciación, debido a limitaciones económicas, técnicas y de acceso a la información. La georreferenciación permite localizar con precisión elementos dentro de un terreno, resultando fundamental para actividades como el análisis espacial de cultivos, la planificación agrícola y la toma de decisiones. En este contexto, la tecnología RTK (Real Time Kinematic) surge como una alternativa eficiente (Suarez et al. 2005) frente al GPS tradicional, al ofrecer una precisión centimetrica que facilita el mapeo detallado de árboles, la planificación de labores y la integración de sistemas de información geográfica (GIS) como QGIS y ArcGIS. Sin embargo, los altos costos de equipos GNSS profesionales con RTK han limitado su adopción entre pequeños caficultores. Ante esta problemática, el uso de módulos accesibles como el **simpleRTK2B**, basado en la placa u-blox ZED-F9P, se plantea como una tecnología apropiada para reducir la brecha digital en el campo. El presente trabajo aborda el desarrollo e implementación de un sistema de georreferenciación de árboles de café empleando el módulo simpleRTK2B, con el objetivo de evaluar su funcionalidad, precisión y aplicabilidad en fincas cafeteras del suroeste antioqueño. Para ello, se integraron herramientas de software como **QGIS**, **ArcGIS** y una aplicación diseñada en **Visual Studio** con interfaz gráfica en **Tkinter**, orientada a facilitar el uso por parte de productores rurales con bajo nivel de alfabetización digital.

Este trabajo busca responder a la pregunta de investigación: *¿Puede el sistema simpleRTK2B constituirse como una tecnología apropiada de georreferenciación para pequeños caficultores, facilitando el acceso a herramientas de agricultura de precisión?*

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló en el municipio de Jardín, Antioquia (Colombia), en la finca Montenegro. Para la georreferenciación de árboles de café se empleó el sistema simpleRTK2B, un receptor GNSS multibanda basado en la tecnología ZED-F9P de u-blox, con capacidad de corrección RTK (Real Time Kinematic), que realizó las correcciones conectándose a los 12 satélites que estaban disponibles. El módulo fue configurado para la recepción de datos COM4, puerto incluido con la configuración del simple RTK2B, utilizando una tablet Yoga Lenovo para la recepción y archivo de los datos obtenidos.

Durante la toma de datos en campo, el equipo simpleRTK2B fue montado sobre un trípode liviano de aluminio para garantizar estabilidad y precisión. La toma de coordenadas geográficas individuales de cada árbol de café se realizó mediante una interfaz gráfica desarrollada en Python utilizando la biblioteca Tkinter. Esta aplicación permitió visualizar la señal de satélites disponibles, estado de corrección RTK, y almacenar las coordenadas en un archivo .csv con su respectivo identificador. La alimentación eléctrica del sistema se garantizó mediante una batería externa tipo power bank de 20000 mAh, permitiendo la operación continua durante jornadas de campo de hasta 8 horas.

Una vez recolectadas las coordenadas, los datos fueron procesados y visualizados empleando QGIS 3.22 y ArcGIS Pro 3.2. En estos entornos se generaron mapas de distribución espacial de los árboles, se aplicaron herramientas de análisis espacial y se verificó la precisión de los puntos en comparación con registros obtenidos mediante un GPS convencional. Para evaluar el error del sistema RTK frente al GPS convencional, se empleó una metodología comparativa basada en la diferencia promedio y la desviación estándar de coordenadas obtenidas sobre puntos fijos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema simpleRTK2B es un receptor GNSS de bajo costo que emplea tecnología RTK (Real Time Kinematic) para lograr una georreferenciación de alta precisión. Opera mediante correcciones diferenciales obtenidas en tiempo real, lo que le permite alcanzar precisiones centimétricas o submétricas en condiciones óptimas. En la Figura 1 se muestra el módulo RTK, y su instalación en campo durante la toma de datos.



a b

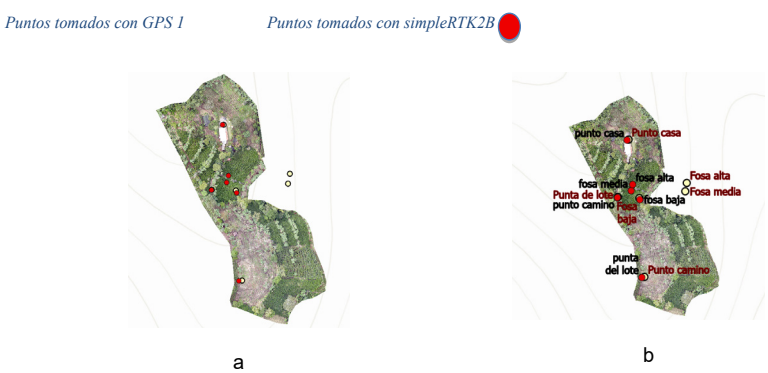
Figura 1. SimpleRTK 2B, a-placa de arduino y b-uso en campo.

En primera instancia se realizaron mediciones de varios puntos claves con el RTK simpleRTK2B, y simultáneamente con el GPS convencional y se obtuvieron los siguientes datos (Tabla 1):

Tabla 1. Datos registrados con RTK y GPS.

Nombre del lugar	SimpleRTK2B		GPS convencional	
	Latitud media	Longitud media	Latitud	Longitud
Punto casa	5,608160937	-75,84046473	5,608162	-75,840471
Punto camino	5,607497523	-75,58405989	5,60658	-75,840279
Punta del lote	5,606578347	-75,84031244	5,607502	-75,840596
Fosa media	5,607574714	-75,84043948	5,607566	-75,839802
Fosa alta	5,607643278	-75,84040897	5,607666	-75,839784
Fosa baja	5,607472201	-75,8403377	5,607493	-75,840344

La implementación del sistema RTK simpleRTK2B permitió evidenciar una mejora sustancial en la precisión del geoposicionamiento respecto al uso de un GPS convencional. La exactitud promedia registrada para el RTK fue de 0,72 m, en contraste con la del GPS tradicional, que alcanzó un error promedio de 24,95 m. Esta diferencia fue cuantificada mediante el cálculo del error absoluto, que consistió en medir, a través del software ArcGIS, la distancia entre los puntos georreferenciados con ambos sistemas (Figura 2).



a b

Figura 2. Puntos georreferenciados en ArcGIS, mapa donde se indican los puntos tomados (a), mapa con etiquetas de los puntos (b).

Como se muestra en la Figura 3, se tomó como **error absoluto** la distancia entre cada punto georreferenciado con el sistema **RTK simpleRTK2B** y el **GPS convencional**, calculada mediante herramientas de ArcGIS Pro.



Figura 3. Puntos georreferenciados Fosa Alta (Error absoluto).

Tabla 2. Error absoluto para el GPS convencional (Diferencia en metros de cada punto).

Nombre punto	Punto casa	Punto camino	Punta del lote	Fosa media	Fosa alta	Fosa baja	Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de variación
Error absoluto (m)	1,56	0,59	3,67	70,63	70,85	2,42	24,95	35,48	1,42

En la Tabla 2 se presentan los resultados de estos cálculos, evidenciando una ventaja significativa en la exactitud del sistema simpleRTK2B en comparación con el GPS tradicional, lo cual resulta fundamental en aplicaciones agrícolas de precisión, como la georreferenciación de árboles de café.

Además de los resultados de exactitud, se desarrolló una interfaz de software basada en Python utilizando la biblioteca Tkinter, con el fin de facilitar la interacción del usuario con los datos obtenidos por el módulo RTK. Este código proporciona información en tiempo real, incluyendo latitud, longitud, altitud, precisión (horizontal y vertical) número de satélites disponibles, y la cantidad de datos almacenados. Su diseño amigable está orientado a pequeños productores y usuarios sin experiencia previa en programación, lo cual refuerza su aplicabilidad como tecnología apropiada para contextos rurales. La mejora en la experiencia del usuario se alinea con los principios de desarrollo de tecnologías de bajo costo y alta utilidad para el sector agrícola.

Estos hallazgos son coherentes con lo reportado por autores, quienes señalan que la exactitud de los sistemas GNSS con corrección diferencial dependiendo de las condiciones del terreno y la visibilidad de los satélites. En este contexto, Pistarelli et al. (2019) plantean la viabilidad de un RTK de bajo costo compuesto por una estación base con coordenadas conocidas y un receptor móvil. Su propuesta combina receptores GNSS económicos, antenas activas, microcontroladores como Raspberry Pi, radioenlaces de bajo consumo y software libre como RTKLIB. Esta alternativa constituye un sistema accesible y preciso en tiempo real, cuya robustez quedó demostrada al mantener un rango de exactitud incluso en terreno montañoso. La apropiación de herramientas de georreferenciación en la agricultura familiar puede mejorar la planificación productiva y facilitar el acceso a nuevos mercados, lo cual refuerza la relevancia social y económica del presente trabajo.

Sin embargo, el método RTK convencional, basado en la comunicación entre una estación base y un receptor móvil, presenta limitaciones, ya que su precisión disminuye al aumentar la distancia debido a la pérdida de correlación en los errores atmosféricos y orbitales. Para superar este desafío surgió el RTK en red, que emplea múltiples estaciones de referencia y mejora la calidad, disponibilidad y confiabilidad del posicionamiento, permitiendo mayores distancias sin comprometer la exactitud. A ello se suma la incorporación del concepto de integridad, proveniente de la navegación aérea, que garantiza la capacidad del sistema para alertar cuando los datos no son adecuados. Gomes et al. (2021) demostraron que, aunque el 68,3% de las mediciones horizontales y el 63,9% de las verticales cumplían con los estándares de integridad, la componente vertical sigue siendo más vulnerable.

Finalmente, la reducción del margen de error en la ubicación espacial de árboles de café puede incidir directamente en decisiones agronómicas clave, como la aplicación localizada de fertilizantes, la planificación de cosechas, o el análisis de la productividad por árbol. En este sentido, la integración del sistema simpleRTK2B y su interfaz personalizada no solo mejora la precisión técnica, sino que también amplía las posibilidades de uso para productores rurales que antes no contaban con herramientas de este tipo.

CONCLUSIÓN

La implementación del sistema **simpleRTK2B** permitió la obtención de coordenadas con una exactitud promedio de ±0,72 m, lo cual representa una mejora significativa frente al GPS convencional, cuya exactitud promedio fue de 24,95 m. Esta diferencia evidencia el potencial del RTK como tecnología apropiada para aplicaciones agrícolas que requieren alta exactitud espacial. Este trabajo contribuye al conocimiento sobre la **adaptación de tecnologías GNSS de bajo costo** en el contexto de la agricultura de precisión y abre camino a futuras investigaciones sobre su integración con sensores, imágenes satelitales o plataformas de gestión de datos agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto con código BPIN 2021000100003, Formación de Capital Humano de Alto Nivel – Universidad Nacional de Colombia Corte II Nacional y por la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín mediante el proyecto de investigación (código: 52937) "*Centro de excelencia (CE) para la innovación en mecanización y opciones energéticas para la agricultura familiar*".

REFERENCIAS

FAO. (2022). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022. Https://Openknowledge.Fao.Org/Server/Api/Core/Bitstreams/Ed1c25f3-D755-4e8d-9ffc-75b01d09fbd2/Content/Sofa-2022/Sustainable-Adoption-Agricultural-Automation.Html.

Gomes, A., Klein, I., & Pereira Krueger, C. (2021). CIRCLE FITTING FOR IMPROVED GNSS POSITIONING VIA SMARTPHONES FOR ENGINEERING PURPOSES. Bol. Ciênc. Geod. 27 (Spe) , XI CBCG.

Gutiérrez, J. C. (1993). Industria del cafe en Colombia (Federacion Nacional de Cafeteros, Ed.).

Pistarelli, M., Pire, T., & Kofman, E. (2019). Caracterización de un Sistema GPS RTK de Bajo Costo. Revista Tecnología y Ciencia, 35, 94–107. https://doi.org/10.33414/rtyc.35.94-107.2019

Suarez, H. D., Gonzales, D. A., Royero, G., Hoyer, M. J., & Wildermann, E. J. (2005). GPS in the georectification of high spatial resolution satellite images. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, 28(3).

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Modelo de detección y conteo automático de frutos de cacao en diferentes estados de madurez basado en técnicas de Deep Learning

Automatic detection and counting model of cocoa pods in different ripeness stages based on Deep Learning techniques

María José Montoya-Castaño[1]* and Juan Felipe Restrepo-Arias[1]

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue crear un sistema automatizado que utiliza técnicas de inteligencia artificial para detectar y contar frutos de cacao (*Teobroma cacao L.)* en campo en diferentes fases de maduración. Se usó un conjunto de datos con diferentes estados de madurez del cacao. Con este se entrenaron seis modelos YOLO con la evaluación de las métricas mAP50-95 y *Loss Validation*. El modelo YOLOv8s obtuvo el mejor rendimiento global (mAP50-95 de 85,36%) y un desempeño destacado en fases avanzadas (95,70% en C3), mientras que YOLOv11s sobresalió en la C2 (94,30%). Considerando el equilibrio entre precisión y pérdida de validación, se seleccionó YOLOv8s (*Val Loss*: 1,598) para implementar un algoritmo de conteo que prioriza la detección con mayor probabilidad por fruto, minimizando duplicidades y mejorando la confiabilidad de la clasificación.

Palabras clave:
Cultivo de cacao
Conteo automático
Detección de frutos
Inteligencia artificial
Modelos de YOLO.

ABSTRACT

The aim of this research was to create an automated system that uses artificial intelligence techniques to detect and count cacao (*Theobroma cacao L.)* in field fruits at different stages of ripening. We used a dataset with different stages of cacao ripeness. Six YOLO models were trained with this dataset, evaluating the mAP50-95 and Validation Loss metrics. The YOLOv8s model obtained the best overall performance (mAP 50-95 85.36%) and outstanding performance in advanced stages (95.70% in C3), while YOLOv11s excelled in C2 (94.30%). Considering the balance between accuracy and validation loss, YOLOv8s (Val Loss: 1.598) was selected to implement a counting algorithm that prioritizes the detection of fruits with the highest probability, minimizing duplicates and improving classification reliability.

Keywords:
Cocoa crop
Automatic counting
Fruit detection
Artificial intelligence
YOLO models

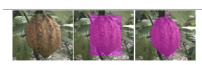
[1]Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2084-4039;
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9689-1017
*Corresponding author: mjmontoyac@eafit.edu.co

El cacao es un cultivo de gran importancia económica y social, cuya calidad depende en gran medida de la etapa de madurez en la que se cosecha (Cubillos-Bojacá et al., 2019). Sin embargo, identificar estas fases en campo es complejo por la variabilidad morfológica y las condiciones ambientales (Restrepo-Arias et al., 2023). El conteo manual, práctica tradicional, resulta costoso e impreciso (He et al., 2022), lo que ha impulsado el uso de inteligencia artificial y visión por computador. Dentro de estas técnicas, el aprendizaje profundo, y en particular las redes neuronales convolucionales (CNN), han demostrado un notable rendimiento en la detección de objetos y reconocimiento de patrones visuales sin necesidad de extracción manual de características (He et al., 2022). Modelos como Faster R-CNN y la familia YOLO (You Only Look Once) han sido ampliamente utilizados para la detección de frutas en tiempo real en entornos agrícolas (Restrepo-Arias et al., 2025; Redmon et al., 2016). YOLO, desde su primera versión, introdujo un enfoque unificado que procesa la imagen completa en una sola pasada de la red neuronal, permitiendo velocidades de inferencia muy superiores a métodos anteriores sin sacrificar precisión (Redmon et al., 2016). Versiones más recientes, como YOLOv8 con segmentación, han alcanzado precisiones promedio superiores al 85% en la clasificación de estados fenológicos de cultivos como tomate, cítricos y *Camellia oleifera* en condiciones de campo (Zhu et al., 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

Dataset. Se empleó el dataset desarrollado por Restrepo-Arias et al. (2023), que contiene imágenes de frutos de cacao en distintas etapas de madurez, anotadas con bounding boxes y máscaras de segmentación en archivos .txt. Las variables principales corresponden a la etapa fenológica y a las características visuales de los frutos. El preprocesamiento incluyó la división del conjunto en entrenamiento, validación y prueba en%70, 20% y 10%, respectivamente.

Tabla 1. Dataset de etapas de maduración del cacao (Restrepo-Arias et al., 2023).

Clase	Descripción de la clase	Instancias
	**C1** frutos de 0 a 2 meses de desarrollo	3427
	**C2** frutos de 2 a 4 meses de desarrollo	1679
	**C3** frutos de 4 a 6 meses de desarrollo	1545
	**C4** frutos de más de 6 meses de desarrollo	1106

Busqueda y selección de hiperparametros mediante *Grid search.* Con el fin de optimizar el rendimiento de las redes se ajustó el *batch size* (8-16-32), *learning rate* (Lr) (0,001-0,005-0,01) y función de optimización (SGD, Adam), evaluados con mAP 50–95. La mejor configuración fue batch size = 16, Lr= 0,001 y optimizador Adam.

Redes seleccionadas para el entrenamiento

Las redes se entrenaron durante 50 épocas con los hiperparámetros de la *Grid search* y resolución de 640×640 píxeles. Se evaluaron seis modelos YOLO tres de segmentación y tres de detección, priorizando arquitecturas ligeras y medianas (YOLOv8s y m) por su balance entre precisión y velocidad en campo. También se incluyeron YOLOv11-s, por sus mejoras recientes, y YOLOv5-su como referencia histórica.

Algoritmo de conteo en video. Con el mejor modelo se implementó un conteo automático en video (640×640 px) usando detección, seguimiento (ByteTrack/OC-SORT) y filtrado por probabilidad máxima. Se ajustaron conf (mínima probabilida para aceptar detección), IoU (solapamiento para considerar el mismo objeto) y DUP_IoU (solapamiento mínimo para evitar duplicidades en conteo) para evitar duplicados. Evaluado en cinco

videos con conteo manual, bajo dos configuraciones de conf, IoU y DUP_IoU (0,55–0,65–0,30 y 0,30–0,50–0,50), se midieron precisión y error relativo global y por clase.

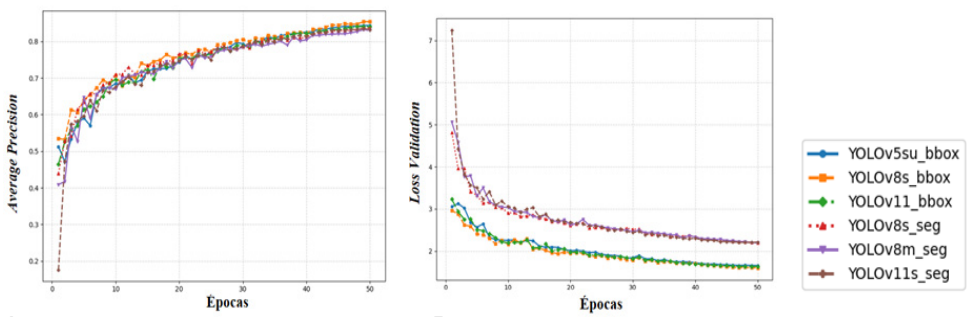
RESULTADOS

Entrenamiento de las redes. Las seis arquitecturas YOLO evaluadas mostraron un rendimiento consistente, con valores de mAP 50–95 entre 83,10% y 85,40%. Entre ellas, YOLOv8-s se destacó como el mejor modelo al alcanzar el mayor mAP (85,40%) y presentar un menor *loss validation* (1.59), criterio principal considerado para su elección. A nivel de clases, C1 obtuvo la menor precisión (≈62–65%) debido a su alta variabilidad morfológica, mientras que C4 fue la más sencilla de detectar, superando el 94% en la mayoría de arquitecturas.

Tabla 2. Rendimiento de las redes según la métrica mAP 50-95 y *loss validation.*

YOLO Models	Mean Average Precision 50-95					Loss Validation
	all	C1	C2	C3	C4	
V8 small	85,40%	65,50%	88,10%	89,70%	95,70%	1,598
V5 small U	84,30%	65,50%	86,60%	88,30%	95,00%	1,654
V11 small	84,10%	65,00%	86,10%	94,30%	94,30%	1,633
V8 small segmentation	83,60%	62,90%	87,10%	89,20%	95,80%	2,202
V8 medium segmentation	83,20%	62,40%	86,20%	88,70%	93,80%	2,212
V11 small segmentation	83,10%	63,60%	87,20%	89,10%	94,70%	2,195

La Figura 1 muestra que, en 50 épocas, todos los modelos YOLO redujeron la pérdida de validación y aumentaron el mAP50-95, estabilizándose desde la época 30. YOLOv8-s y YOLOv5-sU alcanzaron rápido mAP >0,80 y pérdidas cercanas a 2,0, mientras YOLOv11-s seg, pese a iniciar con peor desempeño, se recuperó hasta converger. Las pérdidas finales (≈1,6–2,2) y mAP >0,80 evidencian la efectividad del entrenamiento.



A B

Figura 1. Evolución del *mAP* 50–95 curvas de aprendizaje (A) y de la *loss validation* (B) durante las 50 épocas de entrenamiento.

La Figura 2 evidencia que los modelos YOLOv8-s y YOLOv8-s-seg clasifican correctamente las etapas de madurez del cacao, mostrando además las probabilidades de cada clase como indicador de confianza en las predicciones.



Figura 2. Resultados en imágenes prueba de los modelos YOLOv8-s y YOLOv8-s-seg.

Algoritmo de conteo. YOLOv8-s, el modelo más preciso según las métricas de la Tabla 2, se evaluó en video con dos configuraciones. El experimento 1, con alta confianza y supresión estricta, alcanzó 85,11% de precisión pero subestimó el conteo (–14,89%). El experimento 2, con umbrales más bajos, aumentó la detección pero sobreestimó un 36,17%, especialmente en C2 (+42,86%) y C3 (+500%). Se confirma que confianza, IoU y control de duplicados afectan directamente la precisión del conteo.

Tabla 3. Métricas globales y por clase del experimento 1 y 2.

Métrica	Experimento 1					Experimento 2				
	Global	C1	C2	C3	C4	Global	C1	C2	C3	C4
Precisión (%)	85,11	100	80,95	50	81,82	136,17	100	142,86	600	90,91
Error relativo (%)	−14,89	0	−19,05	−50	−18,18	+36,17	0	+42,86	500	−9,09

CONCLUSIÓN

YOLOv8-s logró el mejor desempeño (mAP50-95 de 85,40%) gracias a la optimización de hiperparámetros y un dataset equilibrado. Los umbrales de conf, IoU y DUP_IoU influyen en la precisión y el conteo; configuraciones conservadoras reducen duplicados y las permisivas aumentan cobertura, pero con riesgo de sobreconteo, recomendándose un ajuste adaptativo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad EAFIT por el apoyo académico y a Juan Felipe Restrepo Arias por su orientación y valiosas recomendaciones.

REFERENCIAS

Cubillos Bojacá, N., et al. (2019). Study of the physical and chemical changes during the maturation of three cocoa clones. Journal of the Science of Food and Agriculture, 99(10), 4706–4713. https://doi.org/10.1002/jsfa.9683

He, L., Wu, Z., Yu, S., Fu, H., & Liu, H. (2022). Automatic fruit counting system for yield estimation in apple orchards. Agronomy, 12(16), 1638. https://doi.org/10.3390/agronomy12101638

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, real-time object detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 779–788. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91

Restrepo-Arias, L., et al. (2023). Dataset for detection and classification of cacao pods under field conditions. Data in Brief, 48, 109207. https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109207

Restrepo-Arias, J. F., Montoya-Castaño, M. J., Moreno-De La Espriella, M. F., & Branch-Bedoya, J. W. (2025). An Application of Deep Learning Models for the Detection of Cocoa Pods at Different Ripening Stages: An Approach with Faster R-CNN and Mask R-CNN. Computation, 13(7), 159.

X. Zhu, F. Chen, X. Zhang, Y. Zheng, X. Peng, and C. Chen, "Detection the maturity of multi-cultivar olive fruit 798 in orchard environments based on Olive-EfficientDet," Sci Hortic, vol. 324, Jan. 2024, doi: 799 10.1016/j.scienta.2023.112607.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Producción de hidrógeno por fermentación oscura usando subproductos del café y residuos orgánicos

Hydrogen production by dark fermentation using coffee by-products and organic waste

Iván Andrés Quiñones Navia[1], Víctor Manuel Martínez Castro[1] and Edilson León Moreno Cárdenas[2]*

Palabras clave:
Aguas residuales de café
Biohidrógeno
Co-digestión
Energía sostenible
Pulpa de café

RESUMEN

El procesamiento húmedo del café genera residuos con alta carga orgánica que afectan el ambiente en zonas productoras como Pitalito, Huila. Este estudio evaluó la producción de hidrógeno por fermentación oscura (DF) usando aguas del primer lavado de café (FWCW) en co-digestión con residuos vegetales (VW), jugo de caña (SCJ) y pulpa de café (CP), sin pretratamientos ni inoculación. Se realizaron tres tratamientos con distintas proporciones de sustratos. El tratamiento L1 mostró el mejor desempeño, alcanzando 70,03±2,65 L de H_2 una productividad de 2,00±0,08 L H_2 $L_{substrato}^{-1}$ y un contenido de 43,99±3,89%. Según el modelo de Gompertz modificado, la mayor tasa de producción fue 2,70±0,82 L H_2 h^{-1} y una fase Lag de 24±6,93 h. La prueba de Wilcoxon confirmó diferencias significativas (P=0,05) entre L1 y L3, evidenciando que la composición del sustrato influye en el proceso. Estos resultados destacan la co-digestión de FWCW y VW como una alternativa eficiente para valorizar residuos del café mediante la producción de hidrógeno.

Keywords:
Waste coffee water
Biohydrogen
Co-digestion
Sustainable energy
Coffee pulp

ABSTRACT

Wet coffee processing generates high-organic-load residues that impact the environment in producing regions such as Pitalito, Huila. This study evaluated hydrogen production by dark fermentation (DF) using first coffee wash water (FWCW) in co-digestion with vegetable waste (VW), sugarcane juice (SCJ), and coffee pulp (CP), without thermal pretreatments or external inoculation. Three treatments with different substrate proportions were tested. Treatment L1 showed the best performance, achieving 70.03±2.65 L of H_2, a productivity of 2.00±0.08 L H_2 $L_{substrate}^{-1}$, and H_2 content of 43.99±3.89%. According to the modified Gompertz model, the highest production rate was 2.70±0.82 L H_2 h^{-1} and a lag phase of 24±6.93 h. The Wilcoxon test confirmed significant differences (P=0.05) between L1 and L3, demonstrating that substrate composition influences the process. These results highlight the co-digestion of FWCW and VW as an efficient alternative to valorize coffee residues through hydrogen production.

[1]Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana , Pitalito, Huila, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3017-3052; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7036-1376
[2] Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5693-4273
*Corresponding autor: elmorenoc@unal.edu.co

CC BY NC SA

La matriz energética mundial sigue dominada por los combustibles fósiles, que representan alrededor del 80% del suministro de energía. Sin embargo, su impacto ambiental y la disminución de las reservas proyectadas generan preocupación sobre la sostenibilidad del abastecimiento energético. Ante este panorama, el hidrógeno (H_2) se perfila como una alternativa renovable gracias a su alto poder calorífico (120 MJ kg^{-1}) y bajas emisiones cuando se produce de manera sostenible (Al-Haddad et al. 2023). Entre las rutas biológicas para obtener H_2, la fermentación oscura (DF) destaca por su capacidad para utilizar residuos orgánicos ricos en carbohidratos, producir energía *in situ* y generar bajas emisiones de CO_2 (<1 kg CO_2 kg^{-1} H_2). Su aplicación es especialmente relevante en regiones con abundante residuo agroindustrial, como el Huila, Colombia, donde el café es el principal producto agrícola y su procesamiento húmedo genera altos volúmenes de residuos líquidos y solidos con elevada carga contaminante (Campos et al. 2021). Algunos estudios reportan el uso de residuos del café en la producción de hidrógeno, tal es el caso de Lourenço et al. (2025), quienes alcanzaron 605,75 mL H_2 con una mezcla de aguas residuales de café, estiércol porcino y pulpa de café, bajo condiciones termofílicas (55 °C) y una relación C/N de 35. La combinación de mucílago de café, mucílago de cacao y estiércol produjo 90 mL H_2 $día^{-1}$ (Rangel et al. 2021). Otros residuos del café también han mostrado potencial con 82 mL H_2 a partir de pulpa, cascarilla y aguas residuales de café (Villa Montoya et al. 2019). 4,18 L H_2 kg^{-1} de pulpa de café y vinaza como inóculo (Miñón-Fuentes y Aguilar-Juárez 2019), y 284,02 mL H_2 g^{-1} COD^{-1} usando mucílago de café y cacao (Rangel et al. 2021). Sin embargo, existe escasa información sobre el potencial del agua del primer lavado de café (FWCW) en este proceso. En este contexto, la presente investigación evaluó la producción de H_2 mediante DF utilizando co-digestión de FWCW con residuos vegetales (lechuga, repollo, perejil, apio y brócoli), jugo de caña y pulpa de café como sustrato, sin inoculación de microorganismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sustrato consistió en una mezcla de VW, FWCW, CP, SCJ y agua. VW y FWCW fueron seleccionados como fuentes de carbono y portadores de microorganismos con potencial para la producción de hidrógeno, según lo reportado por Cárdenas et al. (2020). FWCW y CP se recolectaron en la finca Los Naranjos (Pitalito, Huila), VW en la plaza de mercado local y SCJ en una planta panelera de Palestina, Huila. Los ensayos se realizaron en un biorreactor batch de 50 L (volumen útil 35 L) con control de temperatura, agitación y presión. Un sistema basado en Arduino registró los parámetros de operación, mientras que la producción de gas se midió con un medidor de gas. El montaje se efectuó en el laboratorio de Química de la Universidad Surcolombiana, sede Pitalito. Se aplicó un diseño completamente aleatorizado con tres tratamientos (L1, L2, L3) y tres repeticiones, variando las proporciones de VW, FWCW, CP, SCJ y agua (% v/v) de la siguiente manera: L1 (18:25:5:5:47), L2 (18:48:0:0:35) y L3 (18:68:0:0:14). El sustrato se acidificó durante 72 h a temperatura ambiente antes de ajustar el pH a 6,5 con Na_2CO_3 para iniciar la fermentación. Las condiciones de operación incluyeron temperatura de 35±0,5 °C, pH operativo de 6,5–7,0 y agitación intermitente (2 min/h). Siguiendo el procedimiento descrito en la patente de invención 31671 otorgada a la Universidad Nacional de Colombia para la producción de H_2. Las variables de respuesta fueron la tasa máxima de producción de hidrógeno (HP, L H_2 h^{-1} d_{max}^{-1}), producción acumulada (CHP, L H_2), contenido máximo de H_2 (MCH, $\%H_2$), productividad por sustrato (Y_S, L H_2 $L_{Substrate}^{-1}$), tasa media máxima de producción de hidrógeno ($R_{max\text{-}avg}$, L H_2 h^{-1}) y tasa específica de producción de hidrógeno por biomasa (SYPB, L H_2 h^{-1} L^{-1}). La producción acumulada de H_2 se ajustó al modelo de Gompertz modificado (Ecuación 1). Donde H es la producción acumulada de hidrógeno (mL), λ es el tiempo de la fase de retraso (h), P es la producción potencial de hidrógeno (mL), R_{max} es la tasa máxima de producción de hidrógeno (mL h^{-1}), t corresponde al tiempo transcurrido en horas, y e es 2,718281828.

$$H = P.\exp * \left\{ -\exp\left[\frac{R_{max} * e}{P} * (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Los resultados de H y R_{max} se sometieron a una prueba no paramétrica de rangos de Wilcoxon (α=0,05) para determinar las diferencias entre los tratamientos. Las concentraciones de H_2, CH_4, CO, CO_2 y N_2 en el gas se determinaron cada 16 h mediante cromatografía de gases (GC-TCD) en el laboratorio de Energías de la Universidad Nacional de Colombia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tratamiento L1 obtuvo el mayor contenido de hidrógeno (48,34% en L1-R2), superando valores reportados con glucosa (28–31%) por Al-Haddad et al. (2023). Estos resultados sin pretratamiento, evidencian alta eficiencia del proceso. El CO alcanzó 17,20% en L1-R2, atribuible a bacterias homoacetogénicas que usan H_2 y CO_2 sin afectar su producción. Estudios con residuos vegetales reportan concentraciones de H_2, CH_4, CO_2 y N_2 de 18,08, 0,20, 8,96 y 51,30% respectivamente (Moreno Cardenas et al. 2013). Además, cultivos mixtos pueden contener microorganismos consumidores de H_2, como bacterias metanogénicas, que reducen su disponibilidad. Estos hallazgos confirman que sustratos sin pretratamiento maximizan la producción de H_2 y minimizan subproductos indeseados, ofreciendo una alternativa sostenible para la producción de H_2.

En este estudio, la producción de hidrógeno osciló entre 1,37±1,37 y 1,87±0,38 L H_2 h^{-1} d_{max}^{-1}, con contenidos de H_2 de 34,37±9,45% a 43,9±3,89% y una producción acumulada de 43,63±17,39 a 70,03±2,65 L (Tabla 1). El mayor rendimiento se obtuvo en el tratamiento L1-R2, alcanzando 2,30 L H_2 h^{-1} d_{max}^{-1}. La mayor productividad por volumen de sustrato (Y_S) fue 2,00±0,08 L H_2 $L_{substrato}^{-1}$ bajo condiciones no estériles y sin inoculación, lo que demuestra la efectividad del co-sustrato utilizado. Estos valores son superiores a los reportados por Cárdenas et al. 2020), quienes obtuvieron 1,29 L H_2 $L_{substrato}^{-1}$ con mucílago de café y residuos orgánicos, y comparables a los logrados con residuos urbanos en bioreactores de agitación pulsada (1,90 L H_2 $L_{substrato}^{-1}$) (Cano Quintero y Moreno-Cárdenas 2019). Otros estudios han mostrado rendimientos variables, como 49,2 mL H_2 g^{-1} COD^{-1} con pulpa de café inoculada (Miñón-Fuentes y Aguilar-Juárez 2019) y hasta 2,5 mol H_2 $mol_{glucosa}^{-1}$ utilizando mucílago de café con inoculación y alta carga orgánica (Hernández et al. 2014). Asimismo, García-Depraect y León-Becerril (2023) sugieren que la co-fermentación con otros residuos, como frutas y vegetales, podría optimizar el proceso, lo que coincide con los resultados de este estudio.

Tabla 1. Indicadores de rendimiento de producción.

Trial	MCH ($\%H_2$)	MCH ($\%H_2$)±SD*	HP (LH_2 h^{-1} d_{max}^{-1})	HP (LH_2 h^{-1} d_{max}^{-1})±SD*	CPH (L H_2)	CPH (L H_2)±SD*	Y_S (L H_2 $L_{Substrate}^{-1}$)	Y_S (L H_2 $L_{Substrate}^{-1}$)±SD*
L1-R1	40,87		1,71		70,01		2,00	
L1-R2	48,35	43,99±3,89	2,30	1,87±0,38	72,69	70,03±2,65	2,08	2,00±0,08
L1-R3	42,74		1,59		67,39		1,93	
L2-R1	43,88		2,16		75,56		2,16	
L2-R2	41,02	41,08±2,77	1,38	1,61±1,61	56,80	56,79±18,78	1,62	1,62±0,54
L2-R3	38,35		1,28		38,00		1,09	
L3-R1	45,26		1,84		63,57		1,82	
L3-R2	29,56	34,37±9,45	1,05	1,37±1,37	31,62	43,63±17,39	0,90	1,25±0,50
L3-R3	28,29		1,22		35,69		1,02	

MCH=contenido máximo de hidrógeno en el gas, HP= tasa de producción de hidrógeno para el día de máxima producción, CPH=producción acumulativa de hidrógeno, Y_S=rendimineto del sustrato, ±SD=desviación estándar, *=valor promedio.

El modelo de Gompertz modificado aplicado a la producción acumulada de H_2 mostró que el mayor volumen se obtuvo en el ensayo L2-R1 con 75.556,69 mL (Figura 1). La fase de latencia varió entre tratamientos debido a diferencias en la velocidad de reacción tras la acidificación. El modelo presentó un coeficiente de correlación de 0,99 en todos los ensayos, confirmando su adecuado ajuste. La mayor R_{max} se registró en L1-R2 con 3.638,34 mL H_2 h^{-1} y una fase de latencia de 28 h, resultados comparables con los obtenidos por Hernández et al. (2014) en sistemas co-fermentativos. Asimismo, L1 presentó los mejores valores de $R_{max\text{-}avg}$ (2,70±0,82 L H_2 h^{-1}) y SYPB (0,08±0,02 L H_2 h^{-1} L^{-1}), coherentes con los reportados por Cano Quintero y Moreno-Cárdenas (2019) para residuos orgánicos. No obstante, es necesario analizar los parámetros de manera conjunta, ya que altos valores de tasa o rendimiento no siempre se traducen en mayor producción total, como ocurrió en L3-R3.

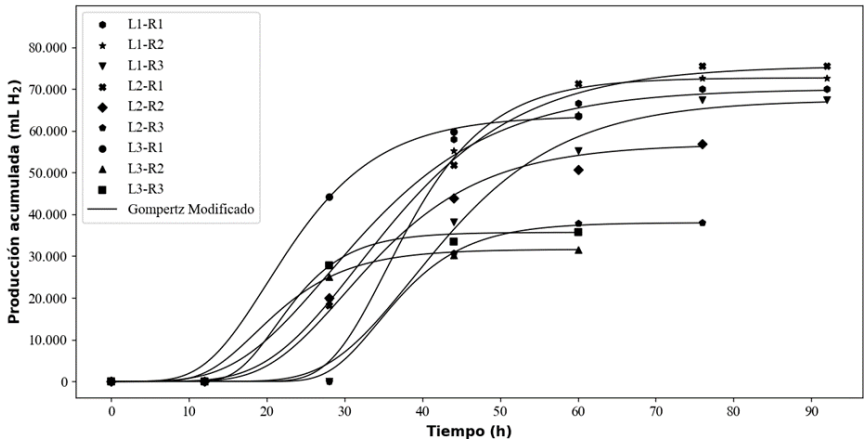


Figura 1. Producción acumulada de hidrógeno ajustada al modelo de Gompertz modificado en tres tratamientos (L1, L2, L3), cada uno con tres repeticiones (R1, R2, R3).

Villa Montoya et al. (2020a) reportaron con pulpa y cascarilla de café pretratadas a 150 °C valores de H_{max} de 244 mL, R_{max} de 11,40 mL h^{-1} y λ de 17,10 h, mientras que con aguas residuales de café pretratadas a 180 °C obtuvieron un H_{max} de 8 mL y R_{max} de 0,80 mL h^{-1} (Villa Montoya et al. 2020b). Moreno Cárdenas y Zapata Zapata (2019) observaron disminución de H_2 con cargas superiores a 70.000 mg O_2 L^{-1}. Muri et al. (2016) demostraron que el tipo de sustrato y el pH afectan la producción, ya que valores bajos de pH reducen la actividad de hidrogenasa. Estos resultados son coherentes con este estudio, donde el tratamiento L3, con menor proporción de agua y mayor carga orgánica, presentó los valores más bajos de H_{max}. El análisis estadístico mediante la prueba de Wilcoxon mostró diferencias significativas en la producción acumulada de H_2 (CHP) únicamente entre los tratamientos L1 y L3 (W=9, *P*=0,05), mientras que no se observaron diferencias entre L1-L2 (W=6, *P*=0,35) ni entre L2-L3 (W=7, *P*=0,20). En cuanto a la tasa máxima de producción (R_{max}), no se hallaron diferencias significativas entre los tratamientos (*P*>0,05). Estos resultados sugieren que la formulación de L2, que utiliza únicamente VW y FWCW, puede mantener rendimientos comparables a L1 sin necesidad de co-sustratos adicionales. La menor producción observada en L3 (14% de agua) indica un posible efecto inhibitorio por sobrecarga orgánica, fenómeno reportado en procesos de fermentación oscura donde altas cargas favorecen la formación de subproductos como propionato e isocaproato, que afectan negativamente la producción de H_2 (García-Depraect et al. 2021; García-Depraect y León-Becerril 2023).

CONCLUSIÓN

La fermentación oscura de FWCW en co-digestión con VW, SCJ o CP alcanzó un contenido máximo de H_2 de 43,99±3,89%, una productividad de 2,00±0,08 L H_2 $LSubstrato^{-1}$ y una tasa máxima promedio de 2,70±0,82 L H_2 h^{-1}, con un periodo de adaptación microbiana de 24±6,93 h. El test de Wilcoxon mostró diferencias significativas en la producción acumulada de H_2 entre L1 y L3 (*P*=0,05). Estos resultados confirman el potencial de FWCW y co-sustratos para la producción de hidrógeno y sugieren estudios futuros para caracterizar sustratos y comunidades microbianas, optimizando el proceso a escala industrial.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Surcolombiana, a su Facultad de Ingeniería y al decano Rómulo Medina Collazos por la financiación, así como a Roger Iván Quiñones y Lady Marcela Navia por el apoyo adicional. También agradecemos a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por permitir el uso de su patente.

REFERENCIAS

Al-Haddad S, Okoro-Shekwaga CK, Fletcher L, et al (2023) Assessing Different Inoculum Treatments for Improved Production of Hydrogen through Dark Fermentation. Energies (Basel) 16:1–15. https://doi.org/10.3390/en16031233

Campos RC, Pinto VRA, Melo LF, et al (2021) New sustainable perspectives for "Coffee Wastewater" and other by-products: A critical review. Future Foods 4:. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058

Cano Quintero DY, Moreno-Cárdenas EL (2019) Incidence of operative parameters in the production of biohydrogen generated from urban organic waste. Rev Fac Nac Agron Medellin 72:8841–8853. https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n2.73138

Cárdenas ELM, Zapata-Zapata AD, Kim D (2020) Modeling dark fermentation of coffee mucilage wastes for hydrogen production: Artificial neural network model vs. fuzzy logic model. Energies (Basel) 13:1–13. https://doi.org/10.3390/en13071663

García-Depraect O, Castro-Muñoz R, Muñoz R, et al (2021) A review on the factors influencing biohydrogen production from lactate: The key to unlocking enhanced dark fermentative processes. Bioresour Technol 324:1–14. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124595

García-Depraect O, León-Becerril E (2023) Use of a Highly Specialized Biocatalyst to Produce Lactate or Biohydrogen and Butyrate from Agro-Industrial Resources in a Dual-Phase Dark Fermentation. Fermentation 9:. https://doi.org/10.3390/fermentation9090787

Hernández MA, Rodríguez Susa M, Andres Y (2014) Use of coffee mucilage as a new substrate for hydrogen production in anaerobic co-digestion with swine manure. Bioresour Technol 168:112–118. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.101

Lourenço VA, Camargo FP, Sakamoto IK, et al (2025) Influence of substrates proportion and concentration on biogas composition and yield in the co-digestion of solid and liquid waste from coffee and swine farms. Renew Energy 249:1–19. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123191

Miñón-Fuentes R, Aguilar-Juárez O (2019) Hydrogen production from coffee pulp by dark fermentation. Water Science and Technology 80:1692–1701. https://doi.org/10.2166/wst.2019.416

Moreno Cardenas EL, Cano Quintero DJ, Elkin Alonso CM (2013) Generation of Biohydrogen by Anaerobic Fermentation of Organics Wastes in Colombia. In: Liquid, Gaseous and Solid Biofuels - Conversion Techniques. InTech, pp 377–400

Moreno Cárdenas EL, Zapata Zapata AD (2019) Biohydrogen production by co-digestion of fruits and vegetable waste and coffee mucilage. Rev Fac Nac Agron Medellin 72:9007–9018. https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.73140

Muri P, Črnivec IGO, Djinović P, Pintar A (2016) Biohydrogen production from simple carbohydrates with optimization of operating parameters. Acta Chim Slov 63:154–164. https://doi.org/10.17344/acsi.2015.2085

Rangel CJ, Hernández MA, Mosquera JD, et al (2021) Hydrogen production by dark fermentation process from pig manure, cocoa mucilage, and coffee mucilage. Biomass Convers Biorefin 11:241–250. https://doi.org/10.1007/s13399-020-00618-z

Tiegam Tagne RF, Costa P, Gupte AP, et al (2024) Efficient production of biohydrogen from African lignocellulosic residues. Sustainable Energy Technologies and Assessments 72:. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104060

Villa Montoya AC, Cristina da Silva Mazareli R, Delforno TP, et al (2019) Hydrogen, alcohols and volatile fatty acids from the co-digestion of coffee waste (coffee pulp, husk, and processing wastewater) by applying autochthonous microorganisms. Int J Hydrogen Energy 44:21434–21450. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.115

Villa Montoya AC, Cristina da Silva Mazareli R, Silva EL, Varesche MBA (2020a) Improving the hydrogen production from coffee waste through hydrothermal pretreatment, co-digestion and microbial consortium bioaugmentation. Biomass Bioenergy 137:1–11. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105551

Villa Montoya AC, da Silva Mazareli RC, Delforno TP, et al (2020b) Optimization of key factors affecting hydrogen production from coffee waste using factorial design and metagenomic analysis of the microbial community. Int J Hydrogen Energy 45:4205–4222. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.062

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Producción de biohidrógeno por fermentación oscura de pulpa y cáscara de plátano pretratado

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Biohydrogen production by dark fermentation of banana pulp and pretreated peel

Jenny Paola Díaz Landinez[1]*, Edilson León Moreno Cárdenas[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Biomasa lignocelulósica
Fermentación
Hidrógeno
Plátano
Pretratamiento
Residuos orgánicos

La producción de hidrógeno por fermentación oscura (FO) de residuos agroindustriales constituye una fuente de energía alternativa y sostenible. Se evaluó un proceso para la producción de hidrógeno por FO teniendo presente la carga orgánica (DQO), pH y pretratamiento con NaOH y ultrasonido a partir de residuos de plátano de Arauca. Para ello, se utilizó un biorreactor batch de 20 litros en condiciones mesófilas, sin inóculo ni esterilización, siguiendo un diseño central compuesto. Las variables de respuesta; producción máxima diaria de hidrógeno (MDP), contenido máximo de hidrógeno en el gas (MHC) y producción acumulada (CHP) mostraron un ajuste aceptable a modelos polinomiales de segundo orden significativos, según análisis de varianza (ANOVA). Se obtuvo un rendimiento de 1,16 mol H_2/mol hexosa y una productividad máxima de 5 LH_2 d^{-1}, sin tratamiento a pH entre 5,5 y 6, y DQO sobre 60.000 mgO_2 L^{-1}.

ABSTRACT

Keywords:
Lignocellulosic biomass
Fermentation
Hydrogen
Plantain
Pretreatment
Organic waste

Hydrogen production through dark fermentation (DF) of agro-industrial waste is an alternative and sustainable source of energy. A process for hydrogen production by DF was evaluated in terms of the effects of organic load (COD), pH, and pretreatment with NaOH and ultrasound on plantain waste from Arauca. For this purpose, a 20-liter batch bioreactor was used under mesophilic conditions, without inoculum or sterilization, following a central composite design. The response variables: maximum daily hydrogen production (MDP), maximum hydrogen content in gas (MHC), and cumulative production (CHP) showed an acceptable fit to significant second-order polynomial models according to the analysis of variance (ANOVA). A yield of 1.16 mol H_2/mol hexose and a maximum productivity of 5 LH_2 d^{-1} were obtained, without treatment at pH between 5.5 and 6, and COD above 60,000 mgO_2 L^{-1}.

[1]Facultad de Ciencias Agrarias, Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jediazla@unal.edu.co
[2]Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín,Colombia. elmorenoc@unal.edu.co
Corresponding author: jediazla@unal.edu.co

 ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

El hidrógeno (H_2) como combustible representa una solución prometedora para mitigar los efectos del cambio climático (Das y Basak, 2024). En la FO, los microorganismos transforman materia orgánica en H_2, y su bajo rendimiento puede mejorarse usando biomasa lignocelulósica pretratada con NaOH y ultrasonido. En este sentido, surgió la posibilidad de generar energía renovable a partir de la agroindustria platanera de Arauca que supera las 840.000 toneladas de plátano anuales (AGRONET, 2023). Además, el pretratamiento básico con ultrasonido puede ayudar la liberación de azúcares y mejorar el rendimiento. Es así como se planteó evaluar la incidencia de un pretratamiento en la producción de biohidrógeno durante la fermentación oscura. Efectivamente, los resultados indicaron que es posible producir H_2 a partir de residuos de plátano, sin requerir pretratamiento de la cáscara.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se usó como sustrato residuos de plátano maduro del departamento de Arauca los cuales fueron pretratados con NaOH 1N (4% p/v) por 2 horas y una frecuencia de 40 kHz a 40 °C por 1 hora. Se evaluó la composición de las cáscaras según el protocolo del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). Se realizó aislamiento y tipificación de las colonias con VITEK^{R}2 Compact. El inóculo fue conformado con las cepas identificadas de los montajes con producción de H_2. Con el software Design Expert®, se aplicó un diseño experimental de composición central, con tres variables independientes: pH, DQO y pretratamiento (P, alcalino y ultrasonido + alcalino) y, dependientes: producción máxima diaria de hidrógeno (MDP), contenido máximo de hidrógeno en el gas (MHC) y producción acumulada (CHP). Se hizo seguimiento de los ácidos orgánicos y azúcares con cromatografía líquida de alto desempeño. Muestras de gas fueron tomadas y analizadas por cromatografía de gases. Se realizó un ANOVA a las variables dependientes y se obtuvieron modelos y los coeficientes R^2, R^2 ajustado y R^2 predictivo. Luego, se optimizaron los modelos por un método numérico de ascenso por pasos y otro gráfico basado en la maximización de la función de deseabilidad aplicado a las variables dependientes según Moreno y Zapata, 2019.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentó un leve aumento del contenido de los azúcares y la fracción de lignina insoluble en la muestra posterior a los pretratamientos con base y ultrasonido + base según la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de las cáscaras de plátano para el testigo, el pretratamiento con NaOH y el pretratamiento NaOH+ ultrasonido. Los datos representan la media ± SD de tres mediciones independientes.

Componente	Control	Pretratamiento NaOH	Control	Pretratamiento NaOH+ Ultrasonido
Lignina Insoluble	23,95 ± 0,13	30,13 ± 1,53	33,9 ± 0,54	36,22 ± 0,12
Celulosa	30,45 ± 7,09	30,37 ± 4,19	27,12 ± 6,04	32,28 ± 1,87
Hemicelulosa	14,32 ± 3,42	16,12 ± 2,77	12,17 ± 2,60	17,19 ± 1,68

Según la prueba de Wilcoxon (Tabla 2), no hubo evidencia estadística de cambios en el contenido de celulosa y hemicelulosa del control frente al pretratamiento básico o el asistido con ultrasonido. Esto a causa posiblemente de la sensibilidad del método de caracterización o la exposición de las fibras internas de celulosa y hemicelulosa (García-Negrón et al., 2024), o una posible interferencia en la medida de lignina con el protocolo NREL (Chen et al., 2024).

Tabla 2. Prueba Wilcoxon para evaluar el contenido de celulosa y hemicelulosa según pretratamiento NaOH vs pretratamiento NaOH + ultrasonido vs control.

	Control		Pretratamiento NaOH		P- value	Control			Pretratamiento NaOH+ Ultrasonido			P- value
Celulosa	25,4	35,4	27,4	33,3	1	22,8	31,3	13,5	27,3	30,9	33,6	0,5
Hemicelulosa	11,9	16,7	14,1	18,0	0,5	10,3	14,0	14,3	12,2	16,0	18,3	0,2

Se obtuvieron 7 aislamientos del fermento sin tratamiento: *Pantoea spp, Klebsiella pneumoniae, Bacillus pumilus, Aeromonas salmonicida, Alloiococcus otitis, Sphingomonas paucimobilis, Granulicatella adiacens.* A partir del fermento con tratamiento: *Aeromonas hydrophila, Rothia kristinae y Alloicoccus otitis* (tabla no mostrada). En este sentido, podría ser favorecida la producción de ácido láctico a partir de la fermentación de carbohidratos y posteriormente en la producción de acético, butírico y H_2, aunque las especies no corresponden directamente a bacterias lácticas, butíricas o acéticas (Dev et al., 2022; Liu et al., 2023). Los azúcares, fructosa y glucosa fueron predominantes y se consumieron al final de cada prueba (datos no mostrados). Se observó síntesis de ácido láctico para metabolizar acético, propiónico y butírico, este último en mayor proporción al final de la FO. Se confirmó la posibilidad de liberar H_2 en la FO en condiciones de pH y temperatura ideales para bacterias acéticas, butíricas y propiónicas (Pérez-Rangel et al., 2025). En la tabla 3, los valores más altos de MHC fueron para los puntos centrales, es decir: pH 6, DQO 60.000 mgO_2 L^{-1} y sin P, donde la mayor producción de H_2 se da en pH neutrales (Mazareli et al, 2021). El mayor rendimiento fue en el ensayo 5 con 1,16 mol H_2/mol hexosa, DQO de 60.000 mgO_2 L^{-1}. No obstante, la prueba 4 obtuvo 41,9 % H_2 con más carga orgánica, a pH de 6 y sin P, aunque menor MDP que la prueba 7 con 5 LH_2 d^{-1} con pH de 5,5. Respecto al sustrato, los ensayos 3 y 13 con mayor DQO tuvieron menor MHC, puesto que una concentración menor a 40 mg L^{-1} (ensayo 1 y 8) y sobre 80 mg L^{-1} promueve un desequilibrio microbiano no productor de H_2 (Jung et al., 2021).

Tabla 3. Resultados experimentales en las variables dependientes según diseño experimental.

Test	pHo	DQO (mgO_2 L^{-1})	P	MHC (%H_2)	MDP (LH_2 d^{-1})	CHP (LH_2)	Yield (mol H_2/mol Hexose)
1	6,5	40.000	1	26,7	2,7	4,9	0,58
2	6	60.000	1,4	40,1	2,5	6,9	0,52
3	5,5	80.000	1	21,9	1,1	2,5	0,09
4	6	88.284	0	41,9	3,8	13,1	0,28
5	6	60.000	0	38,6	4,6	12,3	1,16
6	6,7	60.000	0	21,6	3,5	4,6	0,21
7	5,5	60.000	0	32	5	13	0,27
8	6	31.716	0	0,0	0,0	0,0	0,00
9	6	60.000	-1,4	23,6	0,7	1,3	0,09
10	5,5	40.000	-1	22,1	3,2	7,9	0,49
11	6	60.000	0	38,9	3,4	10,4	0,32
12	6	60.000	0	35,7	4,6	12,1	0,60
13	6,5	80.000	-1	0,0	0,0	0,0	0,00

Los ensayos pretratados no mostraron aumentos en las variables de respuesta, aún con DQO y pH ideales (Tabla 3). En la literatura el tratamiento con NaOH se implementa con temperatura para lograr una delignificación de 92% y 67% a partir de 1N NaOH + Ultrasonido de 22 kHz a 80 °C y 70 °C por 2h (Dutta et al., 2023; Kininge y Gogate, 2022). El modelo cuadrático fue significativo para MHC, MDP y CHP (Tabla no mostrada), siendo estadísticamente significativos DQO y P para MHC. DQO para MDP y para CHP, todos los términos lineales fueron significativos. De forma similar, otros estudios reportan que la productividad del H_2 aumenta con la DQO y disminuye con el pH (Moussa et al., 2022). Las ecuaciones de regresión en función de los términos estadísticamente significativos del ANOVA fueron:

MHC = - 1232,30928+0,003861B-262,69914C+43,07777AC-31,38315A^2-2,20X10^(-8) B^2-3,3687C^2 [1]

MDP = + 24,62117+0,00013B+5,08701AC-2,95X10^(-9) C^2-1,33321C^2 [2]

CHP= -128,63853+ 52,87438 A-0,000272B-80,03438C+0,000210AB+14,41310AC-5,93583A^2-6,33198x10^(-9) B^2-3,75779C^2 [3]

Donde: A, B y C hace referencia a pH, DQO y pretratamiento, respectivamente.

En la optimización numérica (Tabla 4), MHC pasó de 41,9 a 57 % H_2, MDP de 5 a 5,5 LH_2 d^{-1} y CHP de 13,1 a 14,6 LH_2. Por otro lado, la optimización gráfica (figura no mostrada) arrojó condiciones de DQO de 68.487 mg L^{-1}, pH de 6,4 y sin pretratamiento (0,5), para obtener un MHC de 49,1%, una MDP de 5,3 LH_2 L^{-1} y una CHP de 13,3 LH_2. Otros autores reportan condiciones óptimas en pH cerca a la neutralidad (Das y Basak, 2024). Por otro lado, los resultados en la optimización simultánea son consistentes con los reportes de un trabajo previo bajo el mismo proceso biotecnológico de producción de H_2 a partir de residuos de frutas y verduras (Moreno y Zapata., 2019).

Tabla 4. Optimización numérica de las variables de respuesta según las variables independientes.

pHo	DQO (mgO_2 L^{-1})	P	MHC (%H_2)	MDP (LH_2 d^{-1})	CHP(LH_2)
6,4	73.695	0,83	57		
6,4	68.120	0,67		5,5	
5,6	75.480	-0,26			14,6

CONCLUSIÓN

No se observó delignificación con NaOH y ultrasonido en las cáscaras de plátano. Se identificaron 10 especies de bacterias a partir de los residuos de plátano de Arauca. Se produjo hidrógeno con MDP de 5 LH_2 d^{-1}, 41,9% de MHC y un rendimiento de 1,16 mol H_2/mol hexosa. La optimización simultanea de las variables de respuesta resultó en condiciones de DQO: 68.487 mgO_2 L^{-1}, pH de 6,4 y sin pretratamiento.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por financiar el proyecto de investigación "Centro de excelencia (CE) para la innovación en mecanización y opciones energéticas para la agricultura familiar" (código: 52937).

REFERENCIAS

Agronet. (2023). Comparativo de Área, Producción, Rendimiento y Participación Departamental por Cultivo. https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3

Chen, N., Jiang, K., Zhao, M., Zhang, C., Jin, Y., & Wu, W. (2024). Pretreatment process of lignocellulosic biomass: A review of pseudo-lignin formation. Biomass and Bioenergy, 188, 107339. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107339

Das, S. R., & Basak, N. (2024). Optimization of process parameters for enhanced biohydrogen production using potato waste as substrate by combined dark and photo fermentation. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(4), 4791-4811.https://doi.org/10.1007/s13399-022-02588-w

Dev, M. J., Warke, R. G., Warke, G. M., Mahajan, G. B., Patil, T. A., & Singhal, R. S. (2022). Advances in fermentative production, purification, characterization and applications of gellan gum. Bioresource Technology, 359, 127498. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127498

Dutta, A., Kininge, M. M., & Gogate, P. R. (2023). Intensification of delignification and subsequent hydrolysis of sustainable waste as banana peels for the HMF production using ultrasonic irradiation. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 183, 109247. https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109x247

García-Negrón, V., Stoklosa, R. J., & Toht, M. J. (2024). Effects of NaOH and Na2CO3 pretreatment on the saccharification of sweet sorghum bagasse. Frontiers in Chemical Engineering, 6, 1449114. https://doi.org/10.3389/fceng.2024.1449114

Jung, J. H., Sim, Y. B., Baik, J. H., Park, J. H., & Kim, S. H. (2021). High-rate mesophilic hydrogen production from food waste using hybrid immobilized microbiome. Bioresource technology, 320, 124279. 10.1016/j.biortech.2020.124279

Kininge, M. M., & Gogate, P. R. (2022). Intensification of alkaline delignification of sugarcane bagasse using ultrasound assisted approach. Ultrasonics Sonochemistry, 82, 105870. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105870

Liu, W., Pang, J., Wu, D., Zhang, L., Xing, D., Hu, J., Li, Y & Liu, Z. (2023). Hydrogen production by a novel Klebsiella pneumoniae strain from sheep rumen uses corn straw as substrate. Energy, 282, 128210. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128210

Mazareli, R. C., Montoya, A. C. V., Delforno, T. P., Centurion, V. B., de Oliveira, V. M., Silva, E. L., & Varesche, M. B. A. (2021). Enzymatic routes to hydrogen and organic acids production from banana waste fermentation by autochthonous bacteria: optimization of pH and temperature. International Journal of Hydrogen Energy, 46(12), 8454-8468. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.063

Moreno, E., & Zapata, A. (2019). Biohydrogen production by co-digestion of fruits and vegetable waste and coffee mucilage. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 72, 9007-18. https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.73140

Moussa, R. N., Moussa, N., & Dionisi, D. (2022). Hydrogen production from biomass and organic waste using dark fermentation: an analysis of literature data on the effect of operating parameters on process performance. Processes, 10(1), 156. https://doi.org/10.3390/pr10010156

Pérez-Rangel, M., Villanueva-Galindo, E., & Moreno-Andrade, I. (2025). Hydrogen production from lactic acid-rich effluent of food waste fermentation: influence of pH, type and inoculum concentration, and physical pretreatment of the substrate. Journal of Environmental Chemical Engineering, 13(2), 116033. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116033

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Aplicación de lógica difusa para el modelado de la producción de hidrógeno semicontinua en fermentación oscura

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Fuzzy logic application for modeling semi-continuous hydrogen production in dark fermentation

Cindy Yurani Correa Villa1*, Edilson León Moreno Cardenas[2] and Johannes de Bruijn[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Ácido láctico
Hidrógeno
Lógica difusa
Mucílago de café
Tiempo retención hidraúlica

La producción biológica de hidrógeno por fermentación oscura depende de múltiples factores entre ellos la operación del biorreactor. Los biorreactores semicontinuos alimentados con ácido láctico (AL) proveniente de residuos orgánicos se perfilan como una alternativa para aumentar la estabilidad del proceso; sin embargo, otros factores como la variabilidad del sustrato y la diversidad microbiana, hacen del mismo un sistema altamente no lineal donde las técnicas de modelado convencionales presentan limitaciones. En este estudio, se tomaron datos experimentales para crear un modelo de lógica difusa (LD) que estime la tasa de producción de hidrógeno (TP) en función del tiempo de retención hidráulica (TRH) y de la concentración de AL obtenido por acidificación natural del mucílago de café. El principal hallazgo indica que las mayores TP se alcanzan en TRHs entre 0,3 y 1 días y concentración de AL entre 10 a 25 g L^{-1}. El modelo permitió estimar con gran precisión la TP con un RMSE=1,124, lo que indica que fue capaz de reproducir adecuadamente las tendencias, incluyendo la no linealidad del fenómeno y la interacción TRH y la concentración de AL.

ABSTRACT

Keywords:
Lactic acid
Hydrogen
Fuzzy logic
Coffee mucilage
Hydraulic retention time

Biological hydrogen production by dark fermentation depends on multiple factors, including the biorreactor operation. Semi-continuous bioreactors fed with lactic acid (LA) from organic waste ermerge as an alternative to enchance process stability; however, other factors such as substrate variability and microbial diversity result in a highly nonlinear system, where conventional modelling techniques mean limitations. In this study, experimental data were used to create a Model of Fuzzy Logic (FL) to estimate the hidrogen production rate (HPR) as a function of hydraulic retention time (HRT) and LA concentration obtained from natural acidification of coffee mucilage. The main finding indicates that the highest HPR are achieved at HRTs between 0.3 and 1 days and LA concentrations between 10 and 25 g L^{-1}. The model estimated with high accuaracy the HPR with RMSE=1.124, which means that it was able to adequately reproduce the observed trends, including nonlinearity of the phenomena and the interaction between HRT and LA concentration.

[1]Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillán, Chile. ORCID: 0009-0004-2661-645X; ORCID: 0000-0001-9282-8574
[2]Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Colombia. ORCID: 0000-0001-5693-4273
*Corresponding author: cicorrea@udec.cl

CC BY NC SA

Los sistemas de fermentación oscura (FO) que integran ácido láctico (AL) derivado de residuos orgánicos, emergen como una alternativa biotecnológica que favorece la estabilidad y eficiencia de la producción de hidrógeno (Correa-Villa et al., 2024). Aun así, persisten vacíos en el conocimiento sobre las condiciones de operación de biorreactores en semi-continuo que permitan una conversión eficiente y estable del AL a hidrógeno. Asimismo, existen pocos estudios que hayan modelado la producción de hidrógeno por FO en modo semi-continuo, utilizando residuos orgánicos y cultivos mixtos (Albanez et al., 2016). Esto se debe a su complejidad ligada a la interacción de múltiples factores críticos, como la composición del sustrato, la alta diversidad microbiana y las condiciones operativas. Es así como la lógica difusa (LD) se ha destacado como una herramienta matemática poderosa para analizar sistemas con alta complejidad, permitiendo gestionar la incertidumbre y la ambigüedad inherentes a los procesos biotecnológicos. Estudios previos han demostrado su eficacia para predecir con precisión la producción de hidrógeno en batch a partir de la co-digestión de mucílago de café y residuos de frutas y verduras (Moreno Cárdenas et al., 2020). Por lo anterior, en el presente estudio se evaluó la capacidad predictiva de un modelo de lógica difusa como herramienta matemática para estimar la tasa de producción de hidrógeno en función de diferentes tiempos de retención hidráulica y concentraciones de ácido láctico proveniente de mucílago de café.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño Experimental (DE): Se utilizó un diseño de composición central con 16 corridas empleando Design Expert 11.0 (Stat-Ease® Inc., MN, USA). La concentración del AL (C_{AL}; g L^{-1}) varió entre 5 y 35 g L^{-1}, con un valor central de 20 g L^{-1} y puntos axiales de 5 y 35 g L^{-1}. El tiempo de retención hidraulica (TRH; días) varió entre 0,5 y 3,5 días, con axiales de 0,5 y 3,5 días y con un valor central de 2 días . Los ensayos se ejecutron en el Laboratorio de Mecanización Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Sustrato e Inóculo: El mucilago de café utilizado como sustrato fue recolectado en tres fincas cafeteras ubicadas en el suroeste de Antioquía, Colombia, y se sometió a una acidificación natural para forma AL durante un periodo superior a 24 horas. Posteriormente, se ajustó la C_{AL} mediante dilución con agua o adición de AL al 88%, según el DE. Para obtener el inóculo productor de hidrógeno se llevó a cabo una autofermentación oscura de residuos de frutas y verduras en un biorreactor en batch con un volumen de trabajo de 16 L, siguiendo la metodología descrita por Cano Quintero & Moreno-Cárdenas (2019). Este inóculo fue empleado en cantidades iguales para cada ensayo.

Operación del biorreactor en modo semi-continuo: Se emplearon dos biorreactores de acero inoxidable de 20 L equipados con control de temperatura y agitación mecánica intermitente (100 rpm, 5 min h^{-1}). Inicialmente se operaron en modo batch, llenándose al 60% de su volumen, del cual 8,3% fue inóculo y 91,7% mucilago de café fresco. Posteriormente, se operaron en semi-continuo, removiendo el 33% del fermentado a frecuencias definidas por el TRH según el DE y reemplazándolo con una cantidad equivalente de mucilago de café previamente sometido a la acidificación natural y ajustado a su C_{AL}. El sistema mantuvo una temperatura de 31,0 ± 1,0°C y pH 6,75 ± 0,08 con la adición de Na_2CO_3 y cal agrícola.

Análisis fisicoquímicos: El volumen de gas se midió con un gasómetro (Mertex G2,5; precisión 0,040 m^3; presión máxima 40 kPa), y se tomaron muestras en bolsas TEDLAR® para análisis de su composición (H_2, CH_4, CO_2 y otros gases presentes). La misma fue determinada en un cromatógrafo de gases (MicroGC Agilent 3000) con detector de conductividad térmica (TCD), una columna de tamiz molecular de 5"A"de 10 m x 0,32 con gas de arrastre de Argón 5,0 y una columna PLOT U (8 m x 0,32 mm; gas portador: helio). El inyector operó a 60°C y las columnas a 80°C y 30 psi. El ácido láctico se cuantificó por método colorimétrico en un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific), con curva de calibración 1 y 8 g L^{-1}. El pH se determinó diariamente con un potenciómetro (SI Analytics Laboratorio 855).

Modelamiento con lógica difusa*:* Fueron definidas dos variables de entrada (TRH, C_{AL}) y una variable de salida correspondiente a la tasa de producción de hidrógeno (TP; LH_2 d^{-1}). Los datos númericos de entrada

y salida fueron transformados en conjuntos difusos, utilizando funciones de pertenencia trapezoidales. El sistema difuso empleado fue Mandani tipo 1, con reglas de inferencia difusa IF-THEN. El método de implicación utilizó el operador AND para evaluar las reglas (mínimo), mientras que el método de agregación se calculó mediante el operador OR (máximo). Las salidas difusas fueron transformadas a valores en el dominio original con el método del centroide. Se usó la heramienta de *Fuzzy Logic designer* de MATLAB R2025a® para implementar, su ajuste se obtuvo a través del cuadrado medio del error (RMSE) entre sus estimaciones y los datos experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos experimentales se presentan en la Tabla 1 y reflejan el efecto combinado del TRH y C_{AL} sobre la TP. Se observó una amplia variabilidad en los valores TP, que oscilaron entre 0,125 y 50,73 LH_2 d^{-1}. El comportamiento confirma la sensibilidad del sistema y justifica modelar el proceso mediante LD para capturar su naturaleza no lineal.

Tabla 1. Resultados de la tasa de producción de hidrógeno obtenidos en los ensayos experimentales.

Ensayo	TRH (días)	C_{AL} (g L^{-1})	TP (LH_2 d^{-1})
1	0,5	20	46,97
2	1	10	30,25
3	1	30	2,181
4	2	5	0,125
5	2	20	7,888
6	2	20	8,504
7	2	20	11,69
8	2	20	9,208
9	2	20	8,552
10	2	35	9,273
11	3	10	2,421
12	3	30	4,412
13	3,5	20	5,185
14	0,5	20	50,73
15	1	10	30,42
16	1,5	20	13,95

Con base en los datos experimentales se definieron los dominios para los conjuntos difusos de las variables de entrada (TRH; C_{AL}), y de la variable de salida (TP). TRH y C_{AL} se representaron con cinco conjuntos (muy bajo, medio bajo, bajo, medio y alto) en los dominios 0-4,5 días y 0-40 g L^{-1}, respectivamente. TP se representó con siete conjuntos (muy bajo, medio bajo, bajo, medio, medio alto, alto, muy alto) en el domidio 0-55 LH_2 d^{-1}. En la Figura 1 se muestran las funciones de pertenencias trapezoidal asignadas a cada conjunto en las variables de entrada y salida.

Una vez definidas las pertenencias, se construyeron 36 reglas derivadas de los resultados experimentales, cubriendo las combinaciones relevantes entre TRH y C_{AL} para estimar la TP. Tras la inferencia Mamdami y la conversión de las salidas difusas al dominio de la variable se obtuvo la superficie de respuesta (Figura 2). Se observa que la C_{AL} no es el factor principal que determina la TP y es condicionada por TRH. La TP incrementa para una C_{AL} entre 10-25 g L^{-1} cuando el TRH es bajo (0,3-1,0 días) y disminuye a valores menores de 10 g L^{-1} y mayores de 30 g L^{-1}. En cambio, el efecto de C_{AL} es poco relevante sobre TP aTRH mayores de 2,0 días. Se observa un máximo de TP localizado para TRH bajos (0,3-1,0 días) y C_{AL} intermedias (10-25 g L^{-1}), en concordancia con los ensayos 1, 2, 14 y 15. Esto sugiere que un TRH bajo combinado con una concentración intermedia de sustrato, favoreció

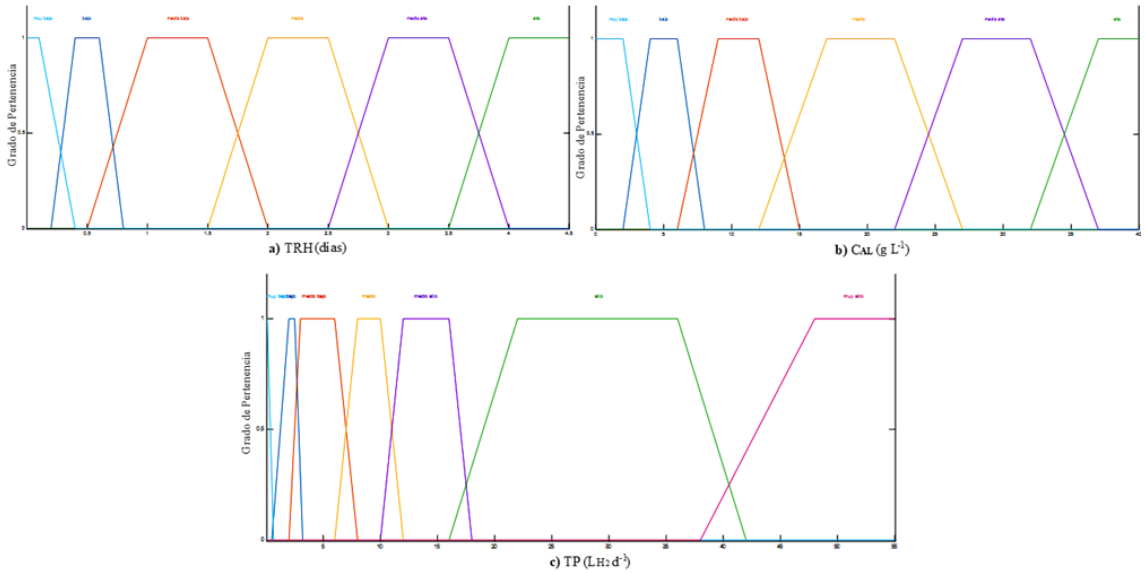


Figura 1. Funciones de pertenencia del modelo de LD: (a) TRH , (b) C_{AL} y (c) TP.

la actividad del inóculo y la conversión de AL, indicando que recambios más frecuentes del medio de fermentación reduce la acumulación de metabolitos inhibidores. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por García-Depraect et al., (2021), quienes observaron altas productividades en un biorreactor continuo operado con TRH entre 6 y 12 horas empleando ácido láctico como sustrato proveniente de vinaza de tequila.

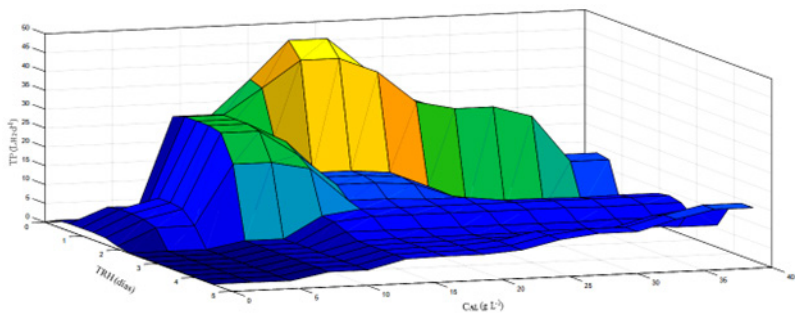


Figura 2. Superficie de respuesta para el modelo de LD para TP en la interacción TRH y $C_{A.L}$.

Finalmente, la comparación entre los valores experimentales de la TP y las estimaciones del modelo LD (Figura 3a) muestra un elevado grado de concordancia, con adecuada reproducción de los máximos y mínimos observados, obteniendose un bajo error global del ajuste (RMSE= 1,124). La serie de residuales (Figura 3b) se distribuye alrededor de cero, sin indicios de un sesgo sistemático. Ademas, el error se mantiene en valores cercanos a ± 1,2514 LH_2 d^{-1}, con discrepancias puntuales mayores bajo condiciones de TP extrema, asociadas a los ensayos 1, 7 y 14. Lo anterior demuestra que en el dominio evaluado, el modelo de LD captura con precisión la tendencia global y las variaciones locales de TP, ofreciendo una herramienta confiable para predecir el comportamiento del biorreactor semi-continuo en función del TRH y C_{AL}.

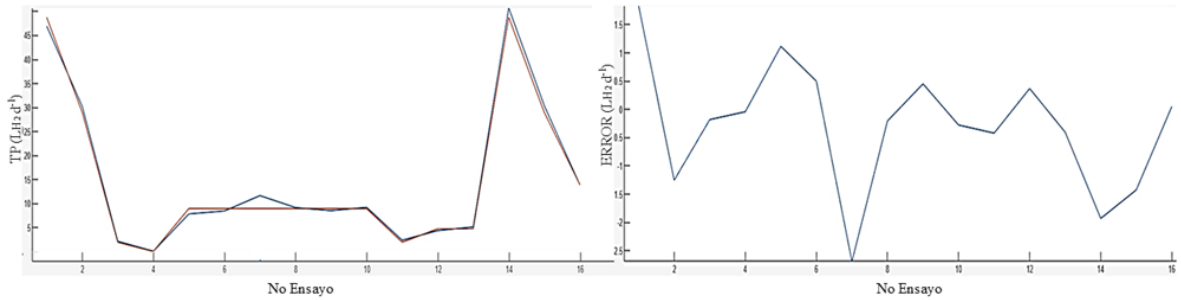


Figura 3. Validación del modelo de LD: (a) comparación entre los valores experimentales (línea azul) y estimados de la TP (línea naranja); (b) residuales (RMSE=1,124).

CONCLUSIÓN

Con base en el conjunto de los datos experimentales, se construyó un modelo de LD capaz de estimar la TP con precisión en un biorreactor semi-continuo a través de la influencia del TRH y la C_{AL} con bajo valor del error (RMSE=1,124). El modelo predice las condiciones de TRH y C_{AL} que permiten alcanzar los mejores resultados en laTP.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Programa de Formación de Capital Humano Avanzado, Chile, Folio No. 21221726 y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, proyecto de investigación “Centro de Excelencia (CE) para la innovación en mecanización y opciones energéticas para la agricultura familiar, código 52937”.

REFERENCIAS

Albanez, R., Lovato, G., Zaiat, M., Ratusznei, S. M., & Rodrigues, J. A. D. (2016). Optimization, metabolic pathways modeling and scale-up estimative of an AnSBBR applied to biohydrogen production by co-digestion of vinasse and molasses. International Journal of Hydrogen Energy, 41(45), 20473–20484. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.145

Cano Quintero, D. Y., & Moreno-Cárdenas, E. L. (2019). Incidence of operative parameters in the production of biohydrogen generated from urban organic waste. Revista Facultad Nacional de Agronomia Medellin, 72(2), 8841–8853. https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n2.73138

Correa-Villa, C., Moreno-Cárdenas, E., & de Bruijn, J. (2024). Presence of lactic acid bacteria in hydrogen production by dark fermentation: competition or synergy. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 40(380), 1–19. https://doi.org/10.1007/s11274-024-04167-9

García-Depraect, O., Muñoz, R., Rodríguez, E., Rene, E. R., & León-Becerril, E. (2021). Microbial ecology of a lactate-driven dark fermentation process producing hydrogen under carbohydrate-limiting conditions. International Journal of Hydrogen Energy, 46(20), 11284–11296. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.209

Moreno Cárdenas, E. L., Zapata-Zapata, A. D., & Kim, D. (2020). Modeling dark fermentation of coffee mucilage wastes for hydrogen production: Artificial neural network model vs. fuzzy logic model. Energies, 13(7), 1–13. https://doi.org/10.3390/en13071663

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Producción de biohidrógeno por fermentación utilizando como sustrato lodos de sistemas de recirculación de acuicultura – RAS y residuos orgánicos urbanos

Biohydrogen production by fermentation using sludge from aquaculture recirculation systems – RAS and urban organic waste as a substrate

Luz María Jiménez Ruiz[1], Edilson León Moreno Cárdenas[2], Marisol Beltrán Gutierrez[3] and Adriana Santos Martinez[3]

Palabras clave:
Biohidrógeno
Fermentación oscura
Lodos acuícolas
Residuos orgánicos

RESUMEN

Este estudio exploró la producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura utilizando lodos de un sistema de recirculación de acuicultura en codigestión con residuos orgánicos de frutas y verduras no aptos para consumo humano. Se desarrollaron tres ensayos en un biorreactor de 7 L, bajo condiciones controladas de temperatura, pH y agitación, cuantificando la producción de hidrógeno por cromatografía de gases y analizando la cinética con el modelo modificado de Gompertz. Los resultados mostraron una reducción significativa de la DQO, evidenciando la degradación de la materia orgánica, y confirmaron la validez del modelo ($R^2 > 0,96$) para describir la cinética del proceso. El tercer ensayo presentó el mejor desempeño, alcanzando 18,27 L de H_2 acumulados, una tasa de 3,05 L H_2 d^{-1}, rendimientos de 302,89 mL H_2 $gDQOrem^{-1}$; 214,89 mL H_2 $gSVadi^{-1}$; 1,21 mol H_2 mol hex^{-1}; 1,35 mol H_2 mol AL^{-1} y 0,9 mol AL mol hex^{-1}, con predominio de la ruta butírica. Estos hallazgos demuestran la viabilidad técnica de los lodos acuícolas en codigestión con residuos orgánicos de frutas y verduras como recursos energéticos alternativos, ampliando sus posibilidades de valorización más allá del uso tradicional como fertilizante, y contribuyen al desarrollo de estrategias de economía circular.

ABSTRACT

Keywords:
Biohydrogen
Dark fermentation
Aquaculture sludge
Organic waste

This study explored biohydrogen production through dark fermentation using sludge from an aquaculture recirculation system in co-digestion with organic fruit and vegetable residues unfit for human consumption. Three assays were conducted in a 7 L bioreactor under controlled temperature, pH, and agitation conditions, quantifying hydrogen production by gas chromatography and analyzing the kinetics with the modified Gompertz model. Results showed a significant reduction in COD, evidencing organic matter degradation, and confirmed the suitability of the model ($R^2 > 0.96$) to describe process dynamics. The third assay achieved the best performance, reaching 18,27 L of cumulative H_2, with a production rate of 3,05 L H_2 d^{-1}, yields of 302,89 mL H_2 $gCODrem^{-1}$; 214,89 mL H_2 $gSVadi^{-1}$; 1,21 mol H_2 mol hex^{-1}; 1,35 mol H_2 mol AL^{-1} and 0,9 mol AL mol hex^{-1}, with predominance of the butyrate pathway. These findings demonstrate the technical feasibility of aquaculture sludge in co-digestion with fruit and vegetable residues as alternative energy resources, expanding their valorization potential beyond traditional use as fertilizer, and contributing to the development of circular economy.

[1]Ingeniera Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. lujimenezr@unal.edu.co
[2]Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5693-4273
[3]Doctorado en Ciencias-Biología - Línea biología marina. Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe, San Andrés Islas, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5159-2366; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7800-3656

CC BY NC SA

El hidrógeno es un vector energético clave en la transición hacia un modelo sostenible basado en fuentes de energías alternativas, ya que posee un alto contenido energético por unidad de masa (Šabić et al., 2023). Cada kilogramo de hidrógeno contiene alrededor de 120 MJ de energía, logrando un potencial competitivo frente a los combustibles fósiles tradicionales (Wang et al., 2025). La producción de hidrógeno puede llevarse a cabo a través de diversos métodos, dentro de estos los procesos biológicos como la fermentación destacan especialmente por su capacidad de utilizar biomasa residual como materia prima (Šabić et al., 2023). Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2009), se define como biomasa residual a aquellos subproductos resultantes de procesos industriales o naturales que se llevan a cabo en la materia orgánica, entre los cuales se incluyen residuos agrícolas y forestales, lodos acuícolas y ganaderos, efluentes provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos urbanos, entre otros. El uso de residuos orgánicos para la producción de biohidrógeno ha sido ampliamente investigado (Cano & Moreno, 2019); sin embargo, en el caso de los lodos acuícolas, su valorización como residuo se ha enfocado en el uso como fertilizante, existiendo un vacío en su aprovechamiento energético. En este trabajo se exploró su uso en codigestión con residuos orgánicos para la generación de biohidrógeno, contribuyendo así a diversificar sus alternativas de manejo y fomentar la adopción de tecnologías de aprovechamiento de biomasa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron tres ensayos de fermentación en el Laboratorio de Moluscos y Microalgas de la Universidad del Magdalena, sede Taganga, utilizando como sustrato una mezcla de residuos orgánicos no aptos para consumo humano y lodos acuícolas, en una proporción volumétrica (% v/v) de 8:42:50 (lodos: residuos: agua) (Figura 1a). Los residuos orgánicos, compuestos por papaya, mango, naranja, lechuga y guayaba, fueron recolectados en el mercado público de Santa Marta a partir de los desechos generados por los comerciantes, mientras que los lodos acuícolas se obtuvieron de una unidad de sedimentación de un sistema de recirculación acuícola (RAS) destinado al cultivo de robalo (*Centropomus undecimalis*). Los ensayos se desarrollaron en un biorreactor de acero inoxidable con capacidad de 7 L, ocupando el sustrato 5,75 L, equivalente al 83% de su volumen total (Figura 1c). El biorreactor estuvo provisto de control de temperatura, agitación mecánica, sistema de medición de presión, puertos para toma de muestras y fue operado en modo *batch*. Las fermentaciones se llevaron a cabo a una temperatura entre 30–35 °C, un pH entre 5,0 y 6,5, un régimen de agitación de 100 rpm (5 min cada 110 min) y un tiempo de acidificación de 72 h, de acuerdo con la metodología descrita por Moreno (2016).

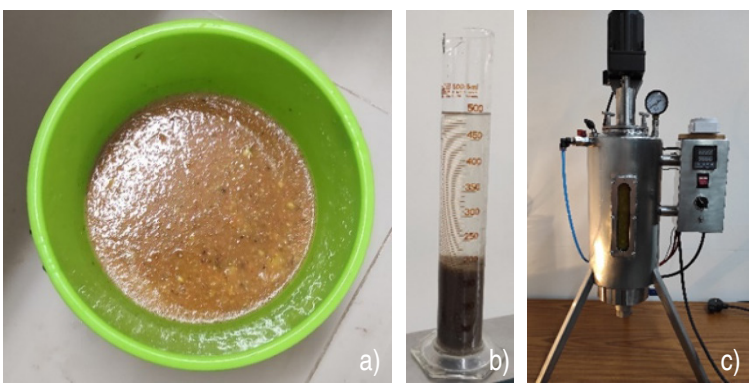


Figura 1. a) Sustrato utilizado. b) Lodo acuícola. c) Biorreactor.

Para la caracterización del sustrato se emplearon las metodologías 2510B, 5220D, 2504B, 2540E, 4500-NH_3 C y 4500-Norg B, establecidas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW), 24ª edición (2022), con el propósito de determinar la conductividad, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), nitrógeno amoniacal y nitrógeno total, respectivamente, en

muestras al inicio y al final de cada fermentación. Se cuantificó la concentración de azúcares y metabolitos secundarios mediante cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC), con un detector de índice de refracción (RID) y una columna Aminex HPX-87H (Bio-Rad, EE. UU.). El volumen de gas se cuantificó empleando un gasómetro y para su análisis se tomaron muestras en bolsas TEDLAR®, obteniendo su composición mediante cromatografía de gases (MicroGC Agilent 3000), en un equipo con un detector de conductividad térmica (TCD). La separación de los compuestos se efectuó utilizando una columna de tamiz molecular 5A (10 m × 0,32 mm; gas de arrastre: Argón 5,0) y una columna PLOT U (6 m × 0,32 mm × 0,03 mm; gas portador: Helio). El inyector operó a 60 °C y 30 psi. Los análisis de las muestras se llevaron a cabo en diferentes laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Las variables de respuesta consideradas en el estudio fueron: la tasa de producción de hidrógeno (HP, L H_2 d^{-1}), producción acumulada de hidrógeno (CHP, L H_2), obtenida mediante el modelo cinético modificado de Gompertz (Ecuación 1), empleando el software RStudio2022.7.2®, productividad expresada como LH_2 $Lsus^{-1}$, rendimiento (ϒ) en mol H_2 mol hex^{-1}, mol H_2 mol AL^{-1}; mol AL mol hex^{-1}; Ysv (mL H_2 $gSVadi^{-1}$) y Ydqo (mL H_2 $gDQOrem^{-1}$). En la ecuación 1, H corresponde a la producción acumulada de hidrógeno [L], λ al tiempo de fase lag [h], P a la producción potencial de hidrógeno [L], Rmax a la tasa máxima de producción [L h^{-1}], t al tiempo transcurrido [h] y e a la base de los logaritmos naturales (2,718281828).

$$H = P.\exp\left(-\exp\left(\frac{Rmax*e}{p} * (\lambda - t) + 1\right)\right) \quad [1]$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización del sustrato. La disminución de la DQO evidencia la degradación de la fracción biodegradable. En los ensayos 1 y 3 los ST se redujeron, lo que sugiere la conversión de azúcares, mientras que el aumento de SV refleja la acumulación de ácidos grasos volátiles; en el ensayo 2 se observó la tendencia opuesta. Las concentraciones de nitrógeno amoniacal y total se mantuvieron dentro de los niveles no tóxicos para sistemas acuícolas (Pedrotti, 2018), salvo en la muestra inicial del ensayo 1, posiblemente afectada por alteraciones de muestreo. Aunque se alcanzaron valores de DQO superiores a 80.000 mg O_2 L^{-1}, reportados como inhibitorios para la actividad microbiana (Moreno, 2016), no se evidenció inhibición, lo que sugiere adaptación microbiana favorecida a través de los lodos por un posible aporte de material orgánico y de otros compuestos.

Tabla 1. Caracterización del sustrato.

Ensayo	Muestra	Conductividad (mS cm^{-1})	DQO (mgO_2 L^{-1})	ST (mgST L^{-1})	SV (mgSV L^{-1})	N-Amoniacal (mg NH_3-N L^{-1})	N-Total (mg N L^{-1})
	Lodo	29,8	29.250	34.150	13.150	14,6	42,6
1	Inicial	9,8	84.500	67.350	16.200	30,8	89,6
1	Final	22,1	44.750	43.850	17.750	0,28	0,84
2	Inicial	7,72	142.000	83.600	31.600	0,56	1,68
2	Final	14,71	88.250	107.300	19.700	0,28	0,56
3	Inicial	5,63	91.500	72.200	14.800	0,56	0,84
3	Final	11,85	81.000	64.900	19.100	0,28	0,56

En la Figura 2 se presentan las curvas de acumulación de hidrógeno ajustadas al modelo modificado de Gompertz con coeficientes de determinación, R^2 de 0,969, 0,986 y 0,995 para los ensayos 1, 2 y 3, respectivamente. El ensayo 1 mostró el menor desempeño (P = 4,99 L H_2; Rmax = 0,0997 L H_2 h^{-1}; λ = 13,8 h), seguido del ensayo 2 con un leve incremento en el potencial y la tasa (P = 5,76 L H_2; Rmax = 0,1232 L H_2 h^{-1}; λ = 23,1 h). El ensayo 3 destacó con un potencial máximo de 18,29 L H_2 y la mayor tasa de producción (0,392 L H_2 h^{-1}), y la fase de latencia más prolongada (28 h).

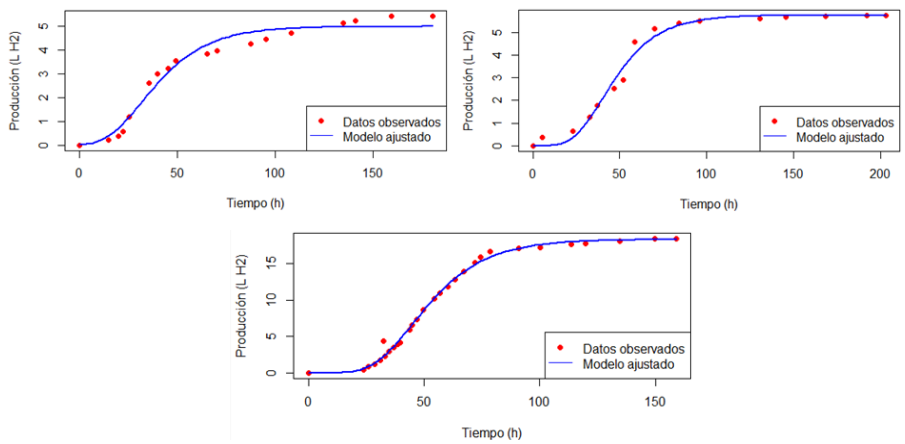


Figura 2. Cinética de acumulación de hidrógeno.

Como se observa en la Figura 3, el consumo de azúcares se asoció con la acumulación de ácido láctico, confirmando su función como metabolito intermedio en la ruta fermentativa hacia la producción de hidrógeno (Moreno, 2016). Posteriormente, la disminución de este compuesto evidenció su transformación en ácidos grasos volátiles (acético, butírico y propiónico). En los ensayos 1 y 3 predominó la ruta butírica, la cual tiene un rendimiento teórico de 1 mol H_2 por 1 mol AL. En contraste, en el ensayo 2 se favoreció la ruta acética, caracterizada por un mayor aporte de H_2 (2 moles H_2 por mol AL), junto con la formación de ácido propiónico, ruta indeseable por consumir hidrógeno (Moreno-Cárdenas et al., 2019).

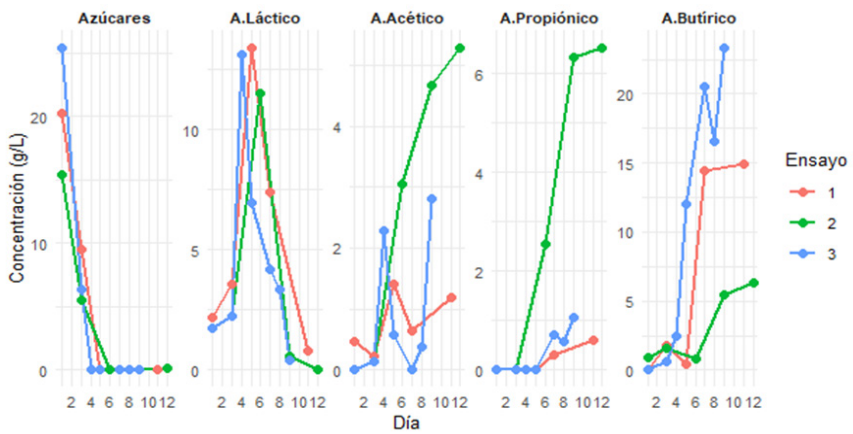


Figura 3. Cinética de azúcares y metabolitos secundarios entre ensayos.

En la Tabla 2 se presentan las variables de respuesta, la cinética fermentativa con los indicadores de productividad y rendimiento. Se observa un desempeño superior en el ensayo 3, el cual alcanzó la mayor productividad diaria y acumulada, así como los valores más altos en la conversión de hexosas y de ácido láctico, evidenciando un mejor aprovechamiento del sustrato para la producción de hidrógeno. No obstante, presentó el menor rendimiento en la conversión de hexosas a ácido láctico, lo que sugiere la presencia de rutas metabólicas alternas en la fermentación láctica. En estudios previos con residuos de frutas y verduras en biorreactores de 20 L, se reportaron valores de 1,9 L H_2 $Lsus^{-1}$, 4800 mLH_2 $gSVadi^{-1}$ y 608,6 mLH_2 $gDQOrem^{-1}$ (Cano & Moreno, 2019). Liu et al. (2015) alcanzaron 1,47 mol H_2 $molhex^{-1}$ utilizando lodo intermareal como sustrato. En un estudio de codigestión de frutas y verduras con mucílago de café, se obtuvieron 25,9 L de H_2, con una productividad de 1,295 L H_2 $Lsus^{-1}$ y 0,248 mol H_2 $molhex^{-1}$(Moreno-Cárdenas et al., 2019).

Tabla 2. Variables de respuesta.

Ensayo	HP ($L\ H_2\ d^{-1}$)	CHP ($L\ H_2$)	($LH_2\ Lsus^{-1}$)	Yhex ($mol\ H_2\ mol\ hex^{-1}$)	Yal ($mol\ H_2\ mol\ AL^{-1}$)	Y ($mol\ AL\ mol\ hex^{-1}$)	AA/AB	Ysv ($mL\ H_2\ gSVadi^{-1}$)	Ydqo ($mL\ H_2\ gDQOrem^{-1}$)
1	0,77	5,42	0,97	0,40	0,36	1,11	0,07	59,87	24,40
2	0,64	5,74	1,00	0,39	0,31	1,26	1,09	31,64	18,60
3	3,05	18,27	3,18	1,21	1,35	0,90	0,12	214,89	302,89

CONCLUSIÓN

Este estudio confirma la viabilidad técnica de la fermentación oscura como estrategia de valorización energética de lodos acuícolas en codigestión con residuos orgánicos, logrando una efectiva degradación de la fracción biodegradable y la producción de biohidrógeno bajo condiciones controladas. El modelo modificado de Gompertz describió adecuadamente la cinética del proceso, destacándose el ensayo 3 por alcanzar los mayores indicadores (18,27 L H_2 acumulados, 3,05 L H_2 d^{-1}, 302,89 mL H_2 $gDQOrem^{-1}$; 214,89 mL H_2 $gSVadi^{-1}$; 1,21 mol H_2 mol hex^{-1}; 1,35 mol H_2 mol AL^{-1} y 0,9 mol AL mol hex^{-1}) con predominio de la ruta butírica.

AGRADECIMIENTOS

A la Red de Maricultura por la financiación a través del proyecto “Maricultura sustentable: investigación para el desarrollo de sistemas productivos marinos con un enfoque ecosistémico” (código Hermes 59709), de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe.

REFERENCIAS

Cano Quintero, D. Y., & Moreno-Cárdenas, E. L. (2019). Incidence of operative parameters in the production of biohydrogen generated from urban organic waste. Revista Facultad Nacional de Agronomia Medellin, 72(2), p 8841–8853. https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n2.73138

Liu, H., Chen, G.,Wang, G., (2015). Characteristics for production of hydrogen and bioflocculant by Bacillus sp. XF-56 from marine intertidal sludge. International Journal of Hydrogen Energy, 40(3), p 1414-1419, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.110

Moreno Cárdenas, E.L. (2016). Estudio del proceso de generación de biohidrógeno mediante fermentación anaerobia de residuos orgánicos agrícolas. (Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín) Repositorio Institucional UNAL.

Moreno-Cárdenas, E. L., Zapata-Zapata, A. D., & Kim, D. (2019). Hydrogen Production from Coffee Mucilage in Dark Fermentation with Organic Wastes. Energies, 12(1), 71. https://doi.org/10.3390/en12010071

Šabić Runjavec, M., Vuković Domanovac, M., & Jukić, A. (2023). Application of Industrial Wastewater and Sewage Sludge for Biohydrogen Production. Energies, 16(5). https://doi.org/10.3390/en16052383

Pedrotti, F. (2018). Toxicidade aguda de amonia e nitrito em juvenus de robalo-flecha Centropomus undecimalis (Perciformes: Centropomidae). (Tesis de doctorado, Universidad Federal de Santa Catarina)

UPME, IDEAM, COLCIENCIAS and UIS. (2009). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. First edition. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 180 p.

Wang, Z., Li, B., Pipitone, G., Liu, Q., Yang, T., Wang, J., Li, R., (2025) Hydrogen production from biomass: A review combined with bibliometric analysis. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 117, p 271-291, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.158

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación ambiental de un sistema de generación de electricidad por medio de biomasa residual en Sucre-Colombia

Environmental evaluation of an electricity generation system using residual biomass in Sucre-Colombia

Juan Avilez[1]*, Candelaria Benavides[1], Mariam Martínez[1], Quelbis Quintero[1,2], Electo Silva[3] and María Luiza Grillo Reno[4].

Palabras clave:
ACV
Bioenergía
Ciclo orgánico Rankine
Residuos agrícolas
Sostenibilidad

RESUMEN

La producción agrícola en el departamento de Sucre genera residuos inutilizados que pueden tener un impacto ambiental negativo si no se gestionan adecuadamente. El objetivo de este estudio es evaluar el impacto ambiental del procesamiento de residuos agrícolas para la generación de electricidad, calor y frio a partir de la implementación de un ciclo orgánico Rankine (ORC-CCHP), empleando la metodología de análisis de ciclo de vida (LCA) y simulación Software Simapro. Los resultados revelaron que, el sector norte del departamento se establece como la opción más sostenible por su generación de beneficios ambientales. Con la posibilidad de abastecer 428 y 32 casa para los escenarios Sur y Norte, respectivamente.

Keywords:
LCA
Bioenergy
Organic Rankine cycle
Agricultural waste
Sustainability

ABSTRACT

Agricultural production in Sucre generates unused waste that can negatively affect the environment if not properly managed. This study aims to evaluate the environmental impact of using this agricultural waste to generate electricity, heat, and cold through an Organic Rankine Cycle (ORC-CCHP). The Life Cycle Assessment (LCA) methodology and SimaPro software were used for the analysis. The findings indicate that the northern sector of the department represents the most sustainable option, offering significant environmental advantages. This approach has the potential to supply 428 homes in the Southern scenario and 32 homes in the Northern scenario, respectively.

[1]Facultad de ingeniería, Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia. Juandiavilez25@gmail.com
[2]Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8241-5677
[3]Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8969-3541;
[4]Investigadora Núcleo de Excelência em Energia Térmica e Geração Distribuída, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil.
*Corresponding author: juandiavilez25@gmail.com

CC BY NC SA

Los combustibles fósiles son los principales emisores de gases de efecto invernadero, representando cerca del 40 % de las emisiones de CO_2 del sector energético (Calbick & Gunton, 2014). Para mitigar este impacto, es urgente invertir en fuentes renovables que permitan descarbonizar los sistemas energéticos (Ji et al., 2022). La transición requiere políticas públicas articuladas, innovación tecnológica y estímulos económicos para los agricultores. En este contexto, el departamento de Sucre tiene la oportunidad de transformar residuos agrícolas en vectores de desarrollo sostenible, empleo y bienestar social. Este estudio propone un análisis de sostenibilidad ambiental de un sistema ORC-CCHP alimentado con biomasa residual de palma de aceite, yuca y arroz, utilizando el software SimaPro y el enfoque de análisis de ciclo de vida. Los resultados servirán como base técnica para orientar decisiones estratégicas sobre el aprovechamiento de residuos agrícolas, promoviendo una economía circular y resiliente en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se centró en zonas con alta concentración de biomasa residual de palma, arroz y yuca en Sucre en un horizonte de tiempo 2019-2023. Adoptando lo propuesto por Cheng et al. (2020), es óptimo transportar los residuos en un radio de 50 km y así reducir el excedente energético y reducir los costos logísticos, (ver Figura 1).

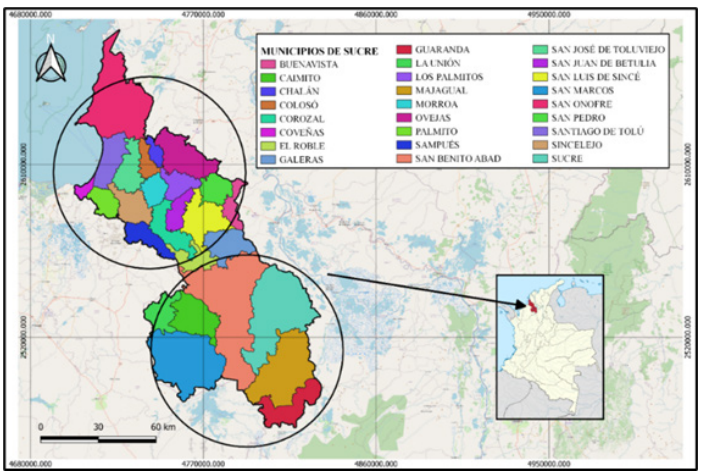


Figura 1. Escenarios de estudio para el análisis de sostenibilidad.

Se empleó un enfoque cuantitativo y sistémico siguiendo las directrices estandarizadas por las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044. Para el desempeño ambiental de los escenarios fue utilizado el Software SimaPro v.9 con la base de datos Ecoinvent-3 allocation, default-unit (Ecoinvent, 2013). Se escogió el método ReCiPe MidPoint (H), siendo analizadas las categorías de impacto como: Cambio climático ($kgCO_2eq/MWh_e$), Material particulado ($kgPM10eq/MWh_e$), Acidificación terrestre ($kgSO2eq/MWh_e$) Toxicidad humana ($kg1,4DBeq/MWh_e$) Ecotoxicidad terrestre ($kg1,4DBeq/MWh_e$) y Ecotoxicidad de agua dulce ($kg1,4DBeq/MWh_e$).

Este LCA evaluó el proceso Puerta-Puerta del transporte, tratamiento y uso de biomasa residual en un sistema ORC, con 1 MWhe como unidad funcional. Se comparó con la matriz energética de Sucre, considerando salidas evitadas como frío y calor por sustitución de electricidad y gas natural. El inventario incluyó vehículos de transporte y tractores diésel para el enfardado de biomasa. El CO_2 emitido se considera carbono neutro, al ser reabsorbido por la vegetación circundante, cerrando el ciclo biogénico.

El análisis consideró las emisiones del ciclo ORC con la implementación de un regenerador para mayor eficiencia eléctrica en el proceso, y el aprovechamiento de calor residual por medio de un secador y un sistema de absorción simple para la conservación de productos agrícolas por medio de secado y refrigeración, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según el LCA (ver Tabla 1 y Figura 2), el escenario Norte se consolida como el más sostenible, con una reducción del -21.0% en cambio climático. Este beneficio se atribuye tanto a la sustitución de la red eléctrica convencional como a la gestión eficiente de residuos. Dicha gestión evita la emisión de metano (CH_4), un GEI más potente que el CO_2 (CCAC, 2025).

Aunque el escenario Sur reduce impactos respecto a la electricidad convencional, genera cargas ambientales significativas en todas las categorías. Esto se debe al uso de diésel en el pretratamiento del tamo, especialmente durante el enfardado.

Las emisiones adicionales reducen los beneficios ambientales del sistema ORC con biomasa residual. Sin embargo, estudios como el de Çetinkaya et al. (2024) confirman que este ciclo presenta el menor impacto entre fuentes renovables. La biomasa procesada mediante ORC destaca por su eficiencia ambiental en comparación con otras tecnologías. Desde el pretratamiento hasta la generación eléctrica, se consolida como una alternativa sostenible y prometedora.

Tabla 1. Resultado de los escenarios con respecto a la electricidad convencional.

Categorías	Unidades	Escenario Norte	Escenario Sur	Electricidad convencional
Cambio climático (CC)	$kgCO_{2eq}$	-40,8	23,1	194
Material particulado (MP)	$kgPM_{2.5eq}$	-0,0174	0,0625	0,235
Acidificación terrestre (AT)	$kgSO_{2eq}$	0,0356	0,208	0,732
Toxicidad humana (TH)	$kg1,4DB_e$	-6,1785	1,0696	15,517
Ecotoxicidad terrestre (ET)	$kg1,4DB_e$	25,4	38,1	45,9
Ecotoxicidad de agua dulce (EA)	$kg1,4DB_e$	-0,0568	0,0109	0,0604

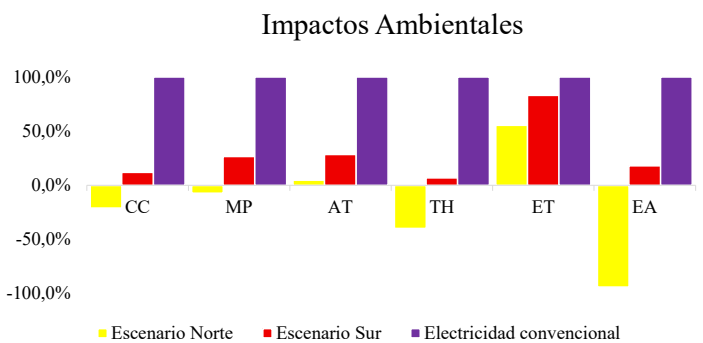


Figura 2. Impactos ambientales caracterizados en los diferentes escenarios.

El departamento de Sucre posee un notable potencial energético (944.248,6 MW $año^{-1}$), clave para comunidades rurales con acceso limitado. Aunque persisten desafíos en la recolección de datos, se evidencia la necesidad de fortalecer bases locales de información. Los resultados ambientales favorables posicionan este proyecto como modelo de electrificación rural sostenible. Para ampliar su alcance, se recomienda integrar sistemas híbridos y evaluar su viabilidad económica. Esto fortalecería las políticas locales y fomentaría una economía circular en la región.

CONCLUSIÓN

La implementación de sistemas ORC con biomasa residual en Sucre ofrece una alternativa ambientalmente superior a la matriz eléctrica convencional. El Escenario Norte se destaca por su sostenibilidad, con beneficios netos en cambio climático, toxicidad humana y ecotoxicidad acuática. Esto se atribuye a su tecnología de combustión

eficiente y adecuada gestión de residuos. En contraste, el Escenario Sur presenta impactos negativos por el uso de diésel en el pretratamiento del tamo. Este consumo adicional compromete la eficiencia ambiental del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Federal de Itajubá y al grupo NEST por brindar el espacio académico y los recursos necesarios. También se reconoce la orientación de los docentes Electo Silva, Quelbis Quintero y Diego Yepes, por su valioso acompañamiento.

REFERENCIAS

Calbick, K. S., & Gunton, T. (2014). Differences among OECD countries' GHG emissions: Causes and policy implications. Energy Policy, 67, 895–902. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.030

CCAC. (2025). Metano. https://www.ccacoalition.org/es/short-lived-climate-pollutants/methane

Çetinkaya, A. Y., Yılmaz, F., & Bilgili, L. (2024). Life cycle assessment and thermodynamic performance of biomass-based combined cogeneration. Engineering Research Express, 6(4). https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad9982

Cheng, W., Zhang, Y., & Wang, P. (2020). Effect of spatial distribution and number of raw material collection locations on the transportation costs of biomass thermal power plants. Sustainable Cities and Society, 55. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102040

Ecoinvent. (2013). Ecoinvent Versión 3.0. https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.0

Ji, J., Zhang, J., Jia, X., Ji, R., Sheng, Z., Qin, J., Zhao, H., Tang, J., Su, J., & Wang, Y. (2022). A Working Fluid Assessment for a Biomass Organic Rankine Cycle under Different Conditions. Energies, 15(19). https://doi.org/10.3390/en15197076

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Evaluación del potencial de conversión de residuos agrícolas en energía en Sucre, Colombia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Assesment of the conversion potential of agricultural waste to energy in Sucre-Colombia

Mariam Martínez[1]*, Juan Avilez[1], Candelaria Benavides[1], Quelbis Quintero[2], Electo Silva[3] and Diego Yepes[3]

Palabras clave:
Biomasa
Conservación de alimentos
ORC
Residuos agrícolas

RESUMEN

Se evaluó el potencial energético de residuos agrícolas en dos zonas de Sucre (Norte y Sur), dentro de un radio de 50 km, mediante simulación ORC-CCHP en Aspen Plus con R1233zd(E) y Dowtherm Q. Las eficiencias eléctricas fueron 7,13 % (Norte) y 8,11 % (Sur), y de trigeneración 30,82 % y 31,02 %. En el Norte, el calor se destinó al secado de yuca, pero hubo déficit de 1.111,77 kW de frío para leche. En el Sur, se usó solo el 13,4 % del calor y el 31,37 % del frío, evidenciando capacidad excedente.

Keywords:
Biomass
Food preservation
ORC
Agricultural waste

ABSTRACT

The energy potential of agricultural residues was evaluated in two zones of Sucre (North and South), within a 50 km radius, using ORC-CCHP simulation in Aspen Plus with R1233zd(E) and Dowtherm Q. Electrical efficiencies reached 7.13% (North) and 8.11% (South), while trigeneration efficiencies were 30.82% and 31.02%, respectively. In the North, thermal energy was fully allocated to cassava drying, yet there was a cooling deficit of 1,111.77 kW for milk preservation. In contrast, the South utilized only 13.4% of its thermal capacity and 31.37% of its cooling potential, indicating surplus capacity.

[1]Facultad de ingeniería, Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia. mariam.martinez@unisucrevirtual.edu.co
[2]Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8241-5677
[3]Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8969-3541; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1282-9935
*Corresponding author: mariam.martinez@unisucrevirtual.edu.co

CC BY NC SA

A nivel mundial, la agricultura genera 5.500 millones de toneladas de residuos al año, y en Colombia se producen cerca de 7 millones de toneladas de biomasa agroindustrial (Morales et al., 2023). Esta situación es crítica en Sucre, donde entre 2019 y 2023 se cultivaron yuca (22.456,53 t), arroz (166.221,34 t) y palma de aceite (6.067,58 t), generando residuos agrícolas subutilizados (UPRA, 2023). La biomasa residual representa una alternativa energética para sistemas de trigeneración (calor, frío y electricidad), aunque su viabilidad técnica requiere evaluación. Este estudio analiza dicho potencial en Sucre mediante la simulación de un sistema ORC-CCHP en Aspen Plus V11. Se busca transformar un pasivo ambiental en una solución energética sostenible, promoviendo economía circular, desarrollo rural, políticas públicas e innovación agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en Buenavista y Majagual (Sucre, Colombia), dentro de un radio de 50 km, para optimizar el excedente energético y reducir costos logísticos (Cheng et al., 2020). Se emplearon residuos de yuca, arroz y palma de aceite, según datos de producción 2019–2023 y reportes de UPRA (2023). Los análisis próximos, elemental y PCI se tomaron de estudios previos Mejía & Rondón (2013); Foong et al., (2020); Kaniapan et al., (2021); (Valverde et al., 2007); (Bhatnagar et al., 2022). Se diseñó un experimento para evaluar un sistema de trigeneración (calor, frío, electricidad). Las variables fueron $P_{e,net,ORC}$, η_e y η_{CCHP}. El sistema ORC-CCHP se simuló en Aspen Plus V11, usando el método Peng-Robinson. El calor del condensador calentó aire a 50 °C y los gases de combustión alimentaron un sistema de absorción Li-Br. Este último se modeló con "Elec Wizard" y ELECNRTL, calculando las variables mediante ecuaciones termodinámicas:

$$P_{e,net,ORC} = P_{exp} - P_{pump} \quad (1)$$

$$P_{e,net,plant} = \left(1 - C_{sf}\right) \times P_{e,net,ORC} \quad (2)$$

$$n_e = \frac{P_{e,net,plant}}{Q_{comb}} \quad (3)$$

$$n_{CCHP} = \frac{P_{e,net,plant} + Q_{cond}}{Q_{comb}} \quad (4)$$

C_{sf} representa el autoconsumo eléctrico del ORC, equivalente al 12 % de la energía generada (Guercio & Bini, 2017). La potencia neta [$P_{e,net,ORC}$] se calcula como la diferencia entre la potencia del expansor y la bomba, mientras que Q_{comb} corresponde al calor de combustión. El rendimiento del sistema de absorción Li-Br se evaluó mediante el COP, obtenido de la ecuación 5.

$$COP = \frac{Q_{evap}}{P_{pump} + Q_{exhaust}} \quad (5)$$

Donde Q_{evap} es el calor del evaporador y $Q_{exhaust}$ es el calor de los gases de combustión.

Se evaluó el potencial de secado (arroz en el Sur, yuca en el Norte) mediante un secador de lecho inclinado (Sarker et al., 2014), y la refrigeración con una cámara de leche (Avila, 2012). El análisis consideró la capacidad térmica del sistema ORC operando 8.000 h/año. La producción láctea se estimó con datos UPRA (2019–2023), asumiendo 5 L/vaca/día en hembras mayores de tres años y una densidad de 1,03 kg/L.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La disponibilidad de biomasa se estimó aplicando un factor del 50 % para uso energético (Pérez-Rodríguez et al., 2022). El tamo predominó en la Mojana y San Jorge, mientras que el tallo fue más abundante en la Sabana, Montes de María y Morrosquillo. El raquis y la cascarilla presentaron baja producción en casi todo el departamento (ver Figura 1).

El potencial energético anual de los residuos seleccionados fue de 944.248,69 MW, con el tamo como principal fuente (737.911,57 MW), seguido por tallo, cascarilla y raquis. Aunque el raquis posee el mayor PCI, su baja disponibilidad lo limita como fuente energética. La planta simulada generó 2 MWh en el Sur y 200 kWh en el Norte, con eficiencias eléctricas de 8,11 % y 7,13 %, respectivamente. Las eficiencias de trigeneración fueron de 31,02 % (Sur) y 30,08 % (Norte), bajo condiciones térmicas similares (161 °C, 32 bar). El Sur presentó mayores caudales de fluido (83,07 kg/s) y aceite térmico (141,78 kg/s), frente al Norte (6,92 kg/s y 11,67 kg/s). La entrada de calor por biomasa fue de 93,12 MWh en el Sur y 7,66 MWh en el Norte, con potencias netas de 1,64 MWh y 0,12 MWh. También se evidenció mayor capacidad en aire de secado (726,24 kg/s) y refrigeración (11,41 MWh) en el Sur.

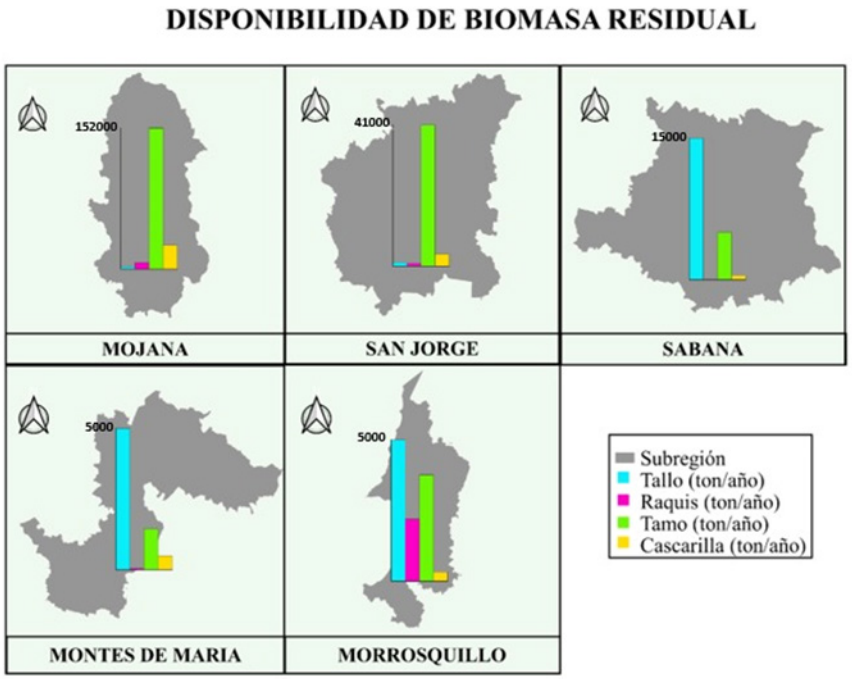


Figura 1. Disponibilidad anual de biomasa residual en Sucre; Fuente: Autores (2025)

La conversión energética fue superior en el Sur, gracias al tamo y al uso de aceite térmico, superando el 1,88 % reportado por Zhu et al. (2024). El COP del sistema Li-Br fue de 0,73, validando la simulación en Aspen Plus. Se observó una asimetría energética: el Norte tuvo déficit en frío y solo procesó el 10 % de la yuca. En cambio, el Sur operó con superávit, utilizando menos del 32 % de su capacidad frigorífica y 13,4 % del calor disponible, permitiendo expansión agroindustrial o integración a la red.

CONCLUSIÓN

El sistema ORC-CCHP se confirma como una solución viable para valorizar residuos agrícolas en Sucre, destacando el tamo de arroz y el tallo de yuca como recursos clave. El Norte presenta déficit energético, mientras que el Sur exhibe excedentes que favorecen el desarrollo agroindustrial. Estos hallazgos impulsan la autosuficiencia energética y la sostenibilidad rural. La implementación requiere validaciones experimentales y análisis económico riguroso. Así, esta tecnología podría integrarse efectivamente en comunidades agrícolas del departamento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Federal de Itajubá y al grupo NEST por brindar el espacio académico y los recursos necesarios. También se reconoce la orientación de los docentes Electo Silva, Quelbis Quintero y Diego Yepes, por su valioso acompañamiento.

REFERENCIAS

Avila, D. (2012). DISEÑO DE UNA CAMARA DE REFRIGERACION PARA LA CONSERVACION DE LECHE. 1–43.

Bhatnagar, A., Singhal, A., Tolvanen, H., Valtonen, K., Joronen, T., & Konttinen, J. (2022). Effect of pretreatment and biomass blending on bio-oil and biochar quality from two-step slow pyrolysis of rice straw. Waste Management, 138(September 2021), 298–307. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.013

Cheng, W., Zhang, Y., & Wang, P. (2020). Effect of spatial distribution and number of raw material collection locations on the transportation costs of biomass thermal power plants. Sustainable Cities and Society, 55. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102040

Foong, S. Y., Abdul Latiff, N. S., Liew, R. K., Yek, P. N. Y., & Lam, S. S. (2020). Production of biochar for potential catalytic and energy applications via microwave vacuum pyrolysis conversion of cassava stem. Materials Science for Energy Technologies, 3, 11. https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.08.002

Guercio, A., & Bini, R. (2017). Biomass-fired Organic Rankine

Cycle combined heat and power systems. In Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems (pp. 527–567). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100510-1.00015-6

Kaniapan, S., Hassan, S., Ya, H., Nesan, K. P., & Azeem, M. (2021). The utilisation of palm oil and oil palm residues and the related challenges as a sustainable alternative in biofuel, bioenergy, and transportation sector: A review. In Sustainability (Switzerland) (Vol. 13, Issue 6, p. 6). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/su13063110

Mejía, J., & Rondón, J. V. (2013). Caracterización fisicoquímica de biomasa agrícola. representativa en Santander: "papa, yuca, mora, papaya, cebolla junca". Trabajo de grado, Ing. Química Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Morales, M. A., Maranon, A., Hernandez, C., Michaud, V., & Porras, A. (2023). Colombian Sustainability Perspective on Fused Deposition Modeling Technology: Opportunity to Develop Recycled and Biobased 3D Printing Filaments. In Polymers (Vol. 15, Issue 3). https://doi.org/10.3390/polym15030528

Pérez-Rodríguez, C. P., Ríos, L. A., Duarte González, C. S., Montaña, A., & García-Marroquín, C. (2022). Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario. Sustainability (Switzerland), 14(19). https://doi.org/10.3390/su141912537

Sarker, M. S. H., Ibrahim, M. N., Ab. Aziz, N., & Mohd. Salleh, P. (2014). Energy and rice quality aspects during drying of freshly harvested paddy with industrial inclined bed dryer. Energy Conversion and Management, 77, 389–395. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.038

UPRA. (2023). Evaluaciones Agropecuarias Municipales - EVA. https://upra.gov.co/es-co/Paginas/eva.aspx

Valverde, A. G., SARRIA Ingeniero Mecánico, B. L., & MONTEAGUDO J. P. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. Scientia et Technica Año XIII, 37, 257.

Zhu, Y., Zhang, C., Yan, M., Liu, Z., Li, W., Li, H., & Wang, Y. (2024). Biomass-fired combined heat, cool and power system incorporating organic Rankine cycle and single-effect lithium bromide absorption refrigeration integrated with CO2 capture: Thermo-economic analysis. Energy, 304(June), 132096. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132096.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Producción de pellets a partir de cáscara y bagazo obtenidos del aprovechamiento del coco en el departamento del Chocó

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Production of pellets from coconut shell and bagasse derived from coconut processing in the department of Chocó

David Alejandro Gil Jaramillo[1]* and Edilson León Moreno Cárdena[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Bagazo de coco
Cáscara de coco
Pellet
Poder calorífico

Se analizó la producción de pellets combustibles a partir de residuos de coco (cáscara y bagazo) del departamento del Chocó (Colombia), región con alta disponibilidad de biomasa. Se empleó un diseño experimental de composición central compuesto que evaluó la proporción de mezcla cáscara-bagazo (0:100 a 100:0) y el contenido de humedad (6–15%), considerando como variables respuesta el poder calorífico neto (PCN), la durabilidad (DU) y la densidad. Los residuos fueron molidos ($\leq$4 mm), acondicionados en humedad y pelletizados en un equipo de 2 HP. Los resultados evidenciaron un PCN máximo de 28.659 kJ kg^{-1} en bagazo puro, superando a pellets comerciales de madera (18.000–19.000 kJ kg^{-1}). La mayor durabilidad alcanzó 99,25% con mezcla 20:80 y humedad $\leq$10%, mientras que la densidad máxima (1,19 g cm^{-3}) se obtuvo con mezcla 50:50 y 6% de humedad. La optimización simultanea de las variables de respuesta fue 10,7% cáscara, 89,3% bagazo y 10,3% humedad, logrando PCN de 27.861 kJ kg^{-1}, DU de 99,9% y densidad de 1,07 g cm^{-3}. Se concluye que los pellets son técnicamente viables como biocombustible sólido para el Chocó, aunque se recomienda validar su desempeño en calderas y ajustar parámetros de producción para una futura implementación.

ABSTRACT

Keywords:
Coconut bagasse
Coconut shell
Pellet
Heating value

This study evaluated the production of fuel pellets from coconut residues (shell and bagasse) collected in the Department of Chocó (Colombia), a region characterized by high biomass availability. A central composite experimental design was applied to assess two factors: shell-to-bagasse ratio (0:100 to 100:0) and moisture content (6–15%), using net heating value (PCN) and durability (DU) as response variables. The residues were ground ($\leq$4 mm), moisture-adjusted, and pelletized using a 2 HP pelletizer with a 6 mm die. Results showed a maximum PCN of 28,659 kJ kg^{-1} for pure bagasse pellets, exceeding typical values of commercial wood pellets (18,000–19,000 kJ kg^{-1}). The highest durability (99.25%) was achieved at a 20:80 shell-to-bagasse ratio with moisture $\leq$10%, whereas maximum density (1.19 g cm^{-3}) was obtained with a 50:50 mixture at 6% moisture. The simultaneous optimization of the response variables (10.7% shell, 89.3% bagasse, 10.3% moisture) yielded an PCN of 27,861 kJ kg^{-1}, DU of 99.9%, and density of 1.07 g cm^{-3}. Findings demonstrate the technical feasibility of coconut residues as a solid biofuel for the Chocó region, although combustion tests in boilers and

[1]Maestría en ingeniería Agroindustrial. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
[2]Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5693-4273.
*Corresponding author: dagilj@unal.edu.co

CC BY NC SA

El incremento en los precios de los combustibles fósiles y sus impactos ambientales, sociales y de salud han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles (Moreno & García, 2020). Entre ellas, la biomasa residual sólida se destaca como fuente renovable para producir biocombustibles densificados como los pellets, que presentan ventajas en almacenamiento, transporte y eficiencia de combustión (Giacomo & Taglieri, 2009).

El coco (*Cocos nucifera* L.) genera residuos como cáscara y bagazo con alto potencial energético; la cáscara posee un poder calorífico de 23 MJ kg^{-1} y constituye un 15% del fruto (Jiménez & Galarza, 2019). En el Chocó, la producción de coco alcanzó 13.076 toneladas en 2022 (Agronet, 2025) lo que representa grandes volúmenes de subproductos que, al no ser aprovechados, generan contaminación en playas, bosques y fuentes hídricas. Esto plantea la pregunta: ¿cómo recuperar y reutilizar los subproductos del coco para transformarlos en una fuente de energía en el Chocó?

Estudios previos muestran que la pelletización de residuos agrícolas y forestales mejora las propiedades energéticas y mecánicas de la biomasa (Cui et al., 2021;). Sin embargo, existe un vacío en el estudio combinado de cáscara y bagazo de coco. La hipótesis plantea que es posible elaborar pellets con estas mezclas con características de combustible. El objetivo fue evaluar la producción de pellets combustibles a partir de bagazo y cáscara de coco del departamento del Chocó.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en los Laboratorios de Mecanización Agrícola y Procesos Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, con biomasa residual de coco (cáscara y bagazo) suministrada por productores del municipio de Pizarro, Chocó. El estudio se estructuró en cuatro fases: caracterización, reducción de tamaño, ajuste de humedad y pelletización.

En la fase de caracterización, se determinó el contenido de humedad (ISO 18134-1), extractivos liposolubles (TAPPI 204 cm-97), lignina ácido-insoluble (TAPPI 222), lignina ácido-soluble (NREL/TP-510-42618), celulosa y hemicelulosa (ASTM, 2020). Las extracciones se realizaron con acetona y secado en horno a 85 °C. El contenido de celulosa y hemicelulosa se midió mediante HPLC y la lignina soluble por espectrofotometría. La fase de reducción de tamaño consistió en moler la cáscara con un molino de martillos y tamizarla con malla de 4 mm, garantizando partículas $\leq$4 mm. Para esto, se empleó un molino de martillos de 3HP con una criba de 5 mm. El bagazo desde su suministro contó con granulometría adecuada.

En la fase de ajuste de humedad, la biomasa se secó en horno de convección a 80 °C hasta alcanzar entre 6–15%, rango establecido por el diseño experimental. Cuando fue necesario aumentar la humedad, se adicionó agua con atomizador de forma controlada. En esta fase se utilizó una balanza Shimadzu UX4200H (0,01 g de precisión) y se empleó un horno de convección forzada Thermo Heratherm (50–250 °C, volumen 65 L). En la fase de pelletización, las mezclas de cáscara y bagazo se procesaron en una pelletizadora de 2 HP con capacidad de 60 kg h^{-1}, dado de 6 mm de diámetro y 18 mm de longitud (L/D=3). La presión de los rodillos se reguló con un torquímetro calibrado en 5,4 Nm. Antes de cada ensayo se realizó limpieza y calentamiento previo de la máquina para estandarizar las condiciones. Posteriormente, se midieron las propiedades de los pellets: análisis proximal (cenizas, volátiles y carbón fijo) según normas ASTM; densidad unitaria, calculada a partir de la masa (balanza Shimadzu UX4200H) y dimensiones (calibrador ±0,01 mm); poder calorífico superior (PCS) mediante bomba calorimétrica (ASTM D5865) y el poder calorífico neto (PCN) mediante una ecuación a base húmeda; y durabilidad (ISO 17831-1), evaluada en un equipo experimental diseñado con un cilindro rotatorio conectado a un motor paso a paso controlado por Arduino. Finalmente, se aplicó un diseño experimental de composición central con dos factores (mezcla cáscara-bagazo y humedad) y tres variables de respuesta (PCN, DU y densidad). Los resultados fueron analizados con ANOVA y modelos polinomiales de segundo orden, optimizados por el método de gradiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis químico inicial evidenció diferencias marcadas entre la cáscara y el bagazo de coco. La cáscara presentó

mayores contenidos de lignina (36,5%) y celulosa (36,7%), mientras que el bagazo se caracterizó por su elevada hemicelulosa (47,3%) y extractivos liposolubles (64,6%). Estos resultados son consistentes con lo reportado por Da Costa et al. (2023) y Liu et al. (2024), quienes señalan que la lignina y los extractivos grasos cumplen un papel aglutinante clave en la compactación de biomasas. Esta diferencia explica la baja capacidad de la cáscara pura para formar pellets estables, mientras que el bagazo, gracias a sus aceites, mejoró la cohesión del material.

En el análisis proximal, el contenido de cenizas se mantuvo entre 0,6 y 1,8%, dentro de los límites establecidos por la norma ISO 17225-6 (ISO, 2021) y por debajo de valores registrados para otras biomasas como cascarilla de arroz o café (Valdés et al., 2018). Esto favorece un mejor desempeño térmico y una menor formación de escorias en calderas. Asimismo, se observó que el bagazo aportó un alto contenido de volátiles (85,7%), lo que implica encendidos rápidos y alta intensidad de llama, mientras que la cáscara, con mayor proporción de carbono fijo (20,2%), prolonga los tiempos de combustión.

En relación con la densidad unitaria, los pellets producidos presentaron valores entre 0,79 y 1,19 g cm^{-3}, comparables con los reportados para pellets de madera (Obernberger & Thek, 2004). La mezcla 50:50 con 6% de humedad alcanzó la densidad máxima (1,19 g cm^{-3}). Sin embargo, formulaciones con más de 80% de cáscara mostraron baja compactación

La durabilidad superó el 80% en la mayoría de los tratamientos, alcanzando 99,25% en la mezcla 20:80 con 8% de humedad. Por el contrario, las formulaciones con alto contenido de cáscara no lograron consolidar pellets resistentes, lo que confirma la función aglutinante del bagazo descrita por Halim & Razali (2023) .

En cuanto al PCN, los valores oscilaron entre 20.456 y 28.659 kJ kg^{-1}. El máximo se registró en pellets de bagazo puro (28.659 kJ kg^{-1}), superando a combustibles de referencia como madera (18.000–19.000 kJ kg^{-1}) o cascarilla de arroz (14–16 MJ kg^{-1}). Este alto PCN se asocia al contenido de extractivos energéticos en el bagazo, en línea con lo planteado por Fassinou (2012).

A continuación, se presenta en la ecuación 1 el modelo matemático para la variable PCN con un R^2 de 0,9873, un R^2 predicho de 0,9747 y una predicción adecuada de 0,926; optimizando la variable se encuentra un PCN de 28.857 kJ kg^{-1}, para pellets compuestos con un MCB de 1,25% cáscara, 98,75% bagazo y 8,33% humedad. Además, en la figura 1 se observa la superficie de respuesta para la variable PCN y la optimización de la misma teniendo en cuenta las tres variables dependientes (PCN, DU y densidad), obteniendo como resultado PCN de 27.861 kJ kg^{-1}, DU de 99,9% y densidad de 1,07 g cm^{-3} con una formulación de 10,7% cáscara, 89,3% bagazo y 10,3% humedad.

$$PCN = +31478{,}09422 - 84{,}72782 * \text{MCB} - 479{,}45908 * \text{Humedad} - 0{,}608333 * \text{MCB} * \text{Humedad} + 0{,}097146 * \text{MCB}^2 + 21{,}42499 * \text{Humedad}^2 \quad (1)$$

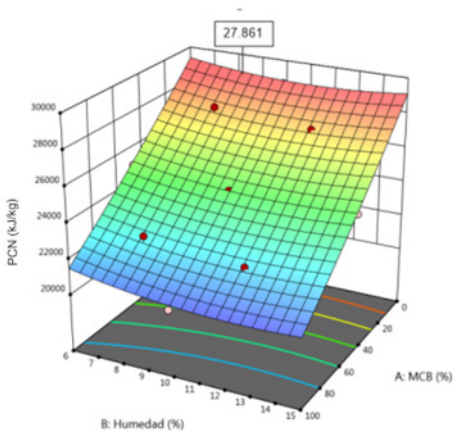


Figura 1. Superficie de respuesta del PCN.

CONCLUSIÓN

La investigación demostró que los residuos de cáscara y bagazo de coco del Chocó son materias primas viables para producir pellets combustibles con propiedades energéticas y mecánicas competitivas, con un valor experimental máximo de 28.659 kJ kg^{-1}. Fue posible optimizar PCN del pellet hasta un valor de 28.857 kJ kg^{-1}, para pellets formados con un MCB de 1,25% cáscara, 98,75% bagazo y 8,33% humedad sin embargo al optimizar las variables de respuesta se alcanzaría un pellet con la mezcla óptima (7,51% cáscara + 92,49% bagazo), con 10,09% humedad y con un PCN de 27.861kJ kg^{-1}, una DU del 99,9% y densidad de 1,07 g cm^{-3}. Este hallazgo aporta una alternativa sostenible para el aprovechamiento de residuos agroindustriales en zonas costeras tropicales, reduciendo impactos ambientales y promoviendo la seguridad energética local.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia por el financiamiento a través del proyecto “Centro de Excelencia (CE) para la innovación en mecanización y opciones energéticas para la agricultura familiar”, con código Hermes 52937. El apoyo en los laboratorios de Mecanización Agrícola y Procesos Agroindustriales, y al Consejo Comunitario de Sivirú “Cocosi” del municipio de Pizarro, Choco, por su disposición en el aporte de información y la materia prima para el trabajo.

REFERENCIAS

Agronet. (2023). Agronet. https://www.agronet.gov.co/Paginas/inicio.aspx

ASTM. (2020). Standard Test Method for Determination of Carbohydrates in Biomass by High Performance Liquid Chromatography. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E1758-01R20

Cui, X., Yang, J., Wang, Z., & Shi, X. (2021). Better use of bioenergy: A critical review of co-pelletizing for biofuel manufacturing. Carbon Capture Science & Technology, 1, 100005. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100005

Da Costa, J. S., Da Silva, M. G., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., De Assis, M. R., Bufalino, L., Numazawa, S., Trugilho, P. F., & Protásio, T. D. P. (2023). Relating features and combustion behavior of biomasses from the Amazonian agroforestry chain. Biomass Conversion and Biorefinery, 13(1), 321-341. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01121-1

Fassinou, W. F. (2012). Higher heating value (HHV) of vegetable oils, fats and biodiesels evaluation based on their pure fatty acids' HHV. Energy, 45(1), 798-805. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.011

Gallego, L. J., Cardona, S., Martínez, E., & Rios, L. A. (2020). Valorization of Palm-Oil Residues: Integrated Production of a Good Quality Bio-coal and Electricity via Torrefaction. Waste and Biomass Valorization, 11(5), 2273-2284. https://doi.org/10.1007/s12649-018-0459-7

Halim, S. A., & Razali, N. (2023). Pelletisation of peat moss using binder from palm oil refinery waste (spent bleaching earth) and binder from grey oyster mushroom plantation waste (spent mushroom substrate). Fuel, 342, 127765. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127765

Jiménez, B. H. F., & Galarza, L. F. G. (2019). Diseño e implementación de un prototipo para generación de energía térmica mediante la utilización de materia orgánica de coco como combustible.

Li, W., Bu, W., Guo, W., Jiang, Y., Wang, Y., & Yin, X. (2020). Preparation for industrial pellet production from blends of eucalyptus sawdust and hydrolysis lignin: The optimal variable combinations of co-pelletization. Biomass Conversion and Biorefinery, 10(2), 513-521. https://doi.org/10.1007/s13399-019-00444-y

Liu, J., Jiang, X., Li, Z., Gu, H., & Li, T. (2024). Insights into the pelletization behaviors of artificial lignocellulosic biomass based on cellulose, hemicellulose and lignin: A simplex lattice mixture design approach. International Journal of Biological Macromolecules, 280, 136000. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136000

Sarker, T., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. (2022). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: A review. Environmental Chemistry Letters. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01510-0

Valdés, C. F., Marrugo, G., Chejne, F., Cogollo, K., & Vallejos, D. (2018). Pelletization of Agroindustrial Biomasses from the Tropics as an Energy Resource: Implications of Pellet Quality. Energy & Fuels, 32(11), 11489-11501. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01673

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Desarrollo de un sistema activo para el seguimiento del sol

Development of an active system for trackin the sun

Edilson León Moreno Cárdenas[1]* and Ángela María Gómez Correa[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Energía
Fotovoltaico
Incremento
Seguidor solar

La energía solar se ha convertido en los últimos años en la principal fuente energética renovable implementada a nivel mundial. En el presente trabajo se diseño, construyó y evaluó un sistema activo de un grado de libertad para el seguimiento del sol. El sistema consistió en una unidad fotovoltaica, una estructura de soporte y una tarjeta electrónica para control. El sistema fue evaluado en la Estación Agraria Cotové, de la Universidad Nacional de Colombia, localizada en Sanfé de Antioquia, bajo un diseño completamente aleatorio. Durante 7 días entre las 8:00 a.m y 5:00 p.m, se registró la tensión y la corriente generada por la unidad fotovoltaica en posición horizontal (estático) y en la posición asignada por el seguidor solar. Las variables de respuesta fueron potencia (W) y energía (W.h) generada con el seguidor solar y con el sistema en posición horizontal. Los resultados fueron sometidos a una prueba de análisis de varianza ANOVA al 0,05%. La energía generada con el seguidor solar fue superior en todas las jornadas en relación al sistema estático, el incremento en la energía oscilo entre 16,73 y 44,96%. El análisis de varianza indicó que existen diferencias estadísticas en la energía generada entre ambos sistemas.

ABSTRACT

Keywords:
Energy
Photovoltaic panel
Increase
Solar tracker.

Solar energy has gained greater interest in recent years becoming the most widely implemented renewable energy in the world. In this study, a one-degree of freedom active solar tracking system was designed, built and evaluated. The system had a photovoltaic unit, a support structure and an electronic control board. The system was evaluated at the Estación Agraria Cotové of the Universidad Nacional de Colombia, located in Sante Fe de Antioquia. Was employed a completely randomized design. For seven days between 8:00 a.m and 5:00 p.m, the voltage and current generated by the photovoltaic unit were recorded. The readings were made for the static system (horizontal position) and for the position assigned by the solar tracker. The response variables were power (W) and energy (W.h) generated with the solar tracker and the system in a horizontal position. The results were subjected to a ANOVA test with a significance level of 0,05%. The energy generated with solar tracker was higher for all days tahn the static system, with an increase in energy ranging from 16,73 to 44,96%. The anlysis of variance indicated that there were statistical differences in the energy generated between both systems.

[1]Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5693-4273.
[2]Ingeniera Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
*Corresponding author: elmorenoc@unal.edu.co.

CC BY NC SA

La creciente demanda de energía eléctrica a nivel mundial, el agotamiento de los combustibles fósiles y cambios en los patrones de lluvias asociados al cambio climático, han llevado a la búsqueda de nuevas formas de generación de energía que estén basadas en fuentes renovables y que presenten un menor impacto al entorno. En tal sentido la generación de energía eléctrica basada en sistemas fotovoltaicos ha adquirido mayor interés en las últimas décadas, experimentando la mayor tasa de crecimiento hasta el punto de convertirse en el año 2022 en la fuente renovable que más energía generó, superando por primera vez a la energía eólica (Ahmed et al., 2025). El crecimiento de la industria fotovoltaica ha sido de tal magnitud, que solo en dos años (2022 – 2024), se instaló la misma capacidad que había sido instalada en siete décadas (1954 – 2022) y se proyecta que su capacidad se triplique para el año 2030 (Al-Ali et al., 2025). Sin embargo, persisten algunos retos por superar, como el bajo rendimiento en el aprovechamiento de la energía solar por parte de las celdas fotovoltaicas. Diversas estrategias se plantean para superar estas limitantes entre las que se destaca la instalación de seguidores solares. Un sistema para el seguimiento solar tiene como propósito orientar de manera perpendicular la dirección de los rayos del sol con relación a un objeto, a lo largo del día y del año. Este principio empleado en paneles solares, concentradores y reflectores solares permite un mejor aprovechamiento de la energía del sol en comparación con aquellos dispositivos que mantienen la superficie en una posición fija (Pérez et al., 2024). Sin embargo, dichos mecanismos elevan la complejidad y el costo de los sistemas fotovoltaicos lo que reduce su implementación. El objetivo de la investigación fue desarrollar un sistema de guiado solar activo de un grado de libertad de bajo costo, cuyo incremento en la generación de energía sea comparable con los sistemas convencionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñó, construyó y evaluó un sistema de seguimiento solar activo de un eje de rotación. La construcción fue realizada en el laboratorio de Mecanización Agrícola de la universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, mientras que su evaluación se llevó a cabo en la estación agraria Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, ubicada en la vereda El Espinal del municipio de Santafé de Antioquia, a 540 m.s.n.m y temperatura media de 27°C. El sistema consistió en una unidad fotovoltaica, una estructura de soporte y una tarjeta electrónica para control. La unidad fotovoltaica estuvo conformada por un panel solar Tiger Neo N-type 72HL4-(V) de 580 Wp, 42,37 V y 13,69 A a máxima potencia, un controlador de carga ML2420, dos baterías de 12 V y 100 Ah conectadas en serie y un inversor inti PALMA IIP243000, de 24 Vcc de entrada y 120 Vac de salida. Se diseñó una estructura tipo pórtico para soportar el panel solar, la misma fue ensamblada en perfil de aluminio estructural 6005 T6. El panel solar fue acoplado a la estructura mediante un eje de 5/8" y dos bridas de acero inoxidable de ¾", el eje fue apoyado en chumaceras UC – 202 de diametro interno de 5/8". Se empleó un acople tipo araña para unir el eje a un motor paso a paso NEMA 23 de 4,75 N.m y alimentado entre 24 y 48 Vdc. En todos los componentes de la estructura se verificaron los esfuerzos principales normales y cortantes.

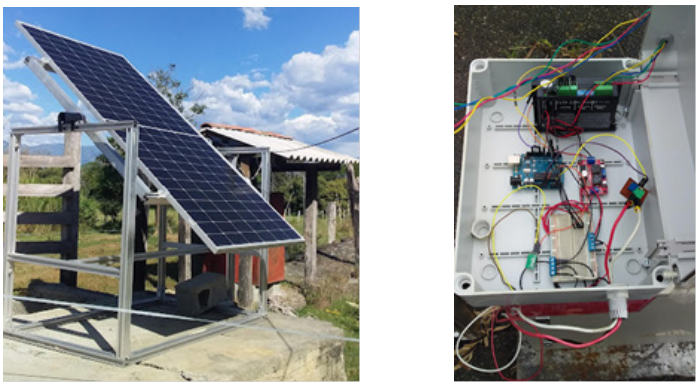
Para el control se usó una tarjeta Arduino Uno®, la misma fue conectada a un dirver DM556 con tensión de alimentación entre de 20 a 50 Vdc, quien a su vez se conectó al motor paso a paso. Para conservar la tensión en el driver se empleó una tarjeta LM2577s con tensión de entrada entre 4 y 35 Vdc y salida de 1,25 a 24 Vdc. Un mini conversor DC-DC multi fue usado para alimentar la tarjeta Arduino Uno®, además se construyó un módulo sensor de voltaje con entrada hasta 50 Vdc y salida de 5 Vdc, el mismo fue usado para llevar la señal del sensor a la tarjeta Arduino Uno®. La alimentación de la tarjeta de control provino de las baterías de la unidad fotovoltaica. Se elaboró un código de control (diagrama no mostrado) en el software de Arduino el cual fue ingresado a la tarjeta Arduino Uno® empleada.

Para evaluar el sistema de seguimiento solar se instaló la unidad fotovoltaica, la estructura de soporte y la tarjeta de control en el establo de la estación Agraria Cotové. La energía generada por el sistema fue empleada para satisfacer la totalidad de la demanda del lugar, consistente en elementos de iluminación, equipos eléctricos menores y una báscula para peso de ganado, estimada en 2.000 W.h para el día de mayor consumo. Durante 7 días entre las 8:00 a.m y las 5:00 p.m, se registró cada 30 minutos la tensión y la corriente generada por el panel solar en la posición al momento del día, posteriormente estas variables se registraron

para el mismo panel pero en posición horizontal. En cada caso se determinó para cada momento de lectura la potencia, la energía generada, y la energía generada al final de cada día, con éstos últimos valores se realizó una prueba de análisis de varianza ANOVA para comparar sus medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presentan los componentes del sistema de seguimiento solar, incluyendo la unidad fotovoltaica, la estructura de soporte y la tarjeta de control, instalado en la estación agraria Cotové. El equipo fue instalado y entró en operación el 3 de julio del presente año.



(a) (b)

Figura 1. Sistema de seguimiento solar. Panel solar, estructura de soporte (a), tarjeta de control implementada (b).

Las 7 jornadas de evaluación se llevaron a cabo entre el 10 de julio y el 23 de agosto del presente año. En la figura 2 se presenta como referencia el comportamiento de la energía generada para la cuarta y séptima jornadas de evaluación por el sistema con el panel solar horizontal estático y con el panel acoplado al seguidor. Se aprecia que durante todo el día la energía del sistema con el seguidor fue mayor con excepción del instante del zenit (en el lugar alrededor de la 1:00 p.m), explicable ya que el panel en condiciones estáticas se ubicó en posición horizontal. Esta tendencia fue constante durante todos los días de la evaluación. En la misma figura, las líneas verdes indican la difencia entre ambas condiciones y muestran que en la mañana y en la tarde se alcanza la mayor diferencia, presetándose en la tarde los mayores incrementos (tendencia en las siete jornadas, no presentadas todas ellas en este documento). La línea verde muestra el incremento en el rendimiento promedio diário, el cual para el caso de la jornada 4 fue de 33,63% y para la séptima fue 39,78%. En las demás jornadas el incremento osciló entre 16,73 y 44,96%, éstos resultados son consistentes con los reportados por Rashwan y Jailany (2014), quienes alcanzaron hasta 25% de incremento de energía con un seguidor de dos ejes. Entre tanto Hidayanti et al. (2020) indican que fue posible alcanzar un incremento en el rendimiento entre 8,96 y 19,29% para un seguidor solar de dos ejes.

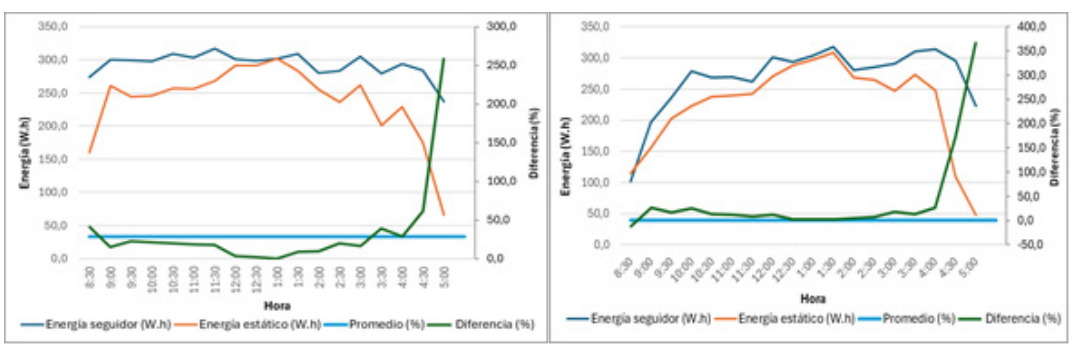


Figura 2. Energía generada a lo largo del día, diferencia y promedio diaria. Resultados para la cuarta jornada de evaluación (a) y para la sétima (b).

Los resultados para la energía total generada en las siete jornadas de evaluación se aprecian en la Tabla1. Los días de mayor generación corresponden a días soleados sin presencia de nubes (mediciones 4 y 5), mientras que en días con alta nubosidad la generación disminuyó (mediciones 2 y 1), sin embargo, en todas las evaluaciones la energía generada con el panel conectado al seguidor solar siempre fue superior, con un valor promedio de 705,95 W.h. Para los días sin presencia de nubes, el sistema con el seguidor solar logró mayores diferencias, en los días de alta nubosidad (jornadas 1 y 2), hubo menor diferencia, situación atribuida a una menor radiación solar más no a la ausencia de operación del sistema de seguimiento, ya que aún estas condiciones, el sistema permitió seguir la trayectoria del sol.

Tabla 1. Energía generada total al día con el sistema con el seguidor y con el panel estático para las jornadas de evaluación.

Fecha	Medición	Energía seguidor (W.h)	Energía estático (W.h)	Diferencia (W.h)
10-jul-25	1	4018,32	3550,54	467,78
11-jul-25	2	3976,40	3454,60	521,80
17-jul-25	3	4559,42	4010,37	549,05
18-jul-25	4	5275,53	4286,61	988,92
19-jul-25	5	4913,51	4067,26	846,25
22-ago-25	6	4507,39	3740,04	767,35
23-ago-25	7	4827,95	4036,47	791,49

En la Tabla 2 se presenta el resultado del análisis de varianza para el promedio de la energía generada al día para las siete jornadas de evaluación. El análisis muestra que existen diferencias estadísticas con un p-value de 0,0061, entre el promedio de la energía generada por el panel con el seguidor solar y el panel estático en posición horizontal.

El análisis de varianza indica que tomando los siete de evaluación, el promedio de generación de energía del sistema con el seguidor solar (4.582,64 W.h) presentó diferencias significativas con relación al mismo sistema, pero con el panel estático en posición horizontal (3877,98 W.h). Teniendo presente el incremento porcentual en la generación de energía en cada día, en los siete días evaluados el promedio fue de 30,39% a favor del sistema con el seguidor solar. Dicha cifra se encuentra en el rango reportado para sistemas más complejos de dos grados de libertad con valores entre 20 y 35% más de rendimiento energético en comparación con sistemas

Tabla 2. Análisis de varianza ANOVA para la energía promedia generada con el panel solar estático y con el panel con el seguidor.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F*	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1737924,8	1	1737924,802	11,018	0,0061	4,747
Dentro de los grupos	1892894,56	12	157741,2135			
Total	3630819,37	13				

* Para un nivel de significancia de 0,05.

estáticos (Sadeghi et al., 2025). De igual forma Kozak-Jagieła et al. (2025), indican que seguidores solares de dos grados de libertad muestran una producción neta de electricidad 34% mayor que los sistemas estáticos.

CONCLUSIÓN

Fue posible desarrollar un seguidor solar activo de un grado de libertad, su evaluación demuestró que bajo las condiciones analizadas en campo (días nublados y días

despejados) siempre el sistema con el seguidor solar generó más energía con relación al mismo sistema en posición horizontal. El incremento en la generación de energía al día osciló entre 16,73 y 44,96%, y el análisis de varianza indicó que dicho incremento es significativo. Todos los componentes del sistema son disponibles y el mismo no requiere de sensores para llevar a cabo la actividad de seguimiento del sol. Lo anterior hace accequible la tecnología y se convierte en una opción para ser implementada en regiones ecuatoriales con potencial en otras latitudes.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín por financiar el proyecto "Centro de excelencia (CE) para la innovación en mecanización y opciones energéticas para la agricultura familiar". (código: 52937).

REFERENCIAS

Ahmed S., Ali A., Ansari J. A., Qadir S. A. & Kumar A. L. 2025. A comprehensive review of solar photovoltaic systems: Scope, technologies, applications, progress, challenges and recommendations. IEEE Access, Vol 13, 69723 – 69750.

Hidayanti F., Rahmah F. & Ikrimah M. 2020. Dual-Axis Solar Tracking System Efficiency for Hydroponics Pump. International Journal of Emerging Trends of In Ingineering Reseach. Vol 8 (6), 2631 – 2634.

Pérez G. J. L., Gómez G M. A., García V. Ch., Carrillo S. R. V., Pérez S. G I. & Rodríguez R. J. 2024. The low-cost mechanism of a defined path guide slot-based passive solar tracker intended for developing countries. Technologies, 12(250), 1 – 21.

Sadeghi R., Parenti M., Memme S., Fossa M. & Morchio E. 2025. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems. Energies, Vol 18(10), 1 – 48.

Kozak-Jagieła E., Cisek P., Pawłowski A., Taler J. & Albrechtowicz P. 2025. Experimental Testing and Seasonal Performance Assessment of a Stationary and Sun-Tracked Photovoltaic–Thermal System. Energies, 18, 2 – 20.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño de un sistema de riego presurizado potenciado con energía solar para un limonar en zona rural en el municipio de Victoria, Caldas

Design of a pressurized irrigation system powered by solar energy for a lemon orchard in the rural area of Victoria, Caldas

Salomé García Benitez[1] and Carlos Alfredo Salazar Molina[2]

RESUMEN

El diseño de un sistema de riego alimentado por energía solar para un limonar en Victoria, Caldas, incluyó una bomba sumergible y un sistema fotovoltaico dimensionado según la demanda energética del sistema. La energía generada tiene un costo de 94,5 COP/kWh, un costo mucho más bajo que la energía de la red eléctrica (885, 85 COP/kWh), lo que genera un ahorro anual de 11.542.156 COP. La recuperación de la inversión se estima en 2,1 años. Además, el sistema ofrece autonomía energética y contribuye a la reducción de emisiones, alienándose con los objetivos de sostenibilidad agrícola. Este sistema es flexible, escalable y adaptable para futuras necesidades.

Palabras clave:
Ahorro de Energía
Bomba solar
Energía solar
Riego presurizado

ABSTRACT

The design of a solar-powered irrigation system for a lemon orchard in Victoria, Caldas included a submersible pump and a photovoltaic system sized to meet the energy demand. The energy produced costs 94.5 COP/kWh, significantly lower than the grid electricity cost of 885.85 COP/kWh, resulting in an annual savings of 11,542,156 COP. The investment payback period is estimated at 2.1 years. Additionally, the system offers energy autonomy and helps reduce emissions, aligning with agricultural sustainability goals. This system is flexible, scalable, and adaptable to future needs.

Keywords:
Energy savings
Solar pump
Solar energy
Pressurized irrigation

[1]Ingeniera Agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. sagarciabe@unal.edu.co
[2] Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. casalaza@unal.edu.co

CC BY NC SA

Las fuentes de energía renovables no convencionales, como la energía solar, ofrecen una opción viable para generar electricidad aprovechando recursos menos utilizados. Si embargo, uno de los principales obstáculos para su implementación ha sido el alto costo inicial asociado a la infraestructura requerida para su funcionamiento. Sin embargo, los incentivos gubernamentales y su bajo costo operativo, han incentivado su adopción, especialmente en sistemas de riego. En zonas rurales sin acceso a red eléctrica, las bombas solares de corriente directa (DC) ofrecen una solución eficiente, autónoma y económica que las bombas alimentadas por combustibles fósiles.

En este contexto, se diseñó un sistema de riego presurizado para un limonar de 3 Ha en Victoria, Caldas. Considerando las exigencias hídricas específicas de este cultivo en sus diferentes, así como la necesidad de optimizar el consumo energético, se propuso la implementación de un sistema de riego presurizado con bombeo potenciado por energía solar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del terreno:

El proyecto se planeó para una finca de 3ha, con una topografía plana, teniendo una inclinación de entre el 0 y 3% . El lote estaba destinado a ser renovado con limones de 1 año de edad de las variedades Volkameriana, Sunki y Citromen, a una densidad de siembra de 7 m X 7m. Un lago natural se utilizó como fuente principal de almacenamiento y captación de agua para el sistema de riego.

Las condiciones climáticas y edáficas del sitio de estudio se evaluaron estimando una precipitación anual promedio de 3.757 mm y una evapotranspiración de referencia (ETo) de 2,69mm/día. Además, el análisis físico del suelo realizado por AGROSOIL LAB (2025) indicó que el terreno tiene una textura franco arenosa y una densidad aparente de 1 g/cm^3. Estos valores indican una porosidad que favorece la aireación y el drenaje, sin presentar limitaciones significativas por compactación.

Se realizó un análisis de radiación diaria en la zona con el software Global Solar Atlas, que arrojó una producción específica de energía fotovoltaica (PVOT specific) de 4.403 kWh/kWp/día (Global Solar Atlas, 2025.), Esto indica que cada kilovatio pico (kWp) instalado de paneles solares puede generar, en promedio, 4.4 kWh diarios, lo que refleja un alto potencial solar en la región.

Diseño del sistema de riego:

Se seleccionaron micro aspersores con un caudal nominal de 70- 110 L/h, un radio de cobertura de 1-3m y una presión de operación entre 0,5 y 2 Bar (5-20,4 mca), ubicados entre los árboles asegurando una adecuada distribución del agua, para proveer una lámina de agua de 5,3 mm y prevenir enfermedades fúngicas, con un tiempo de riego de 8 horas cada 3 días para provechar las horas de luz efectiva. El terreno se dividió en módulos de 0,25 ha con 64 micro aspersores por modulo, lo que resultó en un caudal total de 31,2 GPM requerido para regar cada módulo.

Selección de la bomba:

Para seleccionar la bomba, y teniendo en cuenta la altura dinámica calculada en el software Epanet de 45,16 mca, se seleccionó una bomba solar sumergible marca Connera, modelo KOL4-120-750, que cumple con los requisitos del caudal y presión. La bomba seleccionada cuente con un motor de alta eficiencia, protección IP68 y rastreo MPPT (CONNERA, 2024). Se incorporó un factor de seguridad en el diseño, añadiendo 5 mca y 10 l/min de caudal extra para garantizar su funcionamiento eficiente y permitir futuras expansiones en el sistema

Dimensionamiento del sistema fotovoltaico:

Una vez seleccionada la bomba solar, se dimensionó el sistema fotovoltaico en base a la demanda energética de la bomba mostrada en la Figura 1.

TABLA DE ESPECIFICACIONES

CÓDIGO	POTENCIA ENTRADA ARREGLO FOTOVOLTÁICO (Wp)	MÁXIMO VOLTAJE DE ENTRADA (Vcc)	RANGO DE VOLTAJE DE OPERACIÓN (Vcc)	VOLTAJE DE OPERACIÓN (Vca)	MÁXIMA POTENCIA MOTOBOMBA (W)	CORRIENTE MOTOBOMBA (A)	DESCARGA (pulgadas)
KOL4-120-750-MP	≥ 8 800	820	480 - 800	440 (380 - 460)	7 500	13.64	2" NPT

Figura 1. Tabla de especificaciones de la bomba (CONNERA, 2024).

Dado que la bomba tiene un requerimiento fotovoltaico de al menos 8800W y teniendo en cuenta las características del panel de 605 W, donde según la ficha técnica de Longi (2025), el máximo voltaje de entrada de la bomba (Vcc) es 820V y que el voltaje de circuito abierto (Voc) del panel es de 52,27 V se calculó la cantidad de paneles necesarios para entregar la potencia requerida por la bomba utilizando la ecuación [1]. Por lo que se obtuvo un número de 15 paneles para el sistema necesarios para generar 9075, suficiente para cubrir la potencia requerida para la bomba

$$\#Paneles = Vcc/Voc \quad (1)$$

Donde; Vcc: máximo voltaje de entrada de la bomba [V], Voc: voltaje de circuito abierto [V]
Para la instalación de los paneles, se proyectó su ubicación en una zona abierta y libre de sombras cerca del lago, para minimizar perdidas por caída de tensión, y se propuso una orientación de este a oeste con inclinación hacia el sur para optimizar la captación solar.

Costo del sistema fotovoltaico:
Se realizó una estimación de los costos asociados a los elementos e instalación del sistema fotovoltaico y la bomba sumergible, considerando los precios de mercado para equipos fotovoltaicos, accesorios eléctricos y costos de instalación. El costo total del sistema fue de 27.558.960 COP, que incluye un costo de mantenimiento del 20%

Para evaluar la viabilidad económica se calculó el costo kWh generado durante 20 años de vida útil del sistema. Con una producción total de 291,740kWh, el costo por kWh resultante fue de 94,5 COP/kWh.

En comparación, considerando el consumo energético básico de energía de la finca y los precios de la energía de red, según la tabla de tarifas de Chec (2025), el consumo se clasifica en comercial o industrial, lo que implica tarifas de energía con contribución. Estas tarifas oscilan entre los 598,99 COP/kWh a 1172,70 COP/kWh, con un promedio de costo de kW de red de 885,85 COP. Esto resulta en un ahorro de 791,35 COP por kWh consumido. El ahorro energético anual estimado es de 11.542.156 COP/año, lo que permite una recuperación de la inversión en aproximadamente 2,1 años, después de los cuales comenzaría a generar ahorros netos durante el resto de la vida útil del sistema.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño fotovoltaico:
El sistema fotovoltaico fue diseñado cumpliendo con 15 paneles solares de 605W, conectados en serie, lo que proporciona una potencia total de 9075 W. Cada panel presenta un voltaje de circuito abierto (Voc) de 52,27 V que se refiere al máximo voltaje que puede generar una célula solar antes de comenzar a operar (Handuro, 2024) y un voltaje en el punto de máxima potencia (Vmp) de 44,03V.

Con base en esto el sistema completo entregaría:
- Un voltaje total en el circuito abierto (Voc total) de 784 V, el cual se mantiene por debajo del límite máximo de entrada permitido por la bomba (820V), reduciendo así riesgos de sobrevoltaje y daños en los componentes eléctricos.

- Un voltaje de operación real (Vmp total) de 660V, el cual está dentro del rango recomendado de 480V a 800V, asegurado eficiencia en la entrega de energía durante el funcionamiento normal

Análisis de la viabilidad económica y aprovechamiento del sistema fotovoltaico:
El factor diferencial que garantiza que el sistema sea rentable y competitivo radica en la vida útil de los paneles de 20 años y el uso constante del mismo. Un sistema bien operado y mantenido no solo asegura la producción energética, sino que mantiene bajos costos operativos, evita incrementos tarifarios de la red y se genere un ahorro. Además, proporciona independencia energética y la flexibilidad de ampliarse para cubrir futuras demandas, asegurando su viabilidad técnica y económica a largo plazo.

CONCLUSIÓN

El sistema fotovoltaico diseñado para el riego del limonar en Victoria, Caldas demuestra ser una solución técnicamente viable y económicamente rentable a largo plazo. A pesar de las perdidas energéticas en días sin riego, el costo por kWh generado es nueve veces más bajo que el de la energía de la red eléctrica, generando

un ahorro significativo durante la vida útil del sistema. Además, el ciclo productivo del limón, que se extiende entre 15 y 25 años, asegura que el sistema se mantenga funcional durante todo este tiempo.

Aunque existen desafíos asociados al uso intermitente de la energía solar, se identificaron opciones de optimización, como la instalación de un inversor bidireccional para inyectar la energía sobrante a la red o la distribución de la energía sobrante dentro de la finca para otros usos. Estas alternativas, aunque implican costos adicionales, podrían compensarse a largo plazo con los ingresos y ahorros generados.

El sistema representa una opción rentable, sostenible y escalable, que no solo permite un ahorro energético significativo, sino que tambien mejora la autonomía de la finca, asegurando un modelo autosuficiente y respetuoso con el medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi profesor Carlos A. Salazar Molina por su valiosa orientación y apoyo durante el desarrollo de mis prácticas y la redacción de este trabajo. A Ferragro SAS, por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas y aprender habilidades clave para este proyecto. Agradezco a Santiago Hoyos Gutiérrez, quien me permitió presentar el proyecto y facilitó la divulgación de los resultados obtenidos. De manera muy especial agradezco a mi padre Javier García Giraldo y a Cristian Rivera Restrepo por su apoyo incondicional y motivación durante este proceso.

REFERENCIAS

Agrosoil LAB. (2025). Informe análisis de suelos. victoria.

Chec. (2025, junio). Publicaciones de Tarifas - Manizales. Chec.com. Retrieved July 14, 2025, from https://www.chec.com.co/Home/Transparencia/Planeaci%C3%B3n-presupuestos-e-informes/Publicaciones-de-Tarifas

CONNERA. (2024). Motobombas sumergibles Multipowe KOL4. https://www.ferragro.com/products/electrobom-sumergi-kol4-120-750-mp-7500w?srsltid=AfmBOoowfsHcf0KV7nZKdNJuoGc-WCOjZ9tz1fymNwwjnHuYltBELEVq

Global Solar Atlas. (n.d.). PVOT specific. Global Solar Atlas. Retrieved 07 11, 2025, from https://globalsolaratlas.info/map?s=5.464263,-74.864273&m=site&c=5.356598,-74.917831,11

Handuro. (2024). Solar Pump Instruction Book. https://solarsol.com.ar/webfiles/solarsol/productos/48/archivos/HANDURO-%20DC%20instruction%20(1).pdfLongi. (2025). LR7-72HTHF 605-630M.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Desempeño de un sistema fotovoltaico aislado para una planta de desalinización por nanofiltración

Performance of an isolated photovoltaic system for a nanofiltration desalination plant

David Domingo Lara Castells[1], Gabriel Guillermo Merino Coria[1] and Andrés Quezada[1]

Palabras clave:
Desalinización FV
Gestión energética
Sistema FV aislado

RESUMEN

El presente trabajo evaluó la generación energética, la demanda de potencia y la producción de agua de una planta desaladora por nanofiltración alimentada con un sistema de energía fotovoltaica aislado en la localidad de Rumena, región del Biobío, Chile. Se determinó la demanda de potencia de la planta desalinizadora junto con la generación fotovoltaica para establecer una secuencia de operación de la planta que permita aumentar la cantidad de agua producida, considerando restricciones de caudales de operación, volumen de estanques y capacidad del banco de baterías. Con las condiciones promedio de irradiancia se obtuvo una operación de 6 – 8 h día^{-1}, produciendo entre 2400 y 4200 L diarios en el periodo de mayor necesidad hídrica (septiembre y abril). Una gestión adecuada del consumo de la planta aprovechar hasta un 98% de la energía fotovoltaica generada.

Keywords:
PV desalination
Energy management
Standalone PV system

ABSTRACT

The present work evaluated the energy generation, power demand, and water production of a desalination plant using nanofiltration, powered by a standalone photovoltaic energy system in the locality of Rumena, Biobío Region, Chile. The methodology consisted of determining the power demand of the desalination plant along with the photovoltaic generation and establishing an operational sequence for the plant to increase the amount of water produced, taking into account operating flow rate restrictions, tank volumes, and the battery bank's capacity. Under average irradiance conditions, an operation of 6–8 hours per day was achieved, producing between 2,400 and 4,200 liters per day during the period of greatest water demand (September and April). Proper management of the plant's consumption can make use of up to 98% of the photovoltaic energy generated.

[1]Departamento de Mecanización y Energía, Universidad de Concepción, Campus Chillán, Chile.
*Corresponding autor: dalara@udec.cl

CC BY NC SA

Durante las últimas décadas, en Chile la escasez hídrica ha provocado desabastecimiento de agua (Garreaud et al, 2020), especialmente en localidades costera, tal es el caso de Caleta Rumena en la región del Biobío. Actualmente, el abastecimiento se realiza con camiones aljibe, los cuales no dan abasto a la demanda poblacional y representan un elevado costo para el gobierno central (Fragkou, M.C et al, 2022).

Los procesos de desalinización por filtración, como la osmosis inversa (OR), han demostrado ser efectivos para crear fuentes de agua potable de alta calidad, segura y confiable (Elimelech, M and Phillip, W.A, 2011). La separación de sales en los sistemas de OR requiere de bombas de alta presión (hasta 60 bar), aumentando la demanda energética, siendo este el principal costo de la desalinización (Riveros, 2021). Por otra parte, la nanofiltración (NF) tiene la ventaja de trabajar a menor presión (hasta 40 bar). Además, el agua potable producida no requiere de remineralización como ocurre con la OR. Sin embargo, la NF requiere de un segundo paso de filtrado a 15 bar, para cumplir con la norma de agua potable, utilizando más equipamiento.

La generación fotovoltaica ha demostrado ser una fuente limpia y una alternativa a los combustibles fósiles especialmente en lugares aislados (Gorjian, S. et al, 2022) donde la red eléctrica es precaria o inexistente.

Este proyecto, consta de una planta de desalinización con tecnología de nanofiltración alimentada con energía fotovoltaica y almacenamiento en baterías. El objetivo de este trabajo es determinar el desempeño energético del sistema fotovoltaico a partir de la demanda de potencia de la planta de desalinización, considerando las restricciones de generación y de producción de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

La planta de desalinización, mostrada en la Figura 1, posee tres etapas, en la primera etapa (ET1) corresponde al abastecimiento de agua de mar con la bomba M1, en la segunda etapa (ET2) se produce el primer paso de nanofiltración (NF1) utilizando la bomba alimentadora M2 y la bomba de alta presión M3; y la tercera etapa (ET3) hace el segundo paso de nanofiltración NF2 con la operación de la bomba M4

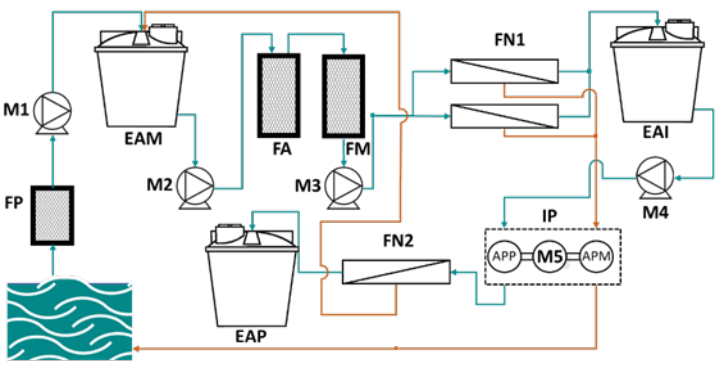


Figura 1. Esquema de la planta de desalinizadora. (Fuente: Elaboración propia).

y la bomba M5 que también incluye recuperador de energía. Las presiones máximas de operación de 40 bar para el PNF1 y 17 bar para el PNF2.

Todos los motores son alimentados desde tres inversores Victron multiplus 3000W – 48V. El banco de baterías (BB), utilizado como estabilizador de potencia, posee 16 baterías de 200 Ah y 12 V y se cargan con dos controladores de carga Victron MPPT 250/85. Los datos de potencia fotovoltaica generada, estado de carga del BB y potencia consumida por la planta se obtuvieron con la plataforma VRM por medio del sistema Victron Color Control GX. La irradiancia fue obtenida desde la base de datos del Explorador Solar del Ministerio de Energía.

Para operar la planta se definieron cinco escenarios de funcionamiento, cada etapa funcionando en forma independiente, ET1 y ET2 en conjunto y todas las etapas a la vez. Las restricciones correspondieron al

volumen mínimo y máximo de los estanques de 5000 L. Por otra parte, la corriente de descarga se limitó en un 10% de la corriente de carga (80 A) y la profundidad de descarga (DoD) se fijó en 50% (Shamin, N. et al,2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La demanda de potencia de cada escenario se muestran en la Tabla 1, el E2 demanda 6,3 kW correspondiente al NF1, mientras que el E4 demanda 5,0 kW representando el consumo de NF1 y NF2 funcionando simultáneamente. La mayor demanda alcanza 7,47 kW cuando solo funciona el E1 y E2 al mismo tiempo.

Tabla 1. Registro de datos de operación y desempeño de NF1 y NF2 distintos escenarios.

Escenarios	Presión (bar)		Potencia (W)	Permeado (L/min)		Rechazo (L/min)	
	NF1	NF22	Consumo	P_{ET1}	P_{ET2}	R_{ET1}	R_{ET2}
E1	-	-	1132	-	-	-	-
E2	39,7	-	6342	18,2	-	40,0	-
E3	-	16,8	1723	-	20,0	-	10,6
E4	39,0	16,6	5009	13,4	20,0	22,8	10,6
E5	39,0	16,6	7474	13,4	20,0	22,8	10,6

En la Figura 2 se muestra el flujo de potencia. La planta trabajó de 9:00 a 17:00 aproximadamente con el fin de operar la mayor parte del día, demandando potencias entre 6,3 kW a 7,47 kW. La generación fotovoltaica alcanza 7,3 kW, por lo que el sistema demanda potencia desde el BB alcanzando un DoD del 10% y una corriente de descarga de 65 A. Durante el ciclo de trabajo el consumo fue prácticamente igual a la generación con energía con apenas 2% de energía no consumida. La producción total de agua fue de 4200 L.

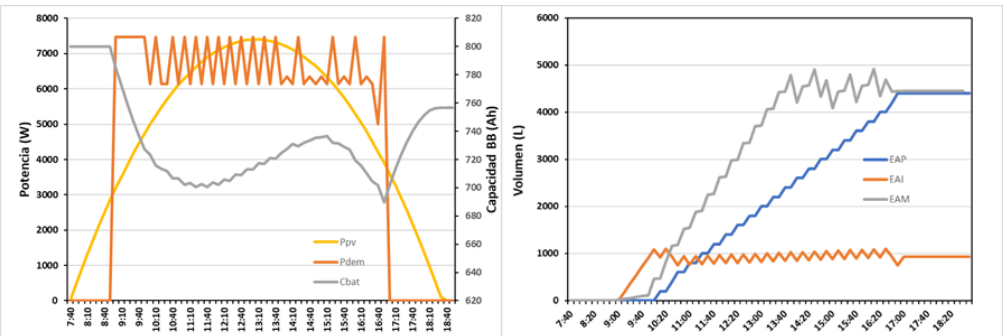


Figura 2. Operación de la planta desalinizadora (a) potencia generada, consumida y DoD, (b) Volumen de estanques..

CONCLUSIÓN

El ajuste adecuado de funcionamiento de las distintas etapas de la planta de desalinización permitió aprovechar casi la totalidad de la potencia fotovoltaica generada alcanzando un 98%. El E5 es el escenario de mayor demanda y ocurre debido al desabastecimiento del agua de mar y el agua necesaria para alimentar la ET2, por lo que se debe mejorar el diseño de la planta igualando la producción de agua de ET1 con la alimentación de agua para ET2. En este régimen de operación, la corriente de descarga y el DoD no superaron los límites establecidos.

Esta configuración permite abastecer hasta 4200 litros diarios de agua potable en el periodo de de mayor demanda.

REFERENCIAS

Garreaud, R. D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., et al. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. International Journal of Climatology.

Fragkou, M.C., Monsalve-Tapia, T., Pereira-Roa, V., & Bolados-Arratia, M. (2022). Abastecimiento de agua potable por camiones aljibe durante la megasequía: un análisis hidrosocial de la provincia de Petorca, Chile. EURE, 48(145)

Elimelech, M., & Phillip, W.A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. Science, 333(6043), 712–717.

Riveros D. (2021). Evaluación de sistemas multiusuarios de desalinización e impulsión de agua en minería y propuestas de políticas públicas para su implementación.

Gorjian, S., Ghobadian, B., Ebadi, H., Ketabchi, F., & Khanmohammadi, S. (2020, January 1). Chapter 8 - Applications of solar PV systems in desalination technologies (S. Gorjian & A. Shukla, Eds.). ScienceDirect; Academic.

Shamim, N., et al. (2022). Valve Regulated Lead Acid Battery Evaluation under Peak Shaving Operating Conditions. Energies, 15(9), 3389.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Dinámicas probabilísticas de la humedad del suelo bajo diferentes densidades de paneles solares en sistemas agrofotovoltaicos en el Caribe Colombiano

Probabilistic soil moisture dynamics under different solar panel densities in agrophotovoltaic systems in the Colombian Caribbean

Arley Zapata-Hernández[1] and Andrés Ochoa[1]

Palabras clave:
Caribe colombiano
Densidad de paneles solares
Funciones de densidad de probabilidad
Humedad del suelo
Sistemas agrofotovoltaicos

RESUMEN

Los sistemas agrofotovoltaicos representan una alternativa innovadora para optimizar el uso dual de la tierra en el Caribe colombiano. Este trabajo evaluó el efecto de diferentes densidades de paneles solares (αroof) sobre las dinámicas probabilísticas de la humedad del suelo en cultivos de café mediante un modelo estocástico basado en las ecuaciones de Rodríguez-Iturbe et al. (1999) y Laio et al. (2001). Se implementó el modelo para las condiciones edafoclimáticas del Magdalena, considerando cinco escenarios de densidad: αroof = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 y 0,8. Las funciones de distribución acumulativa evidenciaron un desplazamiento progresivo hacia mayores contenidos de humedad conforme aumenta αroof. El sistema convencional (αroof = 0,0) mostró distribuciones concentradas en valores bajos de humedad, indicando déficit hídrico frecuente. Las densidades intermedias (αroof = 0,4-0,6) presentaron el balance óptimo entre conservación hídrica y disponibilidad lumínica, con distribuciones que favorecen contenidos próximos a la capacidad de campo. Las configuraciones de alta densidad (αroof = 0,8) evidenciaron desplazamiento excesivo hacia contenidos elevados de humedad. Los resultados demuestran que los sistemas agrofotovoltaicos con densidades apropiadas mejoran significativamente las condiciones hídricas del café, reduciendo la vulnerabilidad ante la variabilidad climática característica de la región.

ABSTRACT

Keywords:
Colombian Caribbean
Solar panel density
Probability density functions
Soil moisture
Agrophotovoltaic systems

Agrophotovoltaic systems represent an innovative alternative for optimizing dual land use in the Colombian Caribbean. This work evaluated the effect of different solar panel densities (αroof) on probabilistic soil moisture dynamics in coffee crops using a stochastic model based on Rodríguez-Iturbe et al. (1999) and Laio et al. (2001) equations. The model was implemented for Magdalena's edaphoclimatic conditions, considering five density scenarios: αroof = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, and 0.8. Cumulative distribution functions evidenced a progressive shift toward higher moisture contents as αroof increases. The conventional system (αroof = 0.0) showed distributions concentrated in low moisture values, indicating frequent water deficit. Intermediate densities (αroof = 0.4-0.6) presented optimal balance between water conservation and light availability, with distributions favoring contents near field capacity. High-density configurations (αroof = 0.8) evidenced excessive displacement toward elevated moisture contents. Results demonstrate that agrophotovoltaic systems with appropriate densities significantly improve coffee water conditions, reducing vulnerability to climate variability characteristic of the region.

[1]Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
*Corresponding author: adzapatah@unal.edu.co

CC BY NC SA

Los sistemas agrofotovoltaicos (APV) representan una estrategia innovadora para optimizar el uso dual de la tierra mediante la integración sinérgica de producción agrícola y generación de energía solar fotovoltaica (Dinesh & Pearce, 2016). En el contexto del Caribe colombiano, donde convergen altos niveles de radiación solar (5,5 kWh/m²/día) y una agricultura intensiva con requerimientos de riego suplementario, estos sistemas emergen como una alternativa viable para promover la sostenibilidad energética, hídrica y productiva (Adeh et al., 2018).

La densidad de paneles solares en los sistemas APV modifica significativamente las condiciones microclimáticas del agroecosistema al interceptar la radiación incidente. (Elamri et al., 2018). Esta alteración en el balance energético afecta directamente los procesos ecohidrológicos, particularmente la evapotranspiración y, consecuentemente, la dinámica estocástica de la humedad del suelo (Barron-Gafford et al., 2019).

Los modelos estocásticos desarrollados por Rodríguez-Iturbe et al. (1999) y Laio et al. (2001) han demostrado eficacia para caracterizar las dinámicas probabilísticas de la humedad del suelo mediante funciones de densidad de probabilidad que integran características edáficas, climáticas y de vegetación. Su aplicación en sistemas APV permitiría cuantificar los beneficios hídricos asociados a diferentes configuraciones de paneles.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes densidades de paneles solares sobre las funciones de distribución acumulativa de la humedad del suelo en sistemas agrofotovoltaicos en el Caribe colombiano, utilizando un enfoque de modelación estocástica aplicado a las condiciones edafoclimáticas de la región del Magdalena.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló para las condiciones edafoclimáticas de la región del Magdalena, Colombia. Esta región presenta clima semiárido tropical con precipitación anual de 1.200 mm, temperatura media de 28°C y radiación solar de 5,5 kWh/m²/día (IDEAM, 2019). Los suelos predominantes presentan texturas franco-arenosas características de las llanuras aluviales.

La radiación disponible para el cultivo en sistemas APV se estimó mediante la ecuación [1] propuesta por Muñoz (2019), que incorpora los índices de claridad atmosféricos y la probabilidad de eventos de precipitación. La radiación interceptada por el cultivo se modificó según la densidad de paneles solares mediante la ecuación [2], donde $\alpha roof$ representa la fracción de cobertura de paneles solares.

La evapotranspiración máxima se calculó mediante la ecuación de Priestley-Taylor [3], considerando la radiación disponible bajo los paneles. La evapotranspiración en función de la humedad del suelo se modeló según la ecuación [4] propuesta por Laio et al. (2001), incorporando las limitaciones por estrés hídrico.

Se implementó el modelo estocástico de Rodríguez-Iturbe et al. (1999) y Laio et al. (2001), expresado mediante la ecuación [5]. Esta ecuación considera cuatro rangos de humedad del suelo: punto higroscópico (sh), punto de marchitez (sw), umbral crítico (s*), capacidad de campo (sfc) y saturación.

Los parámetros edáficos corresponden a suelos de la región: Ks = 11,73 cm/d, ψs = -25,6 cm, n = 0,52, θ = 0,17, sw = 0,18 y sfc = 0,49. La profundidad radicular se fijó en 70 cm y la evapotranspiración máxima en 5,8 mm d^{-1}. Se evaluaron cinco densidades de paneles: $\alpha roof$ = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 y 0,8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 presenta las funciones de distribución acumulativa de la humedad del suelo para diferentes densidades de paneles solares en sistemas agrofotovoltaicos con café. Los resultados evidencian un efecto significativo de $\alpha roof$ sobre la distribución probabilística de la humedad del suelo, con patrones que reflejan la modificación del balance hídrico debido a la interceptación de radiación por los paneles solares. El análisis de las curvas revela un desplazamiento progresivo de las distribuciones hacia mayores contenidos de humedad conforme aumenta la densidad de paneles. El sistema convencional ($\alpha roof$ = 0,0) presenta una curva caracterizada por una transición abrupta y concentrada en valores bajos de humedad, evidenciando condiciones de déficit hídrico frecuente

que pueden comprometer el desarrollo fisiológico del café. Esta distribución indica alta probabilidad de que el cultivo experimente estrés hídrico, particularmente durante los períodos secos característicos del Caribe colombiano.

Las configuraciones con densidades intermedias (αroof = 0,4-0,6) muestran distribuciones que favorecen contenidos de humedad más próximos a la capacidad de campo (sfc = 0,49). Estas curvas presentan transiciones más suaves y medianas que se aproximan al valor óptimo de retención hídrica, sugiriendo condiciones más estables para *Coffea arabica*. Según Carr (2001), estos rangos de humedad corresponden a condiciones hídricas favorables que optimizan tanto la absorción de nutrientes como los procesos fotosintéticos del café.

En contraste, las configuraciones de alta densidad (αroof = 0,8) evidencian un desplazamiento hacia contenidos elevados de humedad, con distribuciones que podrían indicar riesgo de encharcamiento o condiciones anaeróbicas. Aunque estas configuraciones maximizan la conservación hídrica, la reducción significativa en la radiación disponible puede limitar la fotosíntesis y afectar la productividad del cultivo.

El modelo estocástico captura efectivamente la variabilidad natural de la humedad del suelo bajo diferentes escenarios de cobertura solar. Los hallazgos coinciden con investigaciones previas que documentan beneficios hídricos de sistemas APV (Barron-Gafford et al., 2019; Elamri et al., 2018), aportando una cuantificación probabilística específica para café en condiciones tropicales y constituyendo una herramienta valiosa para el diseño óptimo de sistemas agrofotovoltaicos.

.

FORMATO ECUACIONES, FIGURAS Y TABLAS

Ecuaciones

$$R(c) = \mu_0[\lambda' c_w + (1-\lambda')c_d] \qquad [1]$$

Donde μ_0 es el promedio de la irradiación en el tope de la atmósfera (TOA), λ_0 representa la frecuencia de los eventos de precipitación modelados como un proceso de Poisson (Laio et al., 2001; Rodríguez-Iturbe et al., 1999b) y c_w y c_d son variables aleatorias representando el clear-sky index para días húmedos y secos respectivamente

$$R_{crop} = (1-\alpha_{roof})R(c) - H_e \qquad [2]$$

Donde: αroof es el albedo de los módulos solares, c el clear-sky index y He la energía fotovoltaica producida.

$$E_{max}(R_{crop}) = \frac{1}{\lambda_v \rho_w}\frac{\alpha_{PT}\Delta_e R_{crop}}{\Delta_e + \gamma_p} \qquad [3]$$

donde λ_v es el calor latente de vaporización, ρ_w la densidad del agua, α_{PT} la constante de Priestley-Taylor (1.26), γ_p la constante psicrométrica.

$$E(s) = \begin{cases} E_w \frac{s-s_h}{s_w-s_h}, & s_h < s \le s_w \\ E_w + (E_{max}-E_w)\frac{s-s_w}{s^*-s_w}, & s_w < s \le s^* \\ E_{max}, & s^* < s \le 1 \end{cases} \qquad [4]$$

Donde: *Emax,* tasa de evapotranspiración para toda la humedad del suelo por encima del punto de cierre incipiente de los estomas (s^*); s_w, punto de marchitez. s_h, humedad higroscópica del suelo. *Ew* representa la tasa de evaporación diaria.

$$\rho(s) = \frac{E(s)}{nz} + \frac{L(s)}{nz} = \begin{cases} \frac{C}{\eta_w}\left(\frac{s-s_h}{s_w-s_h}\right)^{(T_1-1)}e^{-\gamma s}, & s_h \le s \le s_w \\ \frac{C}{\eta_w}\left[1+\left(\frac{\eta}{\eta_w}-1\right)\frac{s-s_w}{s^*-s_w}\right]^{T_2-1}e^{-\gamma s}, & s_w < s \le s^* \\ \frac{C}{\eta}e^{-\gamma s+\frac{\lambda'}{\eta}(s-s^*)}\left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{T_2}, & s* < s \le s_{fc} \\ \frac{C}{\eta}e^{-(\beta+\gamma)s+\beta s_{fc}}\left(\frac{\eta e^{\beta s}}{(n-m)e^{\beta s}+me^{\beta s}}\right)^{T_3+1}\left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{T_2-1}e^{T_4}, & s_{fc} < s \le 1 \end{cases} \qquad [5]$$

$$\text{donde } \eta = \frac{E_max}{nZ_r},\ \eta_w = \frac{E_w}{nZ_r},\ T_1 = \lambda'\frac{s_w-s_h}{\eta_w},\ T_2 = \lambda'\frac{s^*-s_w}{\eta-\eta_w},\ T_3 = \frac{\lambda'}{\beta(\eta-m)},\ T_4 = \lambda'\frac{s_{fc}-s^*}{\eta},\ \gamma = \frac{nZ_r}{\alpha},$$

Donde: λ_0 representa la frecuencia de los eventos de precipitación, *s* el contenido de agua en el suelo, *n* la porosidad del suelo, *m* índice de tamaño de poros del suelo.

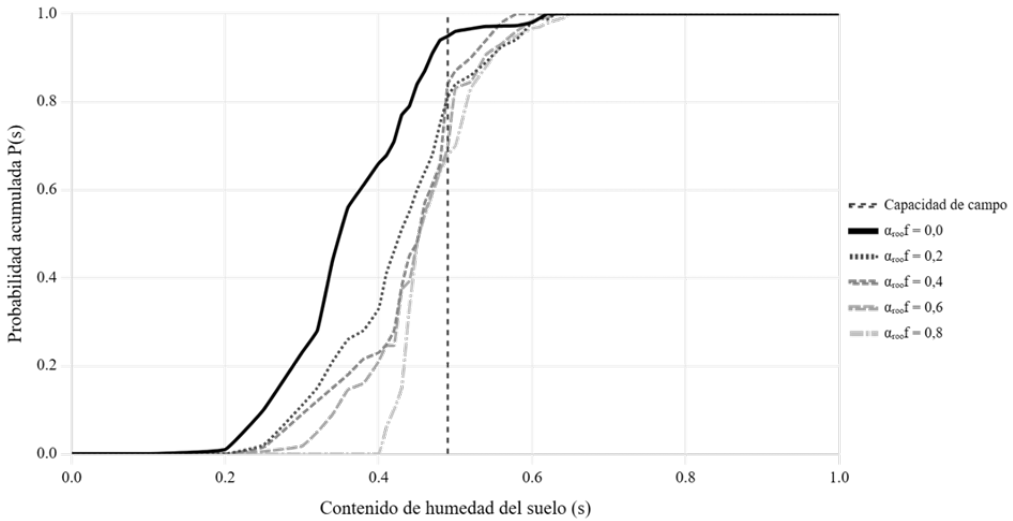


Figura 1. Funciones de distribución acumulativa de la humedad del suelo para diferentes densidades de paneles solares (αroof) en sistemas agrofotovoltaicos. La línea vertical punteada indica la capacidad de campo (sfc = 0,49).

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que la densidad de paneles solares modifica significativamente las dinámicas probabilísticas de la humedad del suelo en cultivos de café del Caribe colombiano. El modelo estocástico implementado capturó efectivamente las modificaciones en el balance hídrico asociadas a diferentes configuraciones de αroof.

Las funciones de distribución acumulativa evidencian un desplazamiento progresivo de las curvas hacia mayores contenidos de humedad conforme aumenta la densidad de paneles. El sistema convencional (αroof = 0,0) presenta una distribución concentrada en valores bajos de humedad, indicando condiciones de déficit hídrico frecuente que pueden limitar el desarrollo del café. En contraste, las configuraciones con mayor densidad de paneles (αroof = 0,8) muestran distribuciones desplazadas hacia contenidos de humedad más elevados, aunque con riesgo potencial de exceso hídrico.

Las densidades intermedias (αroof = 0,4-0,6) emergen como las configuraciones más prometedoras, presentando distribuciones que favorecen contenidos de humedad próximos a la capacidad de campo. Estas configuraciones proporcionan el balance óptimo entre conservación hídrica y disponibilidad lumínica, minimizando tanto el riesgo de déficit como de exceso hídrico.

La metodología desarrollada constituye una herramienta robusta para evaluar sistemas agrofotovoltaicos en zonas tropicales. Futuras investigaciones deben cuantificar el impacto de las sombras sobre la fotosíntesis y productividad del grano de café, así como evaluar la generación energética para desarrollar análisis técnico-económicos que determinen la viabilidad financiera de estas alternativas tecnológicas en la caficultura regional.

AGRADECIMIENTOS

A la universidad EIA y a Minciencias por financiar este trabajo en el marco del proyecto “VALUING VARIABILITY IN THE COLOMBIAN ELECTRICITY MARKET/VALORANDO LA VARIABILIDAD EN EL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO – Código EIA: CF12020005”, aprobado en la convocatoria No. 852-2019 del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

REFERENCIAS

Adeh, E. H., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. PLOS ONE, 14(11), e0203256.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO.

Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. Nature Sustainability, 2(9), 848-855.

Carr, M. K. V. (2001). The water relations and irrigation requirements of coffee. Experimental Agriculture, 37(1), 1-36.

Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 299-308.

Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J. M., Dejean, C., & Belaud, G. (2018). Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. Agricultural Water Management, 208, 440-453.

IDEAM. (2019). Atlas climatológico de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L., & Rodríguez-Iturbe, I. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress - II. Probabilistic soil moisture dynamics. Advances in Water Resources, 24(7), 707-723.

Muñoz, E. (2019). Soil moisture dynamics in water- and energy-limited ecosystems [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de Colombia.

Rodríguez-Iturbe, I., Porporato, A., Laio, F., & Ridolfi, L. (1999). Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress - I. Scope and general outline. Advances in Water Resources, 23(7), 695-705.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Del plástico al combustible: evaluando el potencial energético de la pirólisis en dos etapas

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

From plastic to fuel: evaluating the energy potential of two-stage pyrolysis

Laura D. Mila S.[1,2]*, Stéphane Godbout[2], Simon Barnabé[1] and Joahnn Palacios[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Aceite pirolítico
Combustible alternativo
PEBD
Pirólisis
Polipropileno

La creciente generación de residuos plásticos a nivel mundial ha impulsado la búsqueda de alternativas innovadoras de reciclaje y la mejora de las tecnologías existentes. Entre ellas, la pirólisis se destaca como un proceso de reciclaje químico con alto potencial para la obtención de combustibles alternativos. En este estudio se evaluó la pirólisis de polietileno de baja densidad (PEBD) virgen, desechos de tubos del cultivo de miel de maple (DTCM) y polipropileno (PP) en un sistema de dos etapas compuesto por un reactor de tornillo sin fin y un reactor discontinuo conectados en serie. El objetivo fue examinar el desempeño de esta tecnología y comparar los rendimientos entre materiales vírgenes y residuales. Además, se determinó el poder calorífico de los aceites generados. Los resultados indicaron rendimientos de aceite pirolítico del 17% para el PEBD virgen, 3,6% para el DTCM y 4,9% para el DPP, con un poder calorífico promedio de 38,6 MJ. Estos hallazgos evidencian que el aceite pirolítico plástico posee un alto valor energético y podría utilizarse como sustituto de combustibles fósiles como gasolina o diésel. Sin embargo, se requiere optimizar el proceso para mejorar los rendimientos de producción.

ABSTRACT

Keywords:
Pyrolytic oil
Alternative fuel
LDPE
Pyrolysis
Polypropylene

The growing generation of plastic waste worldwide has driven the search for innovative recycling alternatives and the improvement of existing technologies. Among these, pyrolysis stands out as a chemical recycling process with high potential for obtaining alternative fuels. This study evaluated the pyrolysis of virgin low-density polyethylene (LDPE), maple syrup production waste (MSPW), and polypropylene (PP) in a two-stage system consisting of a screw reactor and a batch reactor connected in series. The objective was to examine the performance of this technology and compare the yields between virgin and waste materials. In addition, the calorific value of the oils generated was determined. The results indicated pyrolytic oil yields of 17% for virgin LDPE, 3.6% for DTCM, and 4.9% for PP, with an average calorific value of 38.6 MJ. These findings show that plastic pyrolytic oil has high energy value and could be used as a substitute for fossil fuels such as gasoline or diesel. However, the process needs to be optimized to improve production yields.

[1]Universidad de Québec en Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada
[2]Instituto de Investigación y Desarrollo Agroambiental - IRDA, Québec, Qc, Canada
*Corresponding author: laura.mila-saavedra@irda.qc.ca

CC BY NC SA

Desde 1950, la producción mundial de plásticos ha aumentado de forma sostenida, alcanzando 348 millones de toneladas en 2017, principalmente polietileno, polipropileno y PVC. En setenta años se han generado cerca de 6.300 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales el 79% permanece en vertederos o ecosistemas marinos, mientras que las tasas de reciclaje son muy bajas ($\approx$9% en América del Norte) (Environment and Climate Change Canada, 2019; EPA, 2018). Esta acumulación representa un desafío ambiental debido a la persistencia del material y a la liberación de contaminantes durante su degradación (PlasticsEurope, 2018).

El cierre de las fronteras chinas a los desechos reciclables en 2018 agravó la crisis del reciclaje en Canadá, obligando a explorar alternativas más sostenibles (Radio-Canada, 2019). En este contexto, el reciclaje químico se presenta como una opción prometedora por su compatibilidad con plásticos mixtos, multicapa o contaminados, además de su potencial para reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Entre estas tecnologías, la pirólisis es un proceso termoquímico en ausencia de oxígeno (350–700 °C) que genera tres productos principales: fase líquida, gaseosa y un residuo sólido. Se considera favorable ambientalmente, pues permite la recuperación de energía y evita la contaminación hídrica (Anuar Sharuddin et al., 2016). Su rendimiento depende de variables como la temperatura, el tipo de reactor, el tiempo de residencia, el flujo de gas inerte y la composición del material (Campuzano et al., 2019).

En plásticos como el polietileno y el polipropileno, la pirólisis produce mayoritariamente **ceras**, con aplicaciones potenciales como materia prima para velas, aditivos plásticos o fuente de monómeros (Rentizelas et al., 2018). Aunque los reactores de lecho fluidizado han sido los más estudiados, los reactores de tornillo sinfín han mostrado ventajas significativas: capacidad para operar en distintos regímenes (rápido, intermedio y lento), diseño robusto y sencillo, posibilidad de construcción en unidades portátiles. Estas particularidades han despertado un creciente interés en profundizar su estudio para aplicaciones específicas en la valorización de residuos plásticos.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el rendimiento de un **reactor de tornillo sinfín en dos etapas**, orientado a la transformación de residuos plásticos agrícolas en aceite pirolítico.

MATERIALES Y MÉTODOS

La pirólisis convencional (PC) y la pirólisis en dos etapas (P2E) se realizaron en un mismo equipo diseñado por el IRDA y el CRIQ, ubicado en la granja experimental de Deschambault. El proceso de la P2E comienza en la tolva de alimentación de 1kg de capacidad, el plástico granulado es transportado a un reactor de precalentamiento (reactor de tornillo sinfin, donde las moléculas se activan térmicamente antes de pasar a un reactor discontinuo donde ocurre la reacción principal. El calentamiento se realizó mediante resistencias eléctricas (1500 W y 3300 W), con control de temperatura por termopares y registro de datos. Los vapores generados fueron arrastrados con nitrógeno hacia un sistema de condensación compuesto por tres condensadores, mientras que los gases no condensables se evacuaron con un extractor. La descripción a detalle de la unidad de pirolisis puede ser consultada en Álvarez-Chávez et al. (2019) et Brassard et al. (2017). La diferencia con el pirólisis convencional radica en la etapa y el lugar donde ocurre la reacción.

Una vez termina la reacción, el rendimiento de cada producto obtenido durante la pirolisis fue calculado con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$\textit{Rendimiento de la fracción liquida}\ (\%L) = (M_1 * 100)/M_t \quad (1)$$

$$\textit{Rendimiento de la fracción solida}\ (\%S) = (M_2 * 100)/M_t \quad (2)$$

$$\textit{Rendimiento de gases no condensables}\ (\%G) = 100-(\%L+\%S) \quad (3)$$

Donde, Mt = masa total del plástico [g], $M1$ = masa del líquido recolectado [g] y $M2$ = masa del residuos o carbón colectado [g].

Diseño Experimental

Se realizaron seis ensayos, con tres repeticiones por configuración (PC, P2E con solo 2 condensadores) con gránulos de polietileno de baja densidad (PEBD) virgen. En la pirólisis en dos etapas, la temperatura del primer reactor se fijó en 300 °C para activar las moléculas sin degradarlas, mientras que el segundo reactor operó a 550 °C para reducir la formación de ceras y

gases no condensables. En la pirólisis convencional, la temperatura del tornillo sin fin fue de 550 °C y la del depósito de carbón de 200 °C. El sistema de condensación funcionó a temperatura ambiente (22–28 °C). Las condiciones operativas incluyeron 230 g de material, una velocidad de alimentación de 2 g/min y un flujo de nitrógeno de 5 ml/min.

Seis ensayos adicionales con la P2E fueron realizados con los tubos desechados provenientes del cultivo de la miel de maple (DTCM) donde su material de base es el PEBD y desechos de polipropileno (DPP) otorgados por la empresa Environek. Se realizaron análisis calorimétricos, de pH y de contenido de cenizas en los aceites pirolíticos obtenidos.

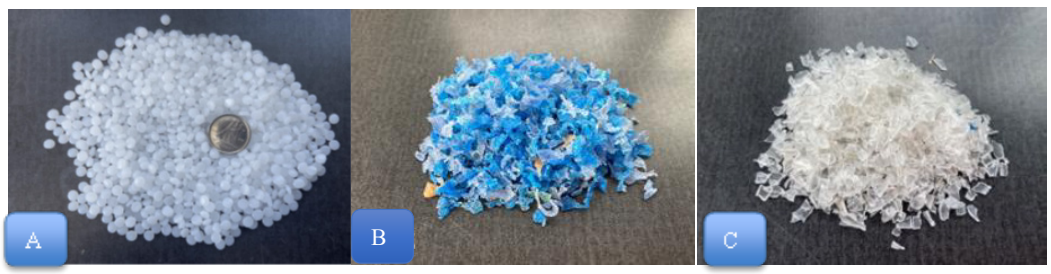


Figura 2. Tipos de plásticos utilizados en el estudio. A – Polietileno de baja densidad virgen, B – Desechos de los tubos del cultivo de miel de maple, C – Desechos de polipropileno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra el rendimiento de los productos derivados de la pirólisis del PEBD virgen (residuo en el contenedor de carbón, cera o aceite y gas no condensable) para cada ensayo realizado. Los resultados de los análisis de laboratorio (poder calorífico, contenido en cenizas y pH) del líquido pirolítico procedente de la pirólisis convencional y en dos etapas con dos condensadores.

Tabla 1. Análisis descriptivo por los ensayos de la pirolisis convencional y en dos etapas.

	Pirolisis convencional		Pirolisis en dos etapas	
Características	**Promedio**	**D. Estándar**	**Promedio**	**D. Estándar**
Residuos en el contenedor de carbón (%)	21	-	1	0
Cera (%)	44	1,15	-	-
Liquido pirolítico	-	0,57	17	2,56
Gases no condensables	35	1,34	82	2,66
Poder calorífico (MJ/kg)	-	-	38,6	0,2
Cenizas (%)	-	-	26,5	1,79
pH	-	-	6,1	1,21

La Tabla 2 muestra los rendimientos de los productos obtenidos durante la pirolisis de los DTCM y de DPP, así como los resultados de poder calorífico, cenizas y pH del líquido pirolítico para cada tipo de plástico.

En la pirólisis convencional, la baja energía vibratoria de las moléculas limita la ruptura de los enlaces C–C, favoreciendo la formación de ceras (C7–C22). En cambio, la pirólisis en dos etapas (P2E) aumenta esta energía y permite una descomposición más completa, generando más líquido pirolítico.

Con PEBD virgen, el rendimiento promedio fue del 17%, mientras que en residuos DTCM y DPP no superó el 5% (en el caso del DTCM, debido a su composición heterogénea). En general, la P2E produjo más gases no condensables.

Los aceites pirolíticos de P2E alcanzaron un poder calorífico de 38,5 MJ/kg, cercano al de la gasolina (42,5 MJ kg^{-1}) y el diésel (43 MJ kg^{-1}), y superior al mínimo exigido para biocombustibles (>15 MJ kg^{-1}).

Tabla 2. Análisis descriptivo por los ensayos de la pirolisis en dos étapas con desechos plásticos.

	Desechos de tubos del cultivo de maple		Desechos de polipropileno	
Características	**Promedio**	**D. Estándar**	**Promedio**	**D. Estándar**
Residuos en el contenedor de carbón (%)	0,55	0,15	1,33	1,1
Liquido pirolítico	3,64	0,29	4,93	0,24
Gases no condensables	95,8	0,39	93,74	1,19
Poder calorífico (MJ/kg)	38,6	0,2	38,4	0,6
Cenizas (%)	13,9	3,2	11,1	2,4
pH	3	0,3	5	0,4

En cuanto al pH, el aceite de PEBD virgen se ajusta al rango del diésel (5,5–8), el del DPP es ligeramente inferior y el del DTCM es ácido y corrosivo, probablemente por agua residual tras su almacenamiento al aire libre.

CONCLUSIÓN

La pirólisis convencional genera aproximadamente un 44 % de cera. El concepto de pirólisis en dos etapas, que combina un reactor de tornillo sin fin y un reactor en lote conectados en serie, permite obtener un líquido pirolítico a partir de PEBD virgen con un rendimiento promedio del 17 % respecto a la masa de plástico inicial. Para los residuos de tubos de cultivo de maple y polipropileno (PP), la pirólisis en dos etapas genera un líquido pirolítico con un rendimiento promedio del 3,6 % y 4,9 % del plástico procesado, respectivamente. El aceite pirolítico obtenido posee un buen potencial energético y podría emplearse como fuente de energía. No obstante, es necesario incrementar significativamente los rendimientos de producción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a los socios y organismos de financiación que han hecho posible la realización de este estudio: Groupe RCM, Innofibre, Environek y Mitacs Accélération.

REFERENCIAS

Álvarez-Chávez, B. J., Godbout, S., le Roux, É., Palacios, J. H., & Raghavan, V. (2019). Bio-oil yield and quality enhancement through fast pyrolysis and fractional condensation concepts. Biofuel Research Journal, 6(4), 1054–1064. https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.4.2

Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. In Energy Conversion and Management (Vol. 115, pp. 308–326). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037

Brassard, P., Godbout, S., Raghavan, V., Palacios, J. H., Grenier, M., & Zegan, D. (2017).The production of engineered biochars in a vertical auger pyrolysis reactor for carbon sequestration. Energies, 10(3). https://doi.org/10.3390/en10030288

Campuzano, F., Brown, R. C., & Martínez, J. D. (2019). Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 102, pp. 372–409). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014

Environment and Climate Change Canada. (2019). Economic study of the Canadian plastic industry, markets and waste: summary report.

EPA. (2018). Plastics: Material-Specific Data | US EPA. https://www.epa.gov/facts-andfigures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data

PlasticsEurope. (2018). Plastics-the Facts 2018 An analysis of European plastics production, demand and waste data.

Radio-Canada. (2019). Le Canada exporte toujours des tonnes de déchets de plastique en Asie | Radio-Canada.ca. https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1179308/recyclagefox-plastic-ballots-tri-usage-unique

Rentizelas, A., Shpakova, A., & Mašek, O. (2018). Designing an optimised supply network for sustainable conversion of waste agricultural plastics into higher value products. Journal of Cleaner Production, 189, 683–700. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.104

EJE TEMÁTICO 5
Construcciones rurales, biolimática, y medio ambiente



http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Análise geoestatística da temperatura do solo em culturas de café sob diferentes tipos de cobertura

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Geostatistical analysis of soil temperature in coffee crops under different types of cover

Santiago Velásquez Rubio[1], Elias Horácio Zavala[1], Edna Jeraldy Suarez Cardozo[1] and Gabriel Araújo e Silva Ferraz[1]

Palabras clave:
Krigagem ordinária
Semivariogramas
Termografia aérea com RPA

RESUMO

Na agricultura de precisão, a geoestatística é uma ferramenta chave para descrever padrões espaciais e apoiar decisões. Este estudo teve como objetivo mapear e analisar a temperatura do solo em cafezais sob diferentes coberturas por meio de krigagem ordinária. Imagens térmicas foram obtidas com um RPA DJI Mavic 3T ao longo de quatro meses de 2024 em uma área cafeeira com 0,36 ha e cultivada com as cultuvares Arara e Mundo Novo; ajustaram-se semivariogramas com o método dos mínimos quadrados ordinários e ajuste esférico, esponencial e gaussiano e assim geraram-se mapas interpolados de predição e de erro-padrão para as quatro datas em estudo. Observou-se predominância do modelo esférico, com alcances em torno de 26,5–27,9 m. Os mapas indicaram temperaturas mais altas em solo descoberto e em talhões com a variedade Arara, enquanto a cobertura vegetal atenuou o aquecimento. Os erros de predição foram menores em zonas homogêneas e maiores em áreas expostas. Conclui-se que a abordagem geoestatística orienta a escolha de coberturas e o manejo de sombreamento e conservação do solo.

Keywords:
Ordinary kriging
Semivariograms
Aerial thermography with RPA

ABSTRACT

In precision agriculture, geostatistics is a key tool for describing spatial patterns and supporting decisions. This study aimed to map and analyze soil temperature in coffee plantations under different cover crops using ordinary kriging. Thermal images were acquired with a DJI Mavic 3T RPA over four months in 2024 in a 0.33-ha coffee area cultivated with the Arara and Mundo Novo cultivars. Semivariograms were adjusted using the ordinary least squares method and spherical, exponential, and Gaussian adjustments, generating interpolated prediction and standard error maps for the four study dates. The spherical model predominated, with ranges of approximately 26.5–27.9 m. The maps indicated higher temperatures in bare soil and in plots planted with the Arara variety, while the vegetation cover attenuated the warming. Prediction errors were smaller in homogeneous zones and larger in exposed areas. It is concluded that the geostatistical approach guides the choice of cover and the management of shading and soil conservation.

[1]Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras: santiago.rubio@estudante.ufla.br; elias.zavala@estudante.ufla.br ; edna.cardozo@estudante.ufla.br; gabriel.ferraz@ufla.br

CC BY NC SA

A temperatura do solo é crucial para a produtividade agrícola, especialmente em culturas sensíveis como o café, pois afeta processos essenciais como germinação, crescimento das raízes e mineralização de nutrientes (Onwuka, 2016). Estudos indicam que a cobertura do solo, seja por vegetação ou materiais sintéticos, pode alterar significativamente a temperatura, controlando as ondições ambientais (Snyder et al., 2015). Coberturas plásticas e vegetais são usadas para mitigar flutuações térmicas e melhorar a retenção de umidade, principalmente em regiões de clima quente (Hidayat et al., 2024). A geoestatística, com a krigagem ordinária, é uma ferramenta valiosa para modelar a variabilidade espacial da temperatura do solo, considerando anisotropia e dependência espacial (Scalon, 2024). O objetivo deste estudo é analisar a variabilidade espacial da temperatura do solo em cultivos de café sob três tipos de cobertura, utilizando krigagem ordinária.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada uma análise geoestatística para avaliar a distribuição espacial da temperatura do solo em cafeeiros sob três tratamentos: convencional (sem cobertura), cobertura viva (vegetal) e cobertura de lona (polietileno). O estudo foi desenvolvido na estação de pesquisa agrícola do Setor de Cafeicultura, do Departamento de Agricultura (DAG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, Brasil. O talhão possui 0,36 ha na qual foram analisados seis linhas de cultivo, dispostas paralelamente. As variedades foram organizadas em dois blocos contíguos: as três linhas do setor nordeste correspondem à variedade Mundo Novo, enquanto as três linhas do setor sudoeste correspondem à Arara. Os tratamentos de cobertura foram aplicados em faixas longitudinais paralelas às linhas de plantio e atravessam todas as seis linhas, permitindo comparação entre variedades dentro do mesmo gradiente.

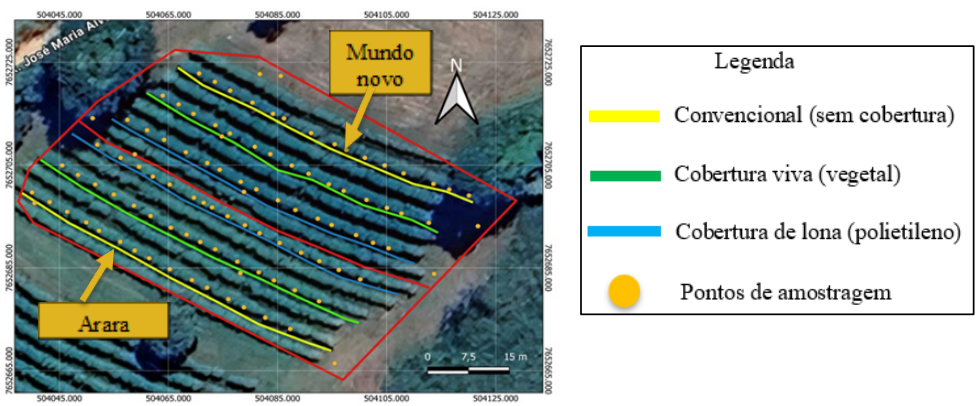


Figura 1. Mapa da zona de estudo.

Fizeram-se quatro voos mensais de captura de imagens térmicas os dias 14/06/2024, 18/07/2024, 8/08/2024, 11/09/2024, com temperaturas ambientais variando de 24°C a 35°C. A captura de dados térmicos foi realizada com o RPA DJI Mavic 3T Enterprise, equipado com uma câmera RGB de 20 MP e câmera térmica com faixa de medição de -20°C a 500°C e precisão de ±2°C. As imagens foram processadas no software Pix4Dmapper, gerando um ortomosaico representativo da distribuição da temperatura do solo. A coleta de dados foi feita por amostragem sistemática, com 100 pontos de amostragem georreferenciados no ortomosaico. As medições de temperatura foram extraídas usando o QGIS 3.36.1.

Na análise geoestatística, foi aplicada a krigagem ordinária no R 4.5.0, utilizando o pacote geoR, para modelar a variabilidade espacial da temperatura do solo. Seguindo a metodologia de Scalon (2024), foi feita uma análise exploratória dos dados, que não apresentaram tendência, permitindo o uso da krigagem. Em seguida, foi realizada uma análise de dependência espacial com semivariogramas, considerando anisotropia com uma direção de 135° e ajustando o modelo teórico esférico, esponencial e gaussiano para estimar parâmetros como efeito pepita, patamar, contribuição e alcance. A krigagem foi realizada com grade de interpolação de 0,1 x 0,1 metros, gerando mapas espaciais e mapas de

erro preditivos, fornecendo dados sobre a precisão do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise geoestatística mostram a variabilidade espacial da temperatura do solo sob diferentes coberturas em cultivos de café. Na Tabela 1, o modelo esférico predominou nas datas de 14/06 e 11/09, com melhor ajuste aos dados. Em 08/08, o modelo gaussiano apresentou maior coeficiente de pepita (15,93%), indicando maior erro experimental ou variabilidade em pequenas escalas espaciais. A amplitude dos semivariogramas variou entre 26,51 e 27,89 metros, refletindo o alcance das observações correlacionadas. A Figura 2 exibe os semivariogramas gerados para cada mês.

Tabela 1. Parâmetros do semivariograma ajustados para diferentes datas.

Data	Modelo	Soma dos mínimos quadrados	Parâmetros do Semivariograma					
			Efeito Pepita (ºC²)	Coeficiente de Pepita	Patamar (ºC²)	Contribuição (ºC²)	Alcance prático (m)	Alcance teórico (m)
14/06/2024	Esférico	7,97	0,34	1,29%	26,37	26,03	27,89	27,89
18/07/2024	Exponencial	12,62	0,52	6,60%	7,88	7,36	26,51	8,85
8/08/2024	Gaussiano	15,51	1,28	15,93%	8,06	6,77	27,84	16,08
11/09/2024	Esférico	9,21	2,08	14,42%	14,45	12,36	26,97	26,97

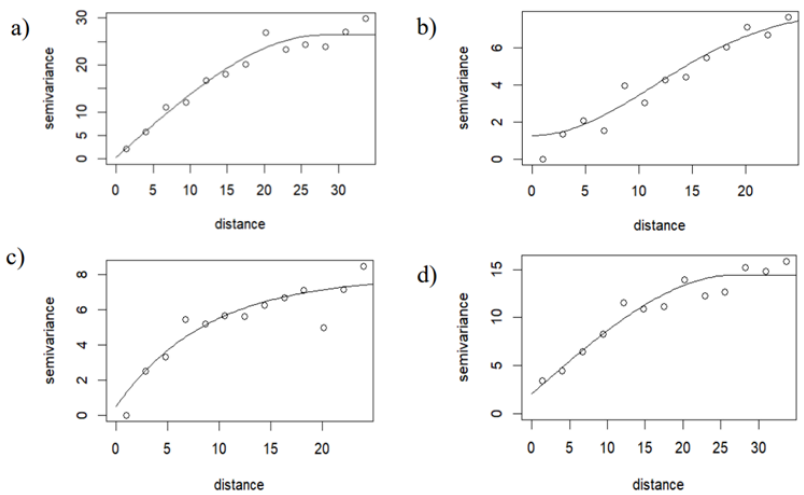


Figura 2. Semivariogramas para os dados de temperatura do solo sob diferentes coberturas nos meses de: a) junho, b) julho, c) agosto e d) setembro.

Os mapas de temperatura do solo obtidos por krigagem ordinária (Figura 3) evidenciaram um gradiente térmico nítido, com valores mais elevados no solo descoberto e nas áreas sob a variedade Arara. A krigagem mostrou-se adequada para captar variações locais e transições térmicas, gerando superfícies contínuas de alta resolução e coerentes com a literatura recente (Almeida et al. 2024). Em meses de maior radiação, as coberturas vegetais atenuaram o aquecimento do solo, reduzindo a amplitude e os picos de temperatura, ao passo que a cobertura convencional e a lona exibiram maiores oscilações. A comparação entre Arara e Mundo Novo indicou maior variabilidade térmica associada à Arara; tal comportamento é compatível com a menor densidade de copa dessa variedade, que aumenta a exposição à radiação e o aquecimento do solo, em concordância com evidências de que maior sombreamento reduz a temperatura e amortiza extremos térmicos (Getachew et al. 2022).

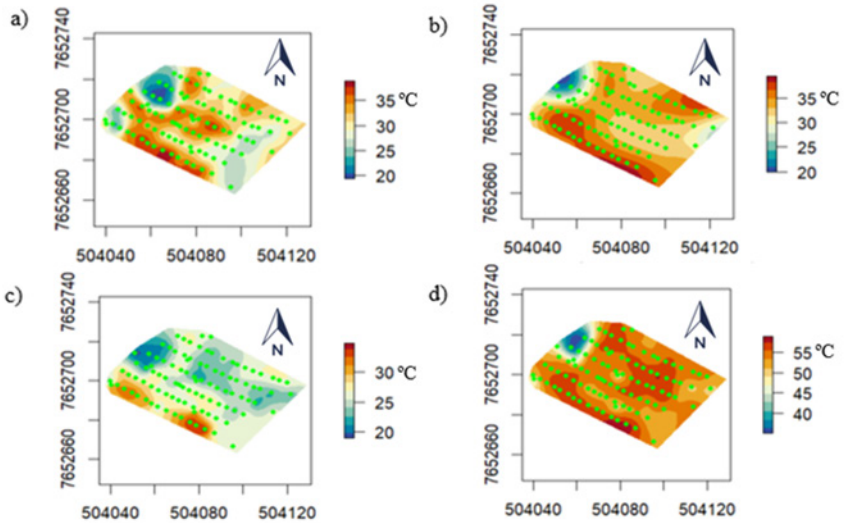


Figura 3. Mapas da distribuição espacial da temperatura do solo estimada por krigagem ordinária sob diferentes coberturas para os meses de: a) junho, b) julho, c) agosto e d) setembro.

Os erros-padrão de predição (Figura 4) obtidos pela krigagem ordinária foram menores nas porções mais homogêneas e com maior continuidade espacial, indicando bom ajuste do modelo. Os maiores valores concentraram-se nas áreas mais expostas (solo descoberto e talhões com Arara) onde a instabilidade térmica e as transições abruptas elevam a incerteza. Esse padrão é consistente com a evidência de que a heterogeneidade do solo e as variações microclimáticas aumentam a incerteza dos estimadores geoestatísticos, sobretudo sob grandes gradientes térmicos (Usowicz & Lipiec 2017).

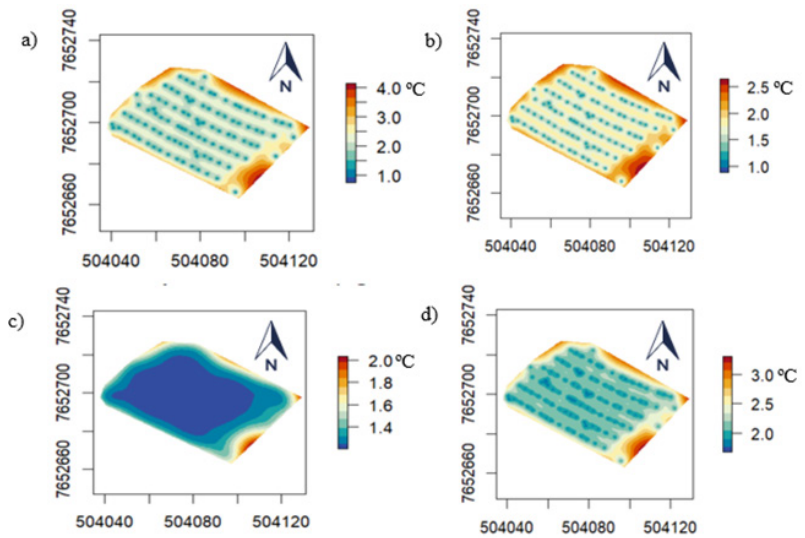


Figura 4. Mapas dos erros padrão de predição da krigagem ordinária para os meses de: a) junho, b) julho, c) agosto e d) setembro.

CONCLUSÕES

A geoestatística se mostrou uma ferramenta eficaz para analisar a variabilidade espacial da temperatura do solo em cultivos de café, permitindo modelar com precisão as flutuações térmicas associadas aos diferentes tipos de cobertura. Através da krigagem ordinária, foi possível identificar padrões espaciais detalhados, mostrando como as coberturas vegetais e de lona influenciam as

condições térmicas do solo. Os mapas de erro gerados indicaram maior precisão nos meses com menor variabilidade térmica, evidenciando a utilidade dessa abordagem para otimizar o manejo agronômico, como a escolha de coberturas adequadas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Núcleo de Estudos em Sistemas Agrícolas (NESA), ao CNPq (Processo nº 310186/2023-4), à FAPEMIG (Processo nº APQ-00661-22) e à CAPES pelo apoio financeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e à Universidade Federal de Lavras pelo apoio acadêmico e institucional.

REFERÊNCIAS

Almeida, T. A. B., Montenegro, A. A. A., da Silva, R. A. B., de Lima, J. L. M. P., de Carvalho, A. A. & da Silva, J. R. L. 2024. Evaluating Daily Water Stress Index (DWSI) Using Thermal Imaging of Neem Tree Canopies under Bare Soil and Mulching Conditions. Remote Sensing 16(2782), 1–22.

Getachew, M., Verheyen, K., Tolessa, K., Ayalew, B., Hylander, K., Tack, A., Garedew, W., Bauters, M., Boeckx, P. & De Frenne, P. 2022. Shade tree canopy cover affects coffee plant traits across elevations in coffee farms in southwest Ethiopia. Nordic Journal of Botany 2022, e03383.

Hidayat, F., Zaitun, Z., Mayani, N., Erika, C., Halim, A. & Alhafiz, P. 2024. The effect of tree shading on soil temperature at Arabica coffee plantation (*Coffea arabica* L.). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1297, 012029.

Scalon, J. D. 2024. Análise de dados espaciais com aplicações em R. Editora da Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.

Snyder, K., Grant, A., Murray, C. & Wolff, B. 2015. The effects of plastic mulch systems on soil temperature and moisture in central Ontario. HortTechnology 25(2), 162–170.

Usowicz, B. & Lipiec, J. 2017. Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. Soil & Tillage Research 174, 241–250.

Onwuka, B. M. 2016. Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth. Scholarly Journal of Agricultural Science 6(3), 89–93

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Simulación fluidodinámica de ventilación natural de construcciones rurales mediante el uso de mesa de agua

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Fluid-dynamic simulation of natural ventilation in rural buildings using a water table method

Robinson Osorio Hernández[1]*, Giovanni Andrés Cortés Tovar[1] and Daniel Fernando Diaz Coy[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Bioclimática
Confort
Envolvente del edificio
Estrategias bioclimáticas pasivas

El alto gasto energético de las edificaciones incluyendo las rurales, hace necesario buscar alternativas de optimización principalmente de climatización, una de las mejores formas mediante un adecuado manejo de la ventilación natural de las construcciones, para esto es necesario desarrollar y utilizar tecnologías que permitan modelar las corrientes de aire. La mesa de agua es una herramienta de simulación de la fluidodinámica del aire, haciendo una modelación cualitativa y visible del comportamiento de la ventilación dependiendo de las diversas configuraciones geometricas de las edificaciones, ajustándose a un comportamiento real de la fluidodinámica del aire. En el Laboratorio de Bioclimática Aplicada en Biosistemas de la Universidad Nacional de Colombia se construyó un modelo de la mesa de agua, en la que se realizaron diferentes simulaciones de construcciones rurales, que mostraron la validéz de la simulación física de la ventilación natural en instalaciones de uso productivo rural.

ABSTRACT

Keywords:
Bioclimátic
Comfort
Building envelope
Passive bioclimatic strategies

The high energy consumption of buildings, including rural ones, necessitates the pursuit of optimization alternatives, primarily for air conditioning. One of the most effective ways to achieve this is through the proper management of natural ventilation in buildings. To achieve this, it is necessary to develop and use technologies that allow air current modeling. The water table is a tool for simulating air fluid dynamics, providing qualitative and visible modeling of ventilation behavior depending on the various geometric configurations of buildings, adjusting it to real-life air fluid dynamics. A water table model was constructed in the Applied Bioclimatics on Biosystems Laboratory from the Universidad Nacional de Colombia. Various simulations of rural buildings were performed on the table, demonstrating the validity of physical simulation of natural ventilation in facilities used for rural productive purposes.

[1]Depto de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
[2]Depto de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
*Corresponding author: correo: rosorioh@unal.edu.co

CC BY NC SA

A nivel mundial el gasto energético de los de los edificios representa un 30%, principalmente asociado a la climatización de los mismos, por lo que se hace necesario el uso de diferentes estrategias climatización pasiva (Ghalam et al. 2021). Uno de los mayores desafíos en el diseño de edificios es optimizar el uso de energía natural para proporcionar confort humano (Srisamranrungruang and Hiyama 2020), vegetal y animal, y las condiciones adecuadas para los diferentes procesos agroindustriales, con el fin de minimizar, e incluso suprimir el uso de máquinas y energía para climatización. Por lo anterior, en las edificaciones, especialmente rurales, es importante adoptar medidas que permitan alcanzar un balance entre el confort térmico y la eficiencia energética, y la ventilación natural puede ayudar a alcanzar este objetivo sin los gastos económicos y energéticos que acarrea un sistema de ventilación mecánica (Ikegami-Rolim 2015).

Sin embargo su inadecuado diseño y aplicación puede llegar a convertir la ventilación cruzada en una fuente desfavorable y generadora de contaminación causada por factores tanto externos como internos del recinto, debido a que existen fuentes contaminantes en el exterior que ingresan, junto con la contaminación generada en el interior de las instalaciones como altos niveles de vapor caliente de instalaciones agroindustriales, CO2, CO, NH_3, H_2S en instalaciones animales, vapores combustibles y polvo explosivo en parques de maquinaria, exceso de O_2 en invernaderos entre otros, incluyendo la posibilidad de presencia elevada de contaminantes biológicos, donde la renovación de aire no es suficiente (Ikegami-Rolim 2015).

Existen diversas herramientas para evaluar y predecir el comportamiento de la ventilación natural, como programas de simulación computacional basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), modelos analíticos, y modelos experimentales en túnel de viento y mesa de agua (Luiza et al. 2022).

La mesa de agua, también llamada mesa de Navier Stokes, es una herramienta para realizar simulaciones experimentales de fluidodinámica de manera simplificada y práctica en dos dimensiones, donde se utiliza agua como elemento de similitud de aire en movimiento. Las ventajas de la mesa de agua consisten en: baja demanda de espacio físico, facilidad de operación y mantenimiento del equipo, posibilidad de cambio instantáneo de parámetros relacionados aberturas y velocidad del flujo, y posibilidad de documentación visual (Rossi et al. 2019).

El funcionamiento de la mesa de agua se basa en una recirculación de agua mezclada con un indicador por el área de prueba a una velocidad dada, simulando líneas de flujo de aire, colocando sobre ella modelos a escala de diferentes tipos de edificaciones (Luiza et al. 2022). Con este estudio se busca mostrar el uso de la mesa de agua aplicada al campo investigativo del área de bioclimática aplicada en construcciones rurales, específicamente al estudio de ventilación natural, y análisis fluidodinámico del aire en el ambiente construido.

MATERIALES Y MÉTODOS

El equipo utilizado para este trabajo fue la mesa de agua perteneciente al Laboratorio de Bioclimática Aplicada en Biosistemas de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, cuya área de prueba constituye una lámina de vidrio horizontal con una pendiente del 1%, sobre la cual el agua fluye a una velocidad dada, representando la dirección del viento. Para su funcionamiento, la mesa de agua utiliza agua acumulada en los dos tanques conectados por una bomba hidráulica para circular agua de un tanque a otro realizando ciclos.

Para la simulación fluidodinámica se utilizaron diversas geometrías de instalaciones: invernadero tipo túnel, beneficiadero de café, vivienda rural y trapiche panelero, teniendo en cuenta los planos bidimensionales, si fueran plantas (vivienda rural) o cortes transversales de modelos a escala (invernadero, beneficiadero de café y trapiche panelero). Para realizar las pruebas se agregó un indicador al agua, para este caso detergente líquido, con el objetivo de generar microburbujas, y generar líneas de flujo (Xavier et al. 2020).

Para la elaboración de los modelos se utilizó la impresora 3D referencia Flashforge Adventurer 4. Los modelos impresos se elaboraron teniendo en cuenta el corte transversal de las instalaciones a escala .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observa una planta arquitectonica de una vivienda rural, con 4 diferentes orientaciones con respecto a la dirección del viento, como el flujo del aire varia con respecto a las diferentes orientaciones. Esto resulta relevante, debido a la necesidad de diseño de ventilación ajustado a las condiciones locales, y a los requerimientos de cada caso, por ejemplo, en clima cálido es interesante aumentar la tasa de ventilación para ayudar en la reducción de temperatura, mientras que en clima frío, el movimiento del aire genera una sensación de menor temperatura, lo que genera incomodidad en las personas.



a) b) c) d)

Figura 1. Planta arquitectonica de vivienda rural con 4 diferentes orientaciones con respecto a la dirección del viento.

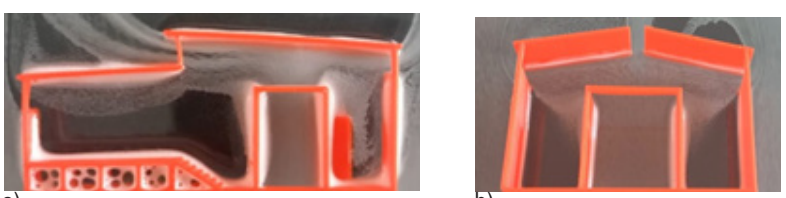
En la Figura 2 se observa un corte de un invernadero tipo capilla con su abertura orientada hacia la dirección del viento Figura2a y contraria a la misma Figura 2b, y el efecto de rugosidad que ofrecen las camas de las plantas sobre el flujo de aire cerca a la superficie. En el caso a) se observa que la abertura cenital está funcionando como entrada de aire, lo que dificulta la salida del aire caliente y humedo del invernadero. Por otra parte, el caso b), muestra que se genera una succión, lo que optimiza la extracción de aire de la ventana cenital. En la Figura 3 se



a) b)

Figura 2. Corte arquitectonico de invernadero tipo capilla con 2 diferentes orientaciones con respecto a la dirección del viento.

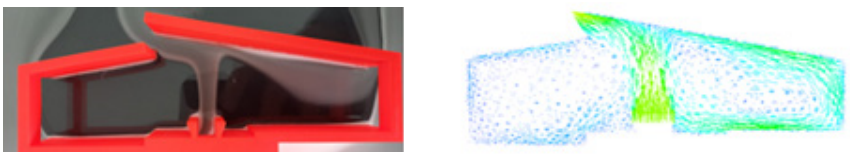
observa el corte arquitectonico de dos beneficiaderos de café. En la Figura 3a, cubierta a dos aguas discontinua con ventana cenital alejada del silo secador, que la emisión del silo busca salida lo que obliga al flujo a distribuirse en la instalación, y generando flujos que pueden llegan al nivel de los trabajadores y del producto. Esto puede generar no solo condiciones de estrés térmico de los tranajadores, también, condiciones inadecuadas para el producto (aire calido y húmedo). Por otra parte, en la Figura 3b, cubierta a dos agua, con ventana cenital sobre silo secador, se observa que el aire puede salir con facilidad, debido a la próximidad de la abertura cenital y la ayuda de las ventana laterales, lo que optimiza la ventilación natural y genera condiciones adecuadas para los trabajadores



a) b)

Figura 3. Corte arquitectonico de dos beneficiaderos de café (a) cubierta a dos aguas discontinua con ventana cenital alejada del silo secador, y (b) cubierta a dos agua, con ventana cenital sobre silo secador.

y el producto. En la Figura 4 se observa una simulación fluidodinámica de trapiche panelero en mesa de agua (Figura 4a), y del campo vectorial CFD (Figura 4b), en el cual se puede observar la similitud entre el modelo físico y el modelo computacional. Teniendo en cuenta que la mesa de agua no requiere de conocimientos previos de simulación, ni licencias, esta se presenta como una excelente herramienta de enseñanza e investigación, no solo con aplicaciones en la ventilación natural de edificaciones, también en otras áreas donde se aplica la fluidodinámica como en la mecánica de fluidos, entre otras áreas.



a) b)

Figura 4. Simulación fluidodinámica de trapiche panelero, a) en mesa de agua, y b) campo vectorial CFD

CONCLUSIÓN

La mesa de agua es un equipo de laboratorio que no requiere de conocimientos previos de simulación, ni licencias, es una excelente herramienta de enseñanza e investigación, no solo con aplicaciones en la ventilación natural de edificaciones rurales como invernaderos, plantas de poscosecha, vivienda rural entre otros, también es aplicable en otras áreas de la fluidodinámica como en la mecánica de fluidos, entre otras áreas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia, por su apoyo mediante los proyectos: Mesa de agua para la simulación de fluidodinámica aplicada a la ventilación natural en edificaciones rurales (código: 49008), y Centro de excelencia (CE) para la innovación en mecanización y opciones energéticas para la agricultura familiar (código: 52937).

REFERENCIAS

Ghalam NZ, Farrokhzad M, Nazif H (2021) Investigation of optimal natural ventilation in residential complexes design for temperate and humid climates. Sustainable Energy, Grids and Networks 27:100500. https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100500

Ikegami-Rolim AC (2015) A mesa d'água como ferramenta didática para o estudo qualitativo da ventilação natural no ambiente construído. Universidade de São Paulo

Luiza M, Geraldini S, Rossi MM, Lukiantchuki MA (2022) Analysis of opening parameters for the natural ventilation of classrooms

Rossi MM, Vale FI, Shimomura APR, Chvatal KMS (2019) A mesa d' água como ferramenta de apoio para a caracterização de um modelo genérico a ser ensaiado em túnel de vent. Revista IPT| Tecnologia e Inovação 2:70–80

Srisamranrungruang T, Hiyama K (2020) Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF). Energy Build 210:. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109765

Xavier AC de A, Gularte IH, Mizgier MO, Lukiantchuki MA (2020) Visualização da ventilação natural em ensaios na mesa d´´água comparado a simulações computacionais. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção 11:e020020. https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8656954

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Heliodón como herramienta bioclimática en diseño para eficiencia energética rural

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Heliodon as a bioclimatic tool in rural energy efficiency design

Jahir Gualdrón Cáceres[1] and Héctor Fabio Chaparro Fontalvo[1]*

RESUMEN

Palabras clave:
Bioclimática
Construcciones rurales
Heliodón
Radiación solar
Sol-aire
Temperatura

Se empleó un prototipo de heliodón de 1,2 m de diámetro como herramienta de análisis bioclimático en la fase de diseño de construcciones rurales, evaluando su aplicabilidad en tres maquetas: una marquesina para secado de café, un galpón avícola y una vivienda rural. Las maquetas fueron diseñadas en CAD e impresas en 3D con material PLA. Se midieron variables de radiación solar, temperatura ambiente, luminosidad y temperatura superficial mediante sensores especializados y cámara termográfica. Los resultados muestran que el heliodón permite determinar la temperatura sol-aire con un error menor al 9,7%. Asimismo, se identificó que la orientación Este-Oeste presenta mayor captación de iluminancia (valores entre 2907–3268 Lux). La metodología empleada aporta al diseño bioclimático y a la planificación energética de construcciones rurales, favoreciendo la eficiencia térmica y el confort ambiental desde la etapa de concepción arquitectónica.

ABSTRACT

Keywords:
Bioclimatic
Heliodon
Rural buildings
Solar radiation
Sun-air
Temperature

A 1,2 m diameter heliodon prototype was used as a bioclimatic analysis tool in the design phase of rural constructions, assessing its applicability in three models: a coffee drying canopy, a poultry house, and a rural dwelling. Models were designed in CAD and 3D printed in PLA material. Solar radiation, air temperature, luminosity, and surface temperatures were measured using specialized sensors and a thermal camera. Results indicate that the heliodon can determine sun-air temperature with an error lower than 9,7%. Furthermore, East-West orientation showed the highest luminance (2907–3268 Lux). This methodology supports bioclimatic design and energy planning of rural buildings, improving thermal efficiency and environmental comfort from the early design stage.

[1]Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Agrícola, Bogotá, Colombia. Correo: jgualdron@unal.edu.co; hchaparrof@unal.edu.co
*Corrresponding author: hchaparrof@unal.edu.co

ISSN 0304-2847 / e-ISSN 2248-7026

CC BY NC SA

El sector de la construcción es responsable de cerca del 40% de las emisiones globales de CO_2, lo que evidencia la necesidad de integrar criterios de sostenibilidad en el diseño arquitectónico (De Lassio et al., 2016). En el ámbito rural, se requieren soluciones pasivas y de bajo costo que mejoren la eficiencia energética y el confort térmico. En este contexto, el heliodón se ha consolidado como una herramienta de análisis bioclimático para estudiar la incidencia solar y orientar adecuadamente las edificaciones (Pajek et al., 2019; Quintero, 2019). Además, se ha reconocido su valor como recurso didáctico y de validación en la investigación y enseñanza (De Luca, 2022; Salgado-Conrado et al., 2022).

Este trabajo evalúa el uso de un heliodón automatizado en la etapa de diseño de construcciones rurales. Se plantea como hipótesis que su implementación permite identificar estrategias pasivas que incrementan la eficiencia energética y el confort térmico en este tipo de edificaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el laboratorio de bioclimática de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, utilizando un heliodón circular de 1,2 m de diámetro con arco de aluminio y lámpara incandescente (figura 1), tres modelos de construcciones rurales impresos en PLA mediante impresora 3D (figura 3), una cámara termográfica FLIR SYSTEMS i5 (figura 2-a), un medidor de estrés térmico TGBH modelo HT30 (figura 3-d), un medidor de intensidad lumínica UNIT-T UT383BT (figura 3-c) y un medidor de radiación solar modelo SM206-SOLAR (Figura 3-b).

Se evaluaron tres fechas representativas entre 2021 y 2024, en tres horarios (10:00, 13:00 y 17:00 horas). Se calcularon temperaturas sol-aire a partir de las ecuaciones [1] – [2].

El heliodón fue previamente calibrado con un obelisco para asegurar la exactitud de azimut y cénit, y las mediciones con techos de diferentes colores (blanco y rojo) se realizaron con el fin de validar el efecto de la absortividad. Acorde con Fernandes et al. (2014), debido a proyecciones de sombras en heliodones físicos, en los resultados se debe considerar la presencia de errores. En este estudio, el error se determinó a partir de la comparación entre las temperaturas sol-aire calculadas y las temperaturas superficiales medidas con la cámara termográfica.



Figura 1. Heliodón usado en el estudio

Datos obtenidos con los sensores.



a. Captura con la cámara termográfica FLIR SYSTEMS i5.



b. Toma con el sensor de radiación solar modelo SM206-SOLAR.

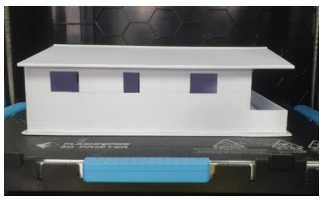


c. Medición de luminosidad con el sensor intensidad lumínica UNIT-T UT383BT.



d. Medición de estrés térmico TGBH modelo HT30.

Figura 2. Ejemplo de resultados obtenidos con los diferentes sensores de medición utilizados en el heliodón para la simulación bioclimática.



a. Ensamble desmontable de la vivienda rural.



b. Techo de vivienda rural en PLA rojo.



c. Estructura para producción avícola.

Figura 3. Ejemplos de diseños estudiados con el Heliodón.

Para el cálculo de la temperatura sol-aire (TSA) se aplicó la ecuación:

$$TSA = \alpha * I * RSE \quad (1)$$

y

$$T_{superficie} = T_{aire} + T_{sol-aire} \quad (2)$$

Donde; TSA: Temperatura sol-aire [°C], α: Absortividad, I: Radiación solar [W*m^{-2}], RSE: Resistencia superficial externa [m^2·K*W^{-1}]

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los valores de luminosidad medidos en la vivienda rural para diferentes orientaciones y horarios. Se observa que la orientación Este–Oeste alcanzó los valores más altos de iluminancia (hasta 4017 Lux a las 17:00 h en la fachada frontal), mientras que la orientación Norte–Sur mostró valores más bajos, confirmando la influencia de la orientación en la captación solar.

Tabla 1. Resultados luminosidad vivienda rural.

Orientación	Parte	Hora		
		10:00	13:00	17:00
Norte - Sur	Frontal	1663	2353	3270
	Medio	3163	4263	3016
	Posterior	1861	3430	2725
Este - Oeste	Frontal	3939	3512	4017
	Medio	3151	4085	2728
	Posterior	1442	2991	2061

La Tabla 2 muestra un ejemplo de resultados obtenidos para la vivienda rural con techo rojo, donde se comparan los valores calculados de temperatura sol-aire con las mediciones de la cámara termográfica. Se evidencia un error porcentual entre 3,2% y 8,9% dependiendo de la hora, siendo mayor a las 13:00 h y menor a las 17:00 h, lo cual coincide con la discusión sobre la incidencia de sombras en el heliodón (Fernandes et al., 2014).

Tabla 2. Valores obtenidos de las mediciones hechas para la vivienda rural con techo en color rojo el día 28 de septiembre de 2024.

Parámetro	Hora		
	10:00	13:00	17:00
Radiación Solar [W*m^{-2}]	203,8	208,8	171,2
Absortividad Color Rojo	0,74	0,74	0,74
Resistencia Térmica Externa	0,04	0,04	0,04
Temperatura Sol-Aire [°C]	6	6,2	5,1
Temperatura Aire [°C]	19,3	19,4	19,4
Temperatura Superficie [°C]	25,3	25,6	24,5
Temperatura con Cámara [°C]	23,9	23,5	23,7
Error Porcentual [%]	6,00%	8,90%	3,20%

RESULTADOS

El heliodón presentó un error promedio de 6,5% en la estimación de temperatura sol-aire frente a la cámara termográfica.

La orientación Este-Oeste concentró la mayor radiación y luminosidad, alcanzando hasta 3823 Lux en la marquesina de café.

En techos rojos (α=0.74), la temperatura superficial superó en 3–4°C a los techos blancos (α=0.20).

El análisis de sombras permitió identificar zonas críticas de sobrecalentamiento y áreas de ventilación pasiva.

DISCUSIÓN

El error promedio de 6,5% fue más alto en la segunda hora de medición (13:00 h), lo cual puede atribuirse a la mayor incidencia de proyecciones de sombras en el heliodón, que distorsionan la distribución de radiación (Fernandes et al., 2014). En contraste, a las 17:00 h el error fue menor, probablemente debido a la disminución de radiación incidente y a que las sombras proyectadas fueron menos críticas para la estimación.

La diferencia térmica de 3–4°C entre techos rojos y blancos se explica por la mayor absortividad del color rojo (α=0.74), que incrementa la ganancia térmica, tal como lo expresan Givoni (1998) y Olgyay (2015).

La orientación Este-Oeste evidenció mayor radiación y luminosidad debido a la trayectoria solar en el rango horario analizado, lo que refuerza la importancia de la orientación como variable de diseño bioclimático.

El análisis de sombras facilitado por el heliodón permitió identificar áreas con riesgo de sobrecalentamiento y zonas favorables para la ventilación pasiva, lo que coincide con la utilidad pedagógica señalada por Fernandes et al. (2014).

CONCLUSIÓN

El heliodón es una herramienta precisa y de bajo costo para simular trayectorias solares en construcciones rurales.

La orientación Este-Oeste maximiza la captación solar, lo cual es beneficioso para secado agrícola, pero desfavorable para viviendas.

El color y material de cubierta influyen significativamente en la temperatura superficial, siendo clave para el confort térmico.

Su uso en la etapa de diseño permite prever estrategias de iluminación, ventilación y control térmico, contribuyendo a la eficiencia energética rural.

Además de su utilidad técnica, el heliodón constituye un recurso didáctico en programas de ingeniería agrícola

REFERENCIAS

De Lassio, J., França, J., Espirito Santo, K., & Haddad, A. (2016). Case study: LCA methodology applied to materials management in a Brazilian residential construction site. Journal of Engineering (United Kingdom), 2016. https://doi.org/10.1155/2016/8513293

De Luca, F. (2022). Solar Form Finding: Subtractive Solar Envelope and Integrated Solar Collection Computational Method for High-Rise Buildings in Urban Environments. Proceedings of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), November 2017, 212-221. https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2017.212

Fernandes, L. C., Grzybowski, J. M. V., Ribeiro, A. A. G. A., Saugo, A., & Krüger, E. L. (2014). Análise do erro na projeção de sombras em heliodon com raio e mesa fixos. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1(November), 784-793. https://doi.org/10.17012/entac2014.467

Pajek, L., Potočnik, J., Dovjak, M., Božiček, D., Šubic, N., Kunič, R., & Košir, M. (2019). Using Heliodon for Solar Building Design Education in the Age of Computer Simulations. March 2019, 1–10. https://doi.org/10.18086/eurosun2018.07.03.

Quintero, M. F. (2019). Diseño y construccion de una herramienta bioclimatica para la Ingeniería Agrícola.

Salgado-Conrado, L., López-Montelongo, A., Álvarez-Macías, C., & Hernández-Jaquez, J. (2022). Review of Heliodon Developments and Computational Tools for Building Shadow Analysis. Buildings

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Diseño y construcción de un biodigestor tubular bajo cubierta tipo invernadero

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Design and construction of a tubular biodigester under a greenhouse-type cover

Puentes Cristian[1]*, Ardila Kerly[1], Roa Andrés[1], Soler Laura[1], España Angie[1] and Osorio Robinson[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Biogás
Biofertilizante
Biodigestores
Fabricación
Residuos orgánicos

El proyecto se desarrolla en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, donde la producción de residuos pecuarios representa un desafío ambiental y una oportunidad para transformarlos en energía renovable y biofertilizantes. En este contexto, la implementación de biodigestores enfrenta limitaciones por las condiciones climáticas locales: temperaturas entre 8 y 20 °C, alta humedad relativa y una precipitación anual de 1881 mm, factores que alargan los tiempos de retención y reducen la eficiencia del proceso anaerobio. Ante este problema, el objetivo del trabajo fue construir un biodigestor tubular de pequeña escala bajo cubierta tipo invernadero, con el fin de aprovechar residuos pecuarios, y verificar si la estrategia de instalación bajo cubierta puede mitigar las limitaciones térmicas. El prototipo de 1,24 m³ se fabricó en geomembrana y PVC,con 36 días de retención, 21,76 kg de dotación y producción de 0,80 m3 de biogás. La integración de biodigestores con estructuras de invernadero constituye una alternativa práctica y replicable para zonas de clima frío, contribuyendo a los ODS 7 y 13. Como agenda futura, se plantea evaluar el rendimiento en producción de biogás y calidad del biofertilizante, así como su aplicación en sistemas agrícolas de hortalizas de corta duración.

ABSTRACT

Keywords:
Biogas
Biofertilizer
Biodigester
Construction
Organic waste

The project is being developed at the National University of Colombia, Bogotá, where the production of livestock waste represents an environmental challenge and an opportunity to transform it into renewable energy and biofertilizers. In this context, the implementation of biodigesters faces limitations due to local climatic conditions: temperatures between 8 and 20°C, high relative humidity, and an annual rainfall of 1881 mm, factors that lengthen retention times and reduce the efficiency of the anaerobic process. Faced with this problem, the objective of the work was to build a small-scale tubular biodigester under a greenhouse-type cover to utilize livestock waste and to verify whether the under-cover installation strategy can mitigate thermal limitations. The 1.24 m³ prototype was manufactured from geomembrane and PVC, with 36 days of retention, 21.76 kg of fuel, and 0.80 m³ of biogas production. The integration of biodigesters with greenhouse structures constitutes an alternative and replicable practice for cold-climate areas, contributing to SDGs 7 and 13. A future agenda is to evaluate biogas production performance and biofertilizer quality, as well as its application in short-duration vegetable farming systems.

[1]Depto. Ingeniería Civíl y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. crpuentesg@unal.edu.co; kardilam@unal.edu.co; aroa@unal.edu.co; lsolera@unal.edu.co; aespanar@unal.edu.co; rosorioh@unal.edu.co
*Corresponding author: drpuentesg@unal.edu.co

CC BY NC SA

En la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, la disponibilidad de residuos pecuarios representa un recurso de gran potencial que, sin un aprovechamiento adecuado, puede convertirse en una fuente de contaminación ambiental y en un manejo ineficiente de los nutrientes presentes en dichos subproductos. Según Iglesias (1994), una vaca adulta produce unos 20.200 kg de estiércol al año, que contienen N (4,4 g/kg), P (0,9 g/kg) y K (4,2 g/kg). En un hato de 50 bovinos esto equivale a más de 1 millón de kg de estiércol, con aproximadamente 4.444 kg de nitrógeno, 909 kg de fósforo y 4.242 kg de potasio, los cuales, si no se aprovechan, pueden generar contaminación ambiental. Este contexto evidencia la pertinencia de plantear alternativas tecnológicas que permitan transformar este residuo en productos de valor agregado como biogás y biofertilizante.

Los biodigestores son sistemas cerrados de digestión anaerobia que transforman residuos orgánicos en biogás y biofertilizantes, a través de procesos microbiológicos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (FAO, 2011). Esta tecnología ha demostrado ser una alternativa sostenible en el sector agropecuario, al permitir el aprovechamiento de estiércoles de bovinos (*Bos taurus* L.), equinos (*Equus caballus* L.) y residuos vegetales, contribuyendo a la reducción de desechos y a la producción de energía renovable (Olaya & González, 2009; Ávila, 2016).

Con base en este panorama, el presente proyecto se enfoca en el diseño y fabricación de un biodigestor tubular bajo cubierta tipo invernadero en la sede Bogotá. La ciudad presenta temperaturas promedio de 12–14 °C, valores inferiores al rango mesofílico óptimo de 25–35 °C requerido para un proceso de digestión anaerobia óptimo (Ávila, 2016). Dichas condiciones no impiden el proceso, pero sí aumentan los tiempos de retención hidráulica (TRH) y, en consecuencia, se requieren biodigestores de mayor volumen para lograr la misma producción de biogás. Por ejemplo, Wang, Lu, Li y Yang (2019) encontraron que, al operar biodigestores a temperaturas inferiores al rango mesofílico, la producción de biogás se reduce significativamente y solo puede mantenerse estable al prolongar el TRH, lo que implica dimensionar sistemas de mayor capacidad. Estos hallazgos evidencian que la temperatura es un factor determinante en el diseño de biodigestores. Por ello, la instalación del prototipo en un invernadero tipo capilla permite aprovechar la radiación solar y el calor acumulado para mantener condiciones más estables, lo que responde a la limitación práctica de implementar biodigestores a pequeña escala en la región (Ordoñez, 2022).

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿La implementación de un biodigestor tubular de pequeñas dimensiones en el interior de un invernadero permite mejorar las condiciones climáticas para el desarrollo del proceso de digestión anaerobia, con respecto a las condiciones ambientales de Bogotá? Para dar respuesta, se diseñó y construyó un prototipo de 1,24 m³ de capacidad, elaborado en geomembrana calibre 8, con tuberías de entrada de 3", salida en PVC de 4" y líneas de conducción de ½", cuya evaluación permitirá determinar si la estrategia de instalación bajo cubierta ofrece ventajas en términos de eficiencia y escalabilidad del sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto, que fue planteado e iniciado en septiembre del año anterior se ubica en el campus universitario de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá dónde se presentan unos rangos de temperatura en promedio de 7 a 19 °C según weatherSpark, el biodigestor, que se encuentra dentro de un invernadero tipo capilla con temperaturas promedio de 28 a 30 °C presenta un desarrollo por fases cómo se encuentra planteado en la Figura 1 y se sitúa en la fase 4 "Carga inicial y puesta en marcha" a la fecha de presentación de esta ponencia en el mes de septiembre de 2025.

En la fase 1 de este proyecto se identificó la especie Bovina como fuente de material orgánico que de acuerdo a la FAO (2011) la caracterización de este sustrato tipo I contiene una relación Carbono/Nitrógeno de 25:1 lo cual se encuentra dentro del rango óptimo para las bacterias metanogénicas, este sustrato presenta entre el 13,4 y el 56,2% de Sólidos Totales lo cuál para reducir a 8% de ST teniendo en cuenta el máximo valor para heces de bovinos significa una adición de 6,025 L/kg excreta fresca.

En la fase de diseño aunque las 50 vacas disponibles sean capaces de producir 500 kg de excreta diaria

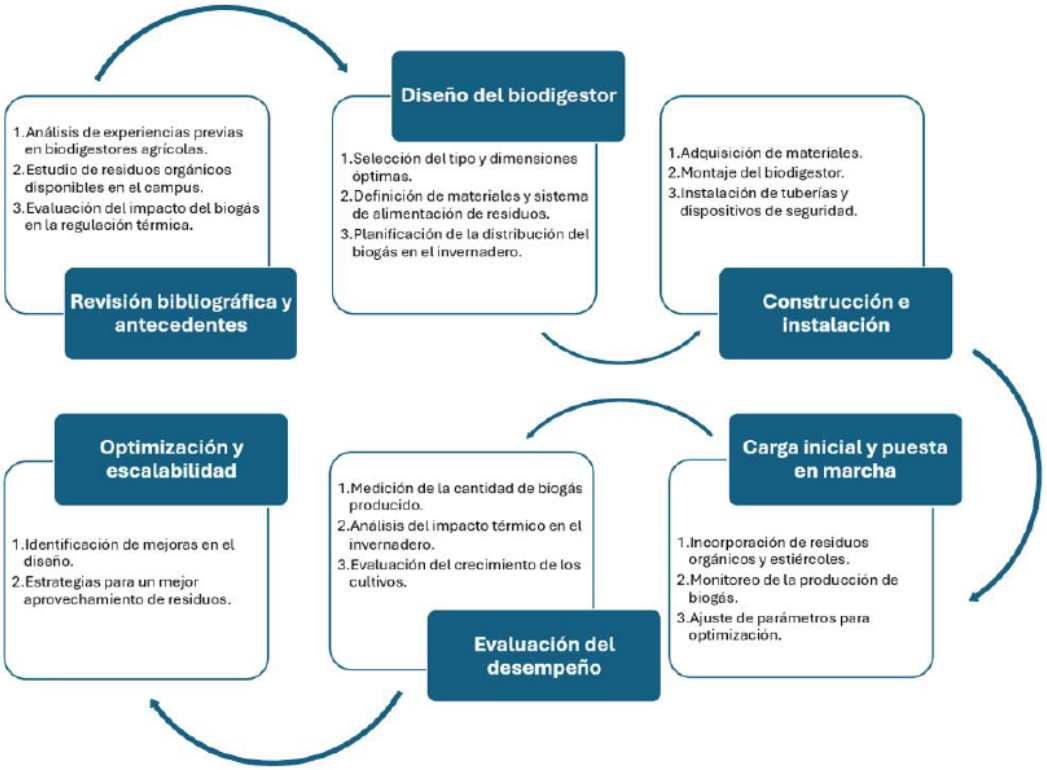


Figura 1. Fases del proyecto.

(50*10 kg/día) el diseño y dimensionamiento no se basó en toda la oferta sino en la implementación en una estructura de concreto existente lo cuál contiene un radio y profundidad de 57,5 y 120 centímetros respectivamente para un volumen dado de 1,24 m^3, obteniendo así un volumen de carga diaria de 0,0344 m^3/día, y un tiempo de retención hidráulico de 36,021 días, esto permitirá una alimentación aproximada de 21,76 kg siguiendo cómo densidad de referencia de 640 kg/m^3 produciendo así un volumen teórico de biogás de 0,8704 m3 siguiendo la producción de referencia aproximada indicada en FAO (2019) lo cuál será utilizado para un posterior proyecto de investigación y acondicionamiento climático y enriquecimiento de dióxido de carbono disponible en hortalizas de corta duración.

$$Cd = Volumen\ biodigestor/TRH \quad (1)$$

Donde; Cd: Carga orgánica diaria, TRH: Tasa de retención hidráulica.

$$TRH = -51.227 * ln(T) + 206.72 \quad (2)$$

Donde; TRH: Tasa de retención hidráulica, T: Temperatura promedio.

En la fase constructiva se instalaron los componentes hidráulicos básicos cómo la tubería de PVC para la entrada y salida de material y el biogás, componentes de seguridad como válvulas de control, trampa de agua y olores para la conducción del biogás siguiendo protocolos de seguridad y operación recomendados para biodigestores de pequeña escala en FAO (2019). El montaje se realizó sobre una superficie nivelada de suelo, asegurando la correcta disposición longitudinal del biodigestor tubular.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cómo se puede observar en la tabla 1 se realiza una comparación entre los parámetros de diseño con base a la temperatura promedio en Bogotá y las generadas dentro del invernadero dónde se evidencia una reducción del 66.36% del tiempo de retención hidráulico con una mejora importante en cuánto a la carga orgánica y por consiguiente producción de biogás lo cual limita la rentabilidad buscada en este proyecto.

Tabla 1. Comparación de diseño por temperatura.

Variable de diseño	T. Bogotá	T. Invernadero
Tiempo de retención (dia)	107	36
Carga orgánica diaria (kg/día)	0,011584	0,0344
Producción de biogás (m^3)	0,80	0,296

El prototipo de biodigestor tubular bajo cubierta tipo invernadero alcanzó un costo de inversión aproximado de $267.000 COP, que incluyó la adquisición de geomembrana calibre 8 y los componentes hidráulicos básicos para el funcionamiento y la seguridad del sistema.

La replicabilidad del biodigestor tubular bajo cubierta tipo invernadero constituye un aporte relevante del proyecto, dado que se basa en materiales de bajo costo, fácil acceso y montaje sencillo (geomembrana, PVC). Esta característica lo convierte en una tecnología viable no sólo en contextos académicos, sino también en comunidades rurales con recursos limitados.

CONCLUSIÓN

La construcción del prototipo de biodigestor tubular bajo cubierta tipo invernadero constituyó un primer paso en la adaptación de esta tecnología a las condiciones de clima frío de Bogotá, respondiendo al objetivo de diseñar un sistema para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos. El empleo de materiales económicos y de fácil acceso fortaleció el carácter replicable y sencillo del diseño, lo que aporta una herramienta práctica para iniciativas rurales y académicas en torno a tecnologías sostenibles.

Asimismo, la incorporación del invernadero como estrategia de acondicionamiento térmico plantea una alternativa metodológica para la generación de un microclima controlado, que en futuras etapas experimentales permitirá evaluar el efecto de la temperatura en el proceso. De esta manera, el prototipo se configura como una base para investigaciones orientadas a optimizar la producción de biogás y la calidad del biofertilizante en contextos de baja temperatura, contribuyendo al avance del conocimiento en bioenergía y economía circular, y ofreciendo una guía inicial para el desarrollo de sistemas adaptados a las necesidades productivas y ambientales del sector agropecuario.

AGRADECIMIENTOS

Se expresa un especial agradecimiento al profesor Robinson Osorio Hernández por su orientación y confianza en el desarrollo del proyecto, al Ingeniero Óscar Duque y a Servus por el respaldo y la gestión de la financiación, así como a los colaboradores que contribuyeron en diferentes fases, en particular Hary Natalia Román Gil por su papel fundamental en el avance del trabajo, y a Leidy Viviana Palacios y Miguel Báez, quienes participaron en las etapas iniciales del mismo.

REFERENCIAS

Ávila Velázquez, C. 2016. Uso de biodigestores en la industria pecuaria [Tesina de licenciatura no publicada]. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

FAO. 2011. Manual de biogás. Ministerio de Energía de Chile; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); Global Environment Facility (GEF).

FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores (Colección Documentos Técnicos N° 12). FAO.

Huaccha Machuca, L. J., & Miranda Muñoz, A. 2023. Evaluación de la eficiencia del biodigestor prefabricado en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la localidad Pampa Larga, Cajamarca 2022 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte.

Iglesias, J. 1994. Manual de biodigestores rústicos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Olaya Arboleda, Y., & González Salcedo, L. O. 2009. Fundamentos para el diseño de biodigestores: Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Administración.

Wang, S., Ma, F., Ma, W., Wang, P., Zhao, G. y Lu, X. (2019). Influencia de la temperatura en la eficiencia de la producción de biogás y la comunidad microbiana en un sistema de digestión anaeróbica de dos fases. Agua, 11(1), 133.

Ordóñez Fierro, O. L. (2022). Digestión anaerobia a bajas temperaturas (Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira). Repositorio Universidad Tecnológica de Pereira.

Rendón Ruiz, G. (2019). "Diseño, dimensionamiento y análisis de factibilidad técnica de un sistema de biodigestión y tratamiento de biomasa proveniente de la actividad ganadera en la zona de Metepec, Hidalgo", Tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Optimización de tratamientos de iluminación LED en el cultivo de microgreens de Mizuna Roja (*Brassica rapa* var. *nipposinica*): eficiencia energética y rendimiento en sistemas de agricultura vertical

Optimization of LED lighting treatments in Red Mizuna microgreens (*Brassica rapa* var. *nipposinica*): energy efficiency and yield in vertical farming systems

Juan Pablo Sepúlveda Quiroz[1]* and Christian Correa Farías[1]

Palabras clave:
Agricultura de ambiente controlado
Agricultura Vertical
Eficiencia energética
LEDs
Microgreens

RESUMEN

La agricultura vertical (VF) se presenta como una estrategia clave para enfrentar los desafíos del cambio climático, la escasez hídrica y la seguridad alimentaria. Permite la producción de cultivos durante todo el año mediante el control preciso de parámetros críticos, siendo la iluminación artificial la principal fuente de consumo energético. Los microgreens, brotes jóvenes con alto valor nutricional, se adaptan especialmente a este modelo de producción por su rápido crecimiento y baja demanda de recursos. El objetivo de este estudio es desarrollar estrategias de iluminación que reduzcan el consumo eléctrico en microgreens de mizuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*). Se evaluaron distintos tratamientos de luz LED para analizar su efecto en la acumulación de antocianinas, el rendimiento productivo y la eficiencia en el uso de energía (EUE). Se implementó un diseño experimental con diversas combinaciones de espectros, intensidades y fotoperiodos. El contenido de antocianinas se determinó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), mientras que el consumo energético se registró en tiempo real para estimar la EUE. Los resultados preliminares sugieren que la intensidad lumínica es el factor principal que influye tanto en la eficiencia energética como en la calidad nutricional. Este estudio contribuye al desarrollo de estrategias lumínicas sostenibles para una agricultura más eficiente y resiliente.

Keywords:
Controlled environment agriculture
Vertical farm
Energy efficiency
LEDs
Microgreens

ABSTRACT

Vertical farming (VF) has emerged as a key strategy to address the challenges of climate change, water scarcity, and food security. It enables year-round crop production through precise control of critical parameters, with artificial lighting being the main source of energy consumption. Microgreens, young shoots with high nutritional value, are particularly suited to VF due to their rapid growth and low resource requirements.This study aims to develop lighting strategies to reduce electricity consumption in mizuna microgreens (Brassica rapa var. nipposinica). Different LED treatments were evaluated to determine their influence on anthocyanin accumulation, biomass yield, and energy use efficiency (EUE). A multivariate experimental design was implemented with combinations of spectra, intensities, and photoperiods. Anthocyanin content was quantified using high-performance liquid chromatography (HPLC), while energy consumption was recorded in real time to calculate EUE. Preliminary results suggest that light intensity is the primary factor affecting both energy efficiency and nutritional quality in mizuna microgreens. These findings highlight the potential of targeted lighting strategies to enhance crop performance while minimizing energy demand. This research contributes to the development of sustainable lighting management practices, aligning with the broader goals of resource-efficient agriculture and food system sustainability.

[1]Departamento de Mecanización y Energía, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
*Corresponding author: jsepulvedaq@udec.cl

CC BY NC SA

Dentro de la agricultura, uno de los enfoques más prometedores frente al cambio climático es la agricultura en ambientes controlados (CEA, por sus siglas en inglés). Esta práctica agrícola basada en tecnología busca crear condiciones óptimas de crecimiento en sistemas cerrados. Las instalaciones de CEA varían en complejidad, desde estructuras simples como invernaderos tradicionales, hasta configuraciones avanzadas como la agricultura vertical (VF, Vertical Farming). Esta última se caracteriza por la producción multicapa en vertical, lo que ofrece la ventaja de mayores rendimientos por metro cuadrado. Además, permite el cultivo durante todo el año, independiente de las condiciones ambientales externas, gracias al control preciso de parámetros clave como nutrición, humedad, concentración de CO_2, temperatura e iluminación (Liu et al., 2022). Esta tecnología abre oportunidades significativas para la producción agrícola en entornos urbanos a múltiples escalas, posibilitando la generación de alimentos con menor consumo de recursos. Además, la VF ofrece beneficios ambientales sustanciales y se presenta como una vía práctica hacia la economía circular (Parkes et al., 2022).

Pese a estas ventajas, la VF enfrenta actualmente dos desventajas principales: la alta demanda energética y la baja eficiencia en el uso de la energía (Jin et al., 2023; Santini et al., 2021). De hecho, el consumo energético en los sistemas PFAL representa aproximadamente el 28% de los costos operativos (Shamshiri et al., 2018). Según Avgoustaki and Xydis (2020), la iluminación artificial es responsable de gran parte de esta demanda, representando alrededor del 60% del consumo total en las instalaciones PFAL.

Paralelamente, existe una creciente demanda de los consumidores por alimentos más saludables y sostenibles. Las hortalizas jóvenes han despertado gran interés debido a sus beneficios nutricionales en comparación con las semillas o sus contrapartes maduras (Choe et al., 2018). Dentro de esta categoría, se distinguen los sprouts, microgreens y baby greens, principalmente por sus etapas de crecimiento y periodos de cosecha en sistemas VF.

La investigación sobre microgreens se ha centrado en caracterizar y modular diferentes perfiles de compuestos bioactivos como vitaminas, minerales, y particularmente, su alto contenido de metabolitos secundarios, incluyendo polifenoles, carotenoides y glucosinolatos. Dichas investigaciones han consolidado a los microgreens como alimentos nutracéuticos, destacando sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, vinculadas con la reducción de la incidencia de enfermedades crónicas como cáncer, diabetes, obesidad y problemas cardiovasculares (Kyriacou et al., 2016).

Este potencial como nuevo superalimento —de rápido crecimiento, alto valor comercial y bajas demandas de recursos (espacio, agua y fertilizantes)— convierte a los microgreens en candidatos ideales para el cultivo sostenible en CEA . En consecuencia, numerosos estudios han explorado combinaciones de iluminación LED para modular distintos perfiles de compuestos bioactivos en microgreens (Cowden et al., 2024; Craver et al., 2017). Sin embargo, aspectos esenciales como el consumo energético o estrategias para la eficiencia energética en su producción —cruciales para la viabilidad y escalabilidad de estos sistemas— no han sido suficientemente explorados. Por lo tanto, la presente investigación busca identificar diferentes estrategias luminicas para optimizar la producción de microgreens (mizuna roja), enfocándose en la reducción del consumo eléctrico y la mejora de la eficiencia energética en sistemas de producción intensiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y tratamientos lumínicos

El modelo de estudio de esta investigación fue “Mizuna roja” (*Brassica rapa nipponosica*). Donde se utilizó 1g de semilla por cada bandeja de cultivo con fibra de coco como sustrato, tres réplicas por tratamiento. Las semillas cultivadas se colocaron en una cámara de ambiente controlado (Figura 1). Se mantuvieron los primeros 3 días en oscuridad para promover germinación, y luego 10 días bajo 12 diferentes combinaciones de tratamientos de iluminación: Calidad: Luz blanca 400-620nm (W), blanca/roja 660nm (W/R), y UV 390nm/ blanca/roja/ infrarroja 750nm (F, full espectrum). Intesidad: 100 y 200 PPFD. Fotoperiodo: ciclo de 12h luz /12 oscuridad (12/12) y 24h de luz continua (24/00). La temperatura se mantuvo entre 20-25°C y la humedad relativa (HR) entre 40-60%. Posteriormente finalizado el periodo de cultivo, se recolectaron los microgreens para su análisis.

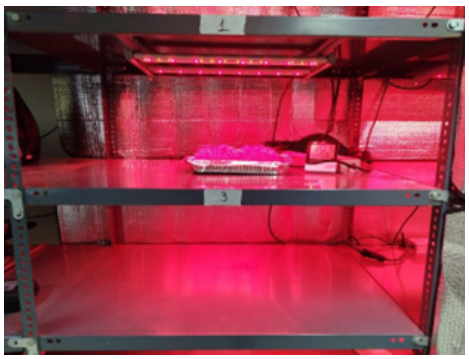


Figura 1. Sistema de cultivo vertical modular con luces LEDs.

Parámetros físicos y energéticos evaluados en el cultivo.

Para evaluar la influencia de los tratamientos de iluminación en las propiedades físicas de los microgreens, se midieron el peso fresco (g), peso seco (g), altura del brote (cm). Tambien se evaluaron parametros del consumo energetico de las luces (kWh).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados preliminares muestran que la combinación de espectro completo (UV/Blanco/Rojo/IR), con una intensidad de 100 µmol·m^{-2}·s^{-1} y un fotoperiodo de 12/12 h, ofrece la mejor relación rendimiento/consumo energético en microgreens de mizuna. Bajo estas condiciones, se obtuvieron valores superiores en altura de plántulas, peso fresco y peso seco, en comparación con los demás tratamientos evaluados. Asimismo, este esquema lumínico presentó un costo energético significativamente menor en relación con intensidades más altas y fotoperiodos continuos de 24 h.

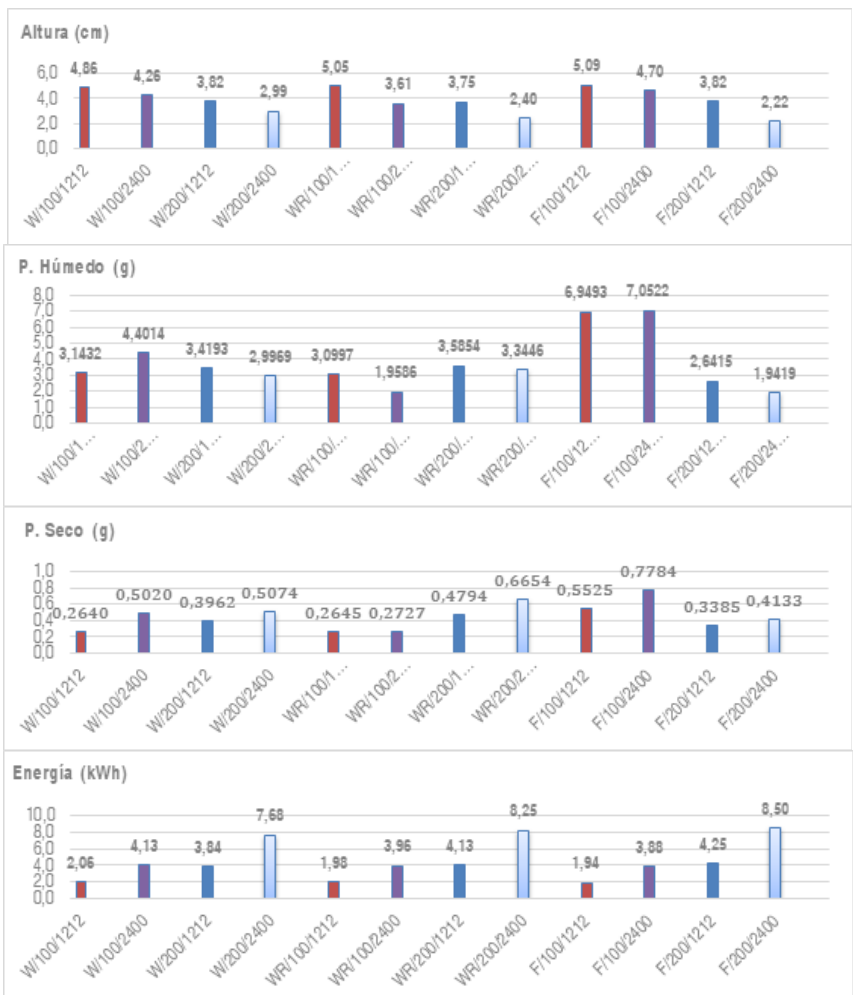


Figura 2. Influencia de tratamientos lumínicos en parámetros de rendimiento y costos, en el cultivo de microgreens de *Mizuna roja.*

Estos resultados sugieren que la intensidad lumínica es un factor determinante tanto en la eficiencia energética como en la expresión de parámetros de calidad productiva, lo que concuerda con estudios previos que destacan la importancia de optimizar la cantidad de luz antes que prolongar la duración del fotoperiodo. En este sentido, la integración de estrategias lumínicas basadas en intensidades moderadas y espectros balanceados podría constituir una alternativa viable para reducir los costos de producción sin comprometer la calidad funcional de los microgreens.

CONCLUSIÓN

Los resultados preliminares de este estudio confirman que la intensidad lumínica es el factor más determinante en la eficiencia en el uso de energía y en el rendimiento de los microgreens de mizuna, destacándose que el tratamiento con espectro completo a 100 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ y fotoperiodo de 12/12 h presentó la mejor relación entre calidad de cultivo y costo energético. Estos hallazgos respaldan la necesidad de avanzar en el diseño de estrategias de manejo lumínico sostenible que permitan reducir el consumo eléctrico sin comprometer, e incluso potenciando, la calidad nutricional de los microgreens. En esta línea, se proyecta que futuras investigaciones profundicen en la cuantificación de compuestos bioactivos mediante HPLC y evalúen la escalabilidad de las condiciones óptimas identificadas, tanto en sistemas piloto como en aplicaciones industriales, con el fin de fortalecer la viabilidad técnica y económica de la agricultura vertical orientada a la alimentación del futuro.

REFERENCIAS

Avgoustaki, D. D., & Xydis, G. (2020). Plant factories in the water-food-energy Nexus era: a systematic bibliographical review. *Food Security*, *12*(2), 253-268. https://doi.org/10.1007/s12571-019-01003-z

Choe, U., Yu, L. L., & Wang, T. T. Y. (2018). The Science behind Microgreens as an Exciting New Food for the 21st Century. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(44), 11519-11530. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03096

Cowden, R. J., Markussen, B., Ghaley, B. B., & Henriksen, C. B. (2024). The Effects of Light Spectrum and Intensity, Seeding Density, and Fertilization on Biomass, Morphology, and Resource Use Efficiency in Three Species of Brassicaceae Microgreens. Plants, 13(1), 124. https://www.mdpi.com/2223-7747/13/1/124

Craver, J. K., Gerovac, J. R., Lopez, R. G., & Kopsell, D. A. (2017). Light Intensity and Light Quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Phytochemical Concentrations within Brassica Microgreens [Article]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 142(1), 3-12. https://doi.org/10.21273/jashs03830-16

Jin, W., Formiga Lopez, D., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. (2023). Light use efficiency of lettuce cultivation in vertical farms compared with greenhouse and field. Food and Energy Security, 12(1), e391.

Kyriacou, M. C., Rouphael, Y., Di Gioia, F., Kyratzis, A., Serio, F., Renna, M., De Pascale, S., & Santamaria, P. (2016). Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. Trends in Food Science & Technology, 57, 103-115. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005

Liu, X. Y., Xu, Y. L., Wang, Y., Yang, Q. C., & Li, Q. M. (2022). Rerouting Artificial Light for Efficient Crops Production: A Review of Lighting Strategy in PFALs. Agronomy-Basel, 12(5), Article 1021. https://doi.org/10.3390/agronomy12051021

Parkes, M. G., Cubillos Tovar, J. P., Dourado, F., Domingos, T., & Teixeira, R. F. M. (2022). Life Cycle Assessment of a Prospective Technology for Building-Integrated Production of Broccoli Microgreens [Article]. Atmosphere, 13(8), Article 1317. https://doi.org/10.3390/atmos13081317

Santini, A., Bartolini, E., Schneider, M., & Greco de Lemos, V. (2021). The crop growth planning problem in vertical farming. European Journal of Operational Research, 294(1), 377-390. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.034

Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), 1-22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Potencial de la fracción sólida del digestato como cama para ganado en sistemas agrícolas de Canadá: implicaciones en la calidad del aire

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Potential of the solid fraction of digestate as bedding material for livestock in Canadian agricultural systems: implications for air quality

Godbout, S.[1]*, Palacios, J. H.[1], Yukari Nakanishi, E.[1], Amri, N.[1] and M'Hamdi, N.[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Camas para ganado
Fracción solida de digestato
Gases (NH_3, CO_2, CH_4, N_2O)
Partículas en suspensión

El aumento de los costos y las interrupciones en el suministro de materiales de cama tradicionales, como la paja y el aserrín, ha llevado a los productores a buscar alternativas sostenibles y económicamente viables. Una opción prometedora es la fracción sólida (FS) del digestato proveniente de una planta de bioenergía en Warwick, Quebec, la cual presenta dificultades para su disposición final debido a su contenido de materia orgánica y fibra. Este estudio evaluó el potencial de la FS como material de cama para ganado lechero, promoviendo un enfoque circular en la gestión de residuos. Los experimentos se realizaron en el Laboratorio BABE, utilizando ocho salas herméticas idénticas equipadas con sistemas de ventilación independientes, sensores de temperatura y humedad, y conectadas a analizadores de gases para medir CH_4, CO_2, N_2O y NH_3 de forma continua. Se compararon cuatro tipos de cama: paja comercial, FS y dos estiércoles reciclados, mediante pruebas de esparcimiento realizadas durante cuatro semanas, con dos aplicaciones semanales por tipo de cama. Los resultados mostraron que la FS produjo niveles más bajos de partículas y concentraciones más altas de NH_3 y CO_2 en comparación con otros materiales; sin embargo, todos los valores se mantuvieron por debajo de los límites reglamentarios, sugiriendo riesgos respiratorios mínimos para el ganado y los trabajadores.

ABSTRACT

Keywords:
Livestock bedding
Solid fraction of digestate
Gases (NH_3, CO_2, CH_4, N_2O)
Particles in suspension

Increasing costs and disruptions in the supply of traditional bedding materials, such as straw and sawdust, have led producers to seek sustainable and economically viable alternatives. One promising option is the solid fraction (SF) of digestate from a bioenergy plant in Warwick, Quebec, which presents challenges for final disposal due to its organic matter and fiber content. This study evaluated the potential of SF as bedding material for dairy cattle, promoting a circular approach to waste management. The experiments were conducted at the BABE Laboratory, using eight identical airtight rooms equipped with independent ventilation systems, temperature and humidity sensors, and connected to gas analyzers to continuously measure CH_4, CO_2, N_2O, and NH_3. Four types of bedding were compared: commercial straw, FS, and two recycled manures, using spreading tests carried out over four weeks, with two applications per week per type of bedding. The results showed that FS produced lower particle levels and higher concentrations of NH_3 and CO_2 compared to other materials; however, all values remained below regulatory limits, suggesting minimal respiratory risks to livestock and workers.

[1]Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA), Québec (Québec).
*Corresponding author: stephane.godbout@irda.qc.ca

CC BY NC SA

La cama es esencial para el bienestar de las vacas lecheras, ya que mejora su salud, productividad y calidad de la leche al proporcionar comodidad y reducir lesiones. Tradicionalmente se usan paja y aserrín, pero el aumento de costos y la escasez de estos materiales ha impulsado la búsqueda de alternativas más viables (Niraula et Lebeau, 2023).

El uso de camas recicladas, aunque reciente en Quebec, se estudia en EE. UU. desde los 2000 (Choinière et Lemay, 2008). Su producción implica separación, acondicionamiento (generalmente por compostaje) y gestión en el establo. La calidad de la cama depende del acondicionamiento, la técnica de aplicación y la ventilación, factores que también afectan la higiene y las emisiones de polvo y gases (Godbout et al. 2019).

La digestión anaeróbica (DA) es una técnica que trata la materia prima antes de su separación y produce una fracción sólida del digestato que puede emplearse como cama para ganado lechero. En Ontario (Canadá) y en Estados Unidos esta práctica ya es común, obteniéndose materiales con un 30–35 % de materia seca mediante separadores o prensas. Además de ofrecer una alternativa a las camas tradicionales, diversos estudios destacan que su adopción puede aportar beneficios económicos a los productores (Alexander, 2012) (Pelaez-Samaniego et al., 2017).

En 2022 se creó en Warwick, QC (Canadá) una cooperativa de bioenergía basada en un reactor anaeróbico mesofílico de 3000 m³. Habitualmente, el digestato se gestiona aplicándolo directamente como fertilizante, ya que conserva una parte importante de los nutrientes de la materia prima original. No obstante, existen procesos alternativos que permiten incrementar su valor y diversificar sus aplicaciones. Uno de ellos es la separación de fases, que divide el digestato en una fracción líquida (FL) y una fracción sólida (FS).

La FL, rica en nutrientes solubles como nitrógeno y potasio, puede utilizarse como biofertilizante. En este caso particular, la cooperativa se enfrentó a un desafío para la disposición de la FS debido a consideraciones económicas y de bioseguridad, lo que motivó la necesidad de un análisis integral para identificar nuevos usos de mercado. Dado que la FS contiene mayor cantidad de materia orgánica y material fibroso, se planteó la posibilidad de emplearla como material de cama para ganado.

Este enfoque podría favorecer la circularidad en la gestión de residuos ganaderos, al reducir la dependencia de insumos convencionales y mejorar la sostenibilidad del reciclaje del estiércol en los sistemas agrícolas. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad de la fracción sólida (FS) del digestato como material de cama seguro y funcional para explotaciones lecheras, considerando sus propiedades fisicoquímicas, la seguridad microbiológica y los posibles efectos sobre la calidad del aire. No obstante, en el presente trabajo se presentan únicamente los resultados relativos a la calidad del aire, específicamente en lo referente a partículas en suspensión, gases de efecto invernadero y amoníaco.

MATERIALES Y MÉTODOS

Salas experimentales

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio BABE del Instituto de Investigación y Desarrollo Agroambiental (IRDA). El laboratorio se encuentra en el edificio DC-137 del Centro de Investigación en Ciencias Animales de Deschambault (CRSAD, Portneuf, Quebec). El edificio cuenta con 12 salas herméticas (solo se utilizaron 8 salas para el presente proyecto) de dimensiones similares (1,20 m de ancho, 2,44 m de profundidad y 2,44 m de altura), cada una con un sistema de ventilación independiente. Cada sala está equipada con instrumentos para el seguimiento continuo de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa, así como la diferencia de presión estática) y de las emisiones ambientales de contaminantes atmosféricos (por ejemplo, gases). Las actividades de esparcimiento que se llevan a cabo en las granjas lecheras comerciales se simularon en las salas experimentales utilizando un esparcidor tipo carrusel. El esparcidor se colocó a una altura de 1,30 m. El material a esparcir se añadió de forma continua al esparcidor a través de una tubería de acceso exterior a la sala. La intensidad del motor del carrusel se ajustó a 2 para proyectar la cama a una distancia de 120 a 150 cm del esparcidor.

Diseño experimental

Se realizaron pruebas de esparcimiento con cuatro tipos de cama: paja comercial, fracción sólida del digestato

y dos estiércoles reciclados de granjas lecheras de la cooperativa (Figura 1). Durante cuatro semanas, se hicieron dos esparcimientos por tipo de cama cada semana, totalizando ocho esparcimientos semanales, asignados aleatoriamente a las salas experimentales para minimizar sesgos. Cada ensayo consistió en 15 minutos de aplicación de la cama, seguidos de 15 minutos de medición de la calidad del aire, sumando 30 minutos por ensayo. Además, se realizó un seguimiento adicional 24 horas después del esparcimiento. Entre ensayos semanales, las salas fueron vaciadas y limpiadas para garantizar condiciones uniformes.



Figura 1. Fracción sólida del digestato, cama reciclada de las granjas lecheras A y B y paja comercial.

Concentración y emisión de gases

Las concentraciones de gases (CO2, N2O, CH4 y NH3) se analizaron de forma continua durante los 30 minutos que duró la prueba de esparcimiento. Las concentraciones de NH3 se analizaron con un analizador que utiliza espectroscopia infrarroja no dispersiva (NDIR, Siemens, modelo Ultramat 6E, Múnich, Alemania).

Las emisiones se calcularon multiplicando la diferencia entre las concentraciones de entrada y salida por la masa de gas por volumen de aire (Godbout et al 2012) (Ecuación 1). En esta ecuación, se utilizó el volumen específico del aire3 (v = (Patm – Pv)/(287 x T)) para obtener el caudal másico de aire a partir del caudal volumétrico.

$$E_{gas} = (C_{salida} - C_{entrada}) x Q x \frac{P_{atm} - P_v}{287 x T} x \frac{M_{gas}}{M_{aire}} \quad (1)$$

Donde,

E_{gas} = emisión de gas por unidad experimental (mg. min^{-1}); C_{salida} = concentración de gas en cada una de las unidades experimentales (ppmv); $C_{entrée}$ = concentracion de gas del aire ambiente (ppmv); Q = caudal (m^3/min); P_{atm} = presión atmosferica (101325 Pa); P_v = presión de vapor (Pa); 287 est la constante thermodynamique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$);T = temperatura (K); M_{gaz} = Masa molar del gas: CO_2 (44 $g.mol^{-1}$), CH_4 (16 $g.mol^{-1}$), N_2O (44 $g.mol^{-1}$) et NH_3 (17 $g.mol^{-1}$); M_{air} = Masa molar del aire (29 $g.mol^{-1}$)

Partículas de polvo en suspensión en el aire

Las concentraciones de partículas en suspensión en el aire se midieron durante las pruebas de esparcimiento utilizando un contador óptico DustTrak™ DRX Aerosol Monitor (Modelo 8534, TSI, Shoreview, MN, EE. UU., 3 l/min). El contador permite medir diferentes fracciones de partículas, incluyendo el polvo total, PM10 (PM, materia particulada), PM4, PM2,5 y PM1. A modo de ejemplo, las PM10 representan partículas con un diámetro inferior a 10 µm. Las concentraciones de las diferentes fracciones de partículas se expresaron en miligramos por metro cúbico de aire.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Previo a los ensayos, la fracción sólida (FS) fue secada hasta alcanzar un 35 % de materia seca. Durante la dispersión, la FS generó niveles más bajos de partículas ($PM_{2.5}$: 0,06 mg/m^3; PM_{10}: 0,08 mg/m^3; PM total: 0,16 mg/m^3) y, en contraste, concentraciones más elevadas de NH_3 y CO_2 en comparación con los demás

materiales evaluados (Figura 2). No obstante, todos los valores registrados se mantuvieron por debajo de los límites reglamentarios establecidos: PM total (15 mg/m³, media ponderada en 8 h), PM_{10} fracción respirable (5 mg/m³, media ponderada en 8 h) y NH_3 (25 ppm). Estos resultados indican que el uso de la FS representa riesgos respiratorios mínimos tanto para el ganado como para los trabajadores agrícolas. Actualmente, los datos de emisiones se encuentran en proceso de análisis detallado.

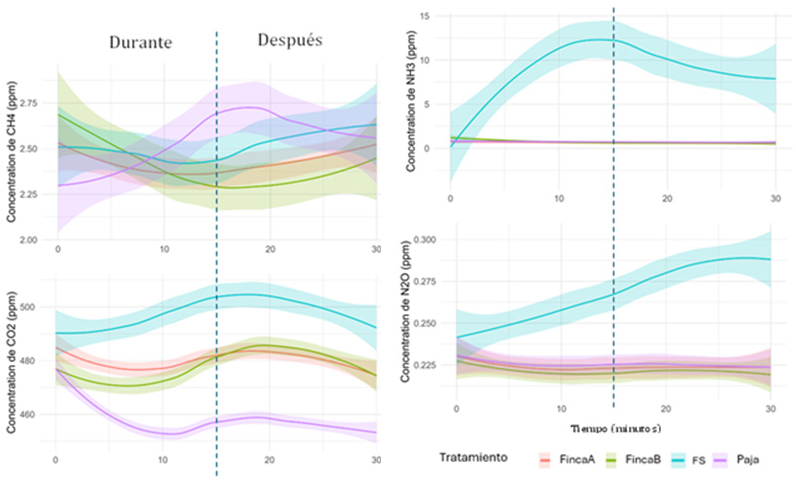


Figura 2. Concentración de CH_4, NH_3, CO_2 et N_2O durante y después del esparcimiento de cada tipo de cama.

CONCLUSIÓN

La fracción sólida del digestato generada mediante biometanización constituye una alternativa prometedora a los materiales de cama tradicionales. No obstante, su bajo contenido inicial de materia seca hace necesario un proceso de acondicionamiento previo a su utilización, tal como se llevó a cabo en el presente estudio. Los ensayos de esparcimiento de la FS indican que los riesgos respiratorios para animales y trabajadores son mínimos. Sin embargo, se requieren ajustes adicionales para garantizar el cumplimiento de las normas de bioseguridad, en particular frente a la posible presencia de *Salmonella*.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo financiero del Programa Innov'Action, creado en el marco del Acuerdo Canadá-Quebec para la aplicación de la Asociación Agrícola Canadiense, en colaboración con el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de Québec y Agricultura y Agroalimentación de Canadá. Los autores expresan su gratitud a nuestros socios de Coop Agri-Énergie Warwick y Coop Carbone (Nicolas Paris-LaFrance y Josée Chicoine), así como a las granjas participantes (Ferme Érilis y Ferme Rochebelle). Un agradecimiento especial al equipo del IRDA, así como a los colegas de la Universidad de Montreal, el IUCPQ y la Universidad Laval.

REFERENCIAS

Alexander, R. 2012. Digestate Utilisation In the US. Biocycle, The organics recycling authority. https://www.biocycle.net/2012/01/12/digestate-utilization-in-the-u-s/

Choinière, Y. et C. Lemay. 2008. Vaches sur litière compostée. Bulletin des agriculteurs, mars 2008, pp 67-71.

Godbout et al. 2019. Litière recyclée en production laitière : état des connaissances et balises. CRSAD-IRDA. 39 pages.

Niraula, R., Lebeau, B. 2023. Matériaux de litière de remplacement pour le bétail. Fiche technique NO 23-056. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales. https://www.ontario.ca/fr/page/materiaux-de-litiere-de-remplacement-pour-le-betail

Pelaez-Samaniego, M.R., R. L. Hummel, W. Liao, J. MA, J. Jensen, C. Kruger et C. Frear. 2017. Approaches for adding value to anaerobically digested dairy fiber. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 72(2017)254 - 268.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Tecnología de filtros verdes con cero descargas para el tratamiento de aguas residuales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Green filter technologies with zero discharge for the treatment of wastewater

Nelson Rodríguez Valencia[1], Cristian Camilo Arboleda Ospina[1] and Samuel Antonio Castañeda[1]

Palabras clave:
Aguas residuales
Caficultura
Medio ambiente
Sostenibilidad
Tratamiento

RESUMEN

En las fincas cafeteras se generan dos tipos de aguas residuales de importancia: las aguas provenientes del beneficio del café y aguas residuales provenientes de la vivienda. Este tipo de aguas se caracteriza por tener altos contenidos de materia orgánica biodegradable, que pueden ser removida mediante procesos biológicos. Para fin de evitar la generación de vertimientos que permitan la eliminación de costos legales ambientales y la prospección de los recursos naturales en las fincas cafeteras, se evaluó la tecnología de filtros verdes con cero descargas utilizando un invernadero con el suelo impermeabilizado y sembrado con pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en el Centro Nacional de Investigaciones del Café, Sede La Granja en Manizales, Caldas. Se determinó que la tecnología estudiada tiene la capacidad de tratar y evaporar hasta 24 litros de agua residual al día por metro cuadrado de plantación impermeabilizada. Se observó que la tecnología es capaz de eliminar en un 77,51% los valores de DQO, 62,01% los valores de sólidos totales y en un 72,37% los sólidos suspendidos totales y cuando se recurcula el efluente hasta total incorporación, de logra el objetivo de cero descargas, demostrando la viabilidad de la tecnología para el tratamiento de las aguas residuales de las fincas cafeteras.

ABSTRACT

Keywords:
Wastewater
Coffee growing
Environment
Sustainability
Treatment

Two important types of wastewater are generated on coffee farms: water from coffee processing and wastewater from residential premises. This type of wastewater is characterized by its high content of biodegradable organic matter, which can be removed through biological processes. To avoid the generation of wastewater and thus eliminate environmental legal costs and allow for the exploration of natural resources on coffee farms, zero-discharge green filter technology was evaluated using a greenhouse with a waterproofed floor planted with vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) at the National Coffee Research Center, La Granja Campus in Manizales, Caldas. The technology studied was determined to have the capacity to treat and evaporate up to 24 liters of wastewater per day per square meter of waterproofed plantation. It was observed that the technology is capable of eliminating 77.51% of COD values, 62.01% of total solids values and 72.37% of total suspended solids and when the effluent is recycled until fully incorporated, the objective of zero discharges is achieved, demonstrating the viability of the technology for the treatment of wastewater from coffee farms.

[1]Cenicafé, Manizales, Colombia. nelson.rodriguez@cafedecolombia.com; cristian.arboleda@cafedecolombia.com; samuel.castaneda@cafedecolombia.com

CC BY NC SA

En las fincas cafeteras se generan diferentes tipos de aguas residuales, las cuales tienen diferente composición y por lo tanto, diferente impacto sobre el ecosistema cafetero. Entre ellas, se tiene las aguas residuales que se generan en la vivienda después de su uso en actividades como la preparación de alimentos, la higiene personal, el lavado de ropa y utensilios, el aseo de la casa y la descarga de las unidades sanitarias. Otra de las aguas residuales que se generan en la finca cafetera son las provenientes del beneficio de café, constituidas principalmente por el agua utilizada en la clasificación hidráulica, el lavado del grano y el aseo de las máquinas utilizadas en la transformación del fruto en café pergamino seco. Estas aguas se caracterizan por tener altos contenidos de materia orgánica biodegradable, es decir que pueden ser tratadas mediante procesos biológicos (Rodríguez et al., 2022).

La tendencia actual a nivel mundial es adoptar Programas de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (PUEAA) tanto en la vivienda, como en los procesos productivos con el fin de disminuir el consumo de agua y por lo tanto tener sistemas de tratamiento de menor tamaño (Congreso, 1997). De igual forma, incorporar en el manejo y tratamiento de las aguas residuales, sistemas de cero descargas con los cuales no se presentan vertidos a los cuerpos de aguas superficiales ni al suelo. La implementación de este tipo de soluciones en nuestro país, no solo permite conservar la salud de los recursos naturales, también representan un ahorro para los generadores de las aguas residuales, dado que, si no hay vertidos, se eliminan los costos legales ambientales asociados a los mismos, como el permiso de vertimientos, muestreo y caracterización de los vertidos (Rodríguez et al., 2022b)

Para el caso del ecosistema cafetero, se presenta deterioro en la calidad del agua superficial y problemas de erosión de suelos, ocasionado por el inadecuado manejo y tratamiento de las aguas residuales de las viviendas y del beneficio del café. En investigaciones de Cenicafé (Rodríguez et al., 2018), en microcuencas cafeteras, se evidenció que fuentes superficiales de las cuales se abastecían los productores recibían los vertimientos domésticos de los pobladores del área deteriorando la calidad del recurso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluó, a escala piloto, la idoneidad y eficiencia de la tecnología de filtros verdes para el tratamiento de efluentes procedentes del beneficio del café (aguas - mieles) y de las viviendas, en el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Sede La Granja (Manizales, Caldas). Para la implementación de los filtros verdes se seleccionaron seis parcelas de 2 m x 2 m (4 m^2), equipadas con lisímetros, que permitieron recoger el agua infiltrada a 40 cm de profundidad del suelo, para posteriormente evaluar su calidad. Se seleccionó el material de siembra del sistema y se realizó un análisis comparativo entre vegetación nativa compuesta principalmente por *Paspalum conjugatum* (pasto horqueta) y *Panicum máximum* (arrocillo) y por otro lado, cultivo con *Chrysopogon zizanioides* (pasto vetiver) en alta densidad (dos esquejes por sitio, cada 10 cm), los esquejes sembrados tenían 10 cm de tallo y 5 cm de raíz. El crecimiento de la vegetación se controló periódicamente con cortes regulares a 35 cm de altura, para maximizar su capacidad de crecimiento y, por lo tanto, su capacidad de captación de nutrimentos.

Las aguas residuales aplicadas a los filtros verdes procedían de un sistema de beneficio ecológico (consumo de agua menor a 5 L kg^{-1} café pergamino seco), con una elevada carga orgánica y fue pre-tratada en un reactor hidrolítico - acidogénico (RHA) al cual se le incorporaron dispositivos para optimizar su desempeño (Rodríguez et al., 2019), lo que permitió una reducción de la carga orgánica de casi el 50%. Dicho pretratamiento es indispensable para eliminar parte de los sólidos en suspensión, reducir la carga orgánica y evitar problemas de colmatación en el sistema de riego. En el caso de las aguas de la vivienda, se utilizaron las provenientes del sistema séptico que se encontraba en el área. Semanalmente, se cuantificó la cantidad de agua aplicada a cada uno de los filtros verdes y la cantidad de agua drenada de los mismos. El agua retenida y evapotranspirada se calculó como la diferencia entre el volumen aplicado y el volumen drenado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El porcentaje de reducción de sólidos totales (ST) realizado por el suelo y el pasto vetiver fue del 98,65% (considerando que el agua residual del café llegó después del tratamiento primario, con una

concentración promedio de ST de 6.891 mg L^{-1}). El porcentaje de reducción de ST realizado por todo el sistema de tratamiento (tratamiento primario + suelo + pasto vetiver) fue del 99,36% (considerando que el agua residual del café proveniente del beneficiadero tuvo una concentración promedio de ST de 14.587 mg L^{-1}). El porcentaje de reducción de sólidos suspendidos totales (SST) realizado por el suelo y el pasto vetiver fue del 97,46% (considerando que el agua residual del café llegó después del tratamiento primario, con una concentración promedio de SST de 1.180 mg L^{-1}). El porcentaje de reducción de SST realizado por el todo el sistema de tratamiento (tratamiento primario + suelo + pasto vetiver) fue del 99,33% (considerando que el agua residual del café proveniente del beneficiadero tuvo una concentración promedio de SST de 4.454 mg L^{-1})(Figura 1).



Figura 1. Aspecto del agua residual a la salida del beneficiadero, del pretratamiento y del filtro verde.

En promedio, el volumen retenido y evapotranspirado de agua en la experimentación fue de 23,83 L m^2-d^{-1} (incluyendo todos los FV) y de 24,53 L m^2-d^{-1} (para los FV con aplicación de los diferentes tipos de aguas residuales del beneficio del café). Al tomar el promedio de los valores de agua retenida y evapotranspirada, por tipo de agua y tipo de vegetación, estos variaron entre 22,64 L m^2-d^{-1} para los FV regados con agua limpia y conteniendo vegetación natural y 25,25 L m^2-d^{-1} para los FV sembrados con pasto vetiver y regados con aguas residuales del beneficio del café proveniente del tanque tina (Figura 2).

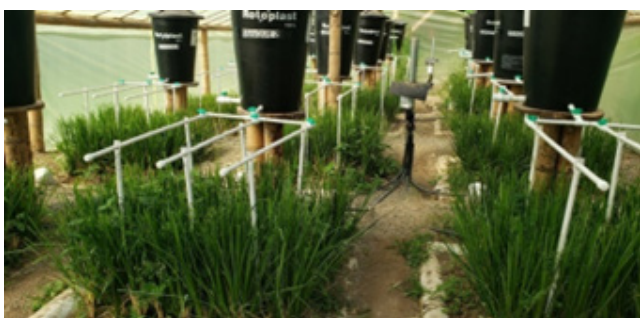


Figura 2. Pasto vetiver como vegetación de los filtros verdes.

El valor promedio de eliminación de la DQO, ST y SST en los FV regados con aguas provenientes del tanque tina fue de 77,51%, 62,01% y 72,37%, respectivamente; para los FV con aplicación de lixiviados fue del 58,24%, 45,37% y 88,63%, respectivamente, y para los FV regados con mieles del Ecomill® fue de 63,50%, 56,06% y 93,51%, respectivamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se encontró, para filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana, sembrados con pasto vetiver y con aplicación de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café, un valor de retención - evapotranspiración (RET) de 23,55 L m^2-d^{-1}.

CONCLUSIONES

En función de los resultados de eliminación de contaminantes puede concluirse que la tecnología de filtros verdes es apta para el tratamiento de las aguas de la finca cafetera (aguas residuales del café y de la vivienda) procedentes del beneficio ecológico del café, presentando unos elevados porcentajes de remoción de carga orgánica. Tanto a escala piloto como a escala de campo, los drenados provenientes de los filtros verdes presentaron, en los diferentes parámetros evaluados, valores que estuvieron dentro de los límites de calidad establecidos en la normativa colombiana en el Decreto 1594 de 1984 y en la Resolución 631 del 2015 respecto a vertimientos a cuerpos de agua superficiales. Cuando los efluentes de los filtros verdes se recirculan en el área sembrada bajo invernadero hasta agotamiento total, se logra el objetivo de cero descargas.

REFERENCIAS

Congreso de la República de Colombia (1997). Ley 373 de 1997. Programa de Uso eficiente y ahorro de agua. 5 p. En Línea. Disponible en Internet: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=342

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., Osorio Ocampo, A. F., Castañeda, S. A., García, M., Harmsen, J., & Bisschops, I. (2018). Tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas en fincas cafeteras. Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/proyecto_gia_manos_al_agu a/publicaciones_tecnologias_apropiadas_para_el_tratamiento_de_aguas_en_fincas

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2019). Boletín Técnico Cenicafé, 42, 1–46. https://www.cenicafe.org/es/publications/BoletinTecnico42.pdf

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022).Tecnología de filtros verdes para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de la finca cafetera. Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0029.

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022). Construya y opere su sistema séptico para el tratamiento de las aguas residuales de la vivienda de su finca cafetera. Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0012

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Estrategias de gestión hídrica para reducir sólidos suspendidos (SS) en aguas de lavado de hortalizas mediante la reducción de suelo y residuos vegetales en la cadena de lavado y la readaptación de un sistema de sedimentación a nivel de finca

Water management strategies to reduce suspended solids (SS) in vegetable wash water by reducing soil and vegetable residues in the washing chain and readapting sedimentation system at the farm level

Heidi Dayana Pascagaza-Rubio[1], Stéphane Godbout[1] and Joahnn Palacios-Rios[1]

RESUMEN

La poscosecha de hortalizas genera grandes volúmenes de aguas de lavado, estimados en 3,5 L por kilogramo de hortalizas. Estas aguas contienen altas concentraciones de nutrientes y sólidos en suspensión (SS), que representan riesgos ambientales al ser vertidas a los cuerpos receptores. En Québec (Canadá), la normativa establece límites de calidad basados en el nivel de riesgo y las características de los cuerpos receptores, lo que representa un desafío para los productores. Este estudio evaluó la eficiencia en la reducción de SS debido a la implementación de estrategias de reducción de residuos vegetales y suelo en el sistema de recepción y la cadena de lavado, así como la readaptación de un sistema de sedimentación con una cortina de turbidez en una finca productora de remolachas y zanahorias en la región de Lanaudière. Se realizaron balances de masa antes y después de las estrategias de reducción, midiendo el caudal y recolectando muestras compuestas de agua durante 1,5 horas de operación continua de lavado. Los resultados evidencian una reducción del 80% de SS debido a las estrategias implementadas en la cadena de lavado y una eficiencia adicional del 75% dado a la readaptación del sistema de sedimentación, reduciendo la concentración de SS de 845 mg/L a 179 mg/L en la descarga final al medio receptor.

Palabras clave:
Aguas de lavado
Cortina de turbidez
Gestión hídrica
Poscosecha
Sedimentación.

ABSTRACT

Post-harvest vegetable processing generates large volumes of wash water, estimated at 3,5 L per kilogram of vegetables. This wash water contains high concentrations of nutrients and suspended solids (SS), which pose environmental risks when discharged into receiving bodies. In Quebec (Canada), regulations establish quality limits based on the level of risk and the characteristics of the receiving environment, which represents a challenge for producers. This study evaluated the efficiency of SS reduction by implementing plant and soil residue reduction strategies in the receiving system and washing chain, as well as the adaptation of a sedimentation unit with a turbidity curtain on a beet and carrot farm in the Lanaudière region. Mass balances were performed before and after the modifications, measuring flow rates and collecting composite water samples during 1,5 hours of continuous washing operations. The results showed an 80% reduction in SS from the washing-chain strategies and an additional 75% reduction from the sedimentation system adaptation, lowering SS concentrations from 845 mg/L to 179 mg/L in the final discharge to the receiving environment.

Keywords:
Wash water
Turbidity curtain
Water management
Post-harvest
Sedimentation

[1]Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA), Québec, Canada.
*Corresponding author: heidi.pr@irda.qc.ca

En el marco del Plan de Agricultura Durable de Québec (2020-2030), la optimización de la gestión hídrica en el sector agrícola se reconoce como una prioridad para reducir la huella ambiental. El reglamento sobre regulación de actividades en función de su impacto medioambiental (REAFIE) del ministerio del medio ambiente, lucha contra el cambio climático, fauna y parques (MELCCFP) dispone que hacia el año 2030 las explotaciones agrícolas dedicadas al lavado de frutas y hortalizas deberán cumplir con límites de calidad de aguas de lavado diferenciados según el tamaño de la explotación y las características del medio receptor. El ministerio de agricultura, pesca y alimentación (MAPAQ) promueve proyectos de investigación aplicada y programas de apoyo financiero para impulsar la adopción de prácticas innovadoras para la gestión hídrica en la búsqueda de la adaptabilidad a la realidad de los productores. En este contexto, el instituto de investigacion y desarrollo agroambiental (IRDA), en colaboración con el MELCCFP, el MAPAQ y productores de hortalizas de Québec, desarrolla un proyecto de investigación orientado a caracterizar aguas de lavado de hortalizas y evaluar estrategias de reducción de contaminantes antes de ser vertidas al medio receptor.

Las estrategias de reducción de suelo y residuos vegetales en el sistema de recepción y la cadena de lavado (Généreux et al., 2013), así como la implementación de técnicas utilizadas en otros sectores para favorecer la sedimentación y retención de solidos permitirían reducir la carga contaminante en terminos de SS y otros contaminantes vertidos a los cuerpos receptores. Mediante la reducción de suelo y residuos vegetales se favorecería la disminución de la concentración de SS, parámetro reglamentado en el REAFIE para las aguas de lavado.

El presente estudio resume los resultados de un escenario comparativo aplicado en una finca participante, en el cual se diferencian las eficiencias alcanzadas mediante prácticas de reducción de suelo y residuos vegetales asi como la readaptación de un sistema de sedimentación mediante la incorporación de una cortina de turbidez.

El primer escenario, previo a la implementación de mejoras, el sistema de recepción y lavado de la finca participante no disponía de estrategias de remoción de suelo ni de residuos vegetales. En consecuencia, los sólidos desprendidos en la operación de lavado de hortalizas eran vertidos a un sistema de sedimentación exterior sin un pre-tratamiento. El segundo escenario corresponde a las modificaciones implementadas en el sistema de recepción y lavado, orientadas a la reducción de suelo y residuos vegetales. Estas mejoras incluyeron: (i) la incorporación de un transportador tipo Hedgehog (puntas de erizo) para optimizar el transporte de las hortalizas hacia la línea de lavado y disminuir la carga de suelo antes de su ingreso a la lavadora; y (ii) la instalación de una banda filtrante bajo la lavadora, destinada a interceptar suelo y residuos vegetales desprendidos durante el proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

En una finca dedicada a la producción de remolachas y zanahorias, ubicada en la región de Lanaudière, en la provincia de Québec (Canadá), se llevó a cabo un análisis comparativo antes y después de la implementación de mejoras en la cadena de lavado y en el sistema de sedimentación exterior existente.Se realizaron dos balances de masa durante la operación en continuo de lavado de remolachas, uno antes y otro después de la implementación de las modificaciones en el sistema de recepción, de lavado y en la unidad de sedimentación exterior existente.

Las estrategias para reducir suelo y residuos vegetales en el sistema de recepción y la cadena de lavado implementadas en el caso de estudio incluyeron, un transportador tipo Hedgehog tras la recepción de hortalizas antes del lavado y una banda filtrante bajo la lavadora. El transportador Hedgehog consta de una banda inclinada giratoria con picos de caucho que permite desprender el suelo de las hortalizas después de la recepción de las hortalizas provenientes del campo. La banda filtrante, localizada bajo la lavadora permite la intercepción de suelo y residuos vegetales desprendidos de la operación de lavado. La readaptación del sistema de sedimentación consto en la incorporación de una cortina de turbidez en un sistema de sedimentación exterior existente. La cortina de turbidez funciona como barrera flotante, permite reducir la velocidad del flujo y uniformizarlo en la sección transversal de la unidad de sedimentación, así como favorecer la retención de

sólidos en la primera sección. Las aguas de lavado son dirigidas al sistema de sedimentación externo de un tiempo de retención de 8 horas, en el que se instaló una cortina de turbidez.

En los bilanes de masa durante 1,5 horas de operación de lavado en continuo se cuantificaron todas las entradas y salidas a través del pesado del material entrante y saliente y la medida continua del caudal. Para cada balance se recolectaron muestras compuestas de agua a la salida de la lavadora y la salida al medio receptor (500 mL cada 30 segundos durante un periodo de 15 minutos). 12 muestreos adicionales a lo largo de la sesión de lavado (6 muestreos de lavado de remolacha y 6 muestreos de lavado de zanahorias) del año 2024 fueron realizados después de las modificaciones implementadas para hacer el seguimiento de la eficiencia del sistema.

Las muestras compuestas de agua se analizaron en laboratorio para determinar parámetros fisicoquímicos, la concentración de sólidos suspendidos (SS) se empleó como parámetro indicador de la eficiencia de las modificaciones implementadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los escenarios presentan la cuantificación de entradas y salidas de dos jornadas de lavado de remolachas, antes y después de las modificaciones implementadas en la cadena de lavado y en el sistema de sedimentación. Las cantidades se expresan en kilogramos por cada 1.000 kilogramos de hortalizas recolectadas de campo que ingresan al sistema.

La cuantificación de suelo y residuos vegetales en la etapa de recepción y lavado se realizó mediante el pesado del material desprendido que fue recolectado en contenedores. La cantidad de suelo presente en las aguas de lavado se determinó mediante la medición de los solidos sedimentables y los solidos suspendidos. Los sólidos sedimentables se depositan rápidamente en 10 minutos por acción de la gravedad, mientras que los sólidos suspendidos permanecen dispersos en el agua. La cuantificación de legumbres se llevó a cabo mediante el pesado de cajas de hortalizas clasificadas y embaladas.

En el primer escenario, representado en la figura 1, no se ha implementado ninguna modificación. Se observa que, en el sistema de recepción de cajas de hortalizas, el suelo desprendido asciende a 76,1 kg. Tras el proceso de lavado, las cantidades de entrada de suelo al sistema de sedimentación son de 13,8 kg en forma de sólidos suspendidos y 49,2 kg como sólidos sedimentables. Bajo este escenario, la concentración promedio a la salida del sistema de laguna es de 845 mg/L, lo que equivale a 2,89 kg de suelo por cada 1.000 kg de hortalizas que ingresan a la cadena.

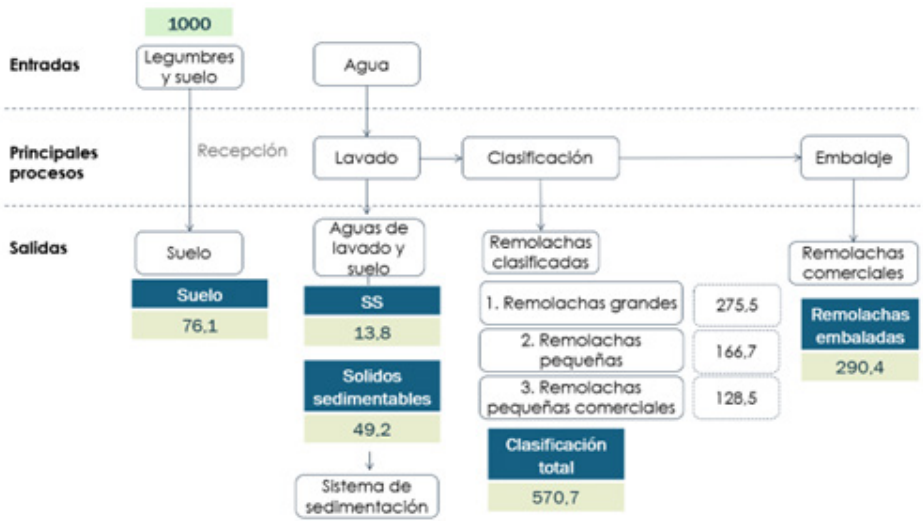


Figura 1. Balance de masa de un lavado típico de remolachas antes de la implementación de estrategias de remoción de suelo, material y vegetal y modificación del sistema de sedimentación (valores en kg).

El segundo escenario, representado en la figura 2, muestra los resultados tras la implementación de los sistemas de reducción y el reacondicionamiento del sistema de sedimentación. Se observa que, después del paso por el transportador tipo Hedgehog (tipo erizo), se reduce la carga de suelo en 55 kg. El sistema ubicado bajo la lavadora, que emplea una banda filtrante, permite disminuir en 29,9 kg de residuos vegetales y de suelo. Tras el proceso de lavado las cantidades de entrada de suelo al sistema de sedimentación son de 6,3 kg en forma de sólidos suspendidos y 13,8 kg como sólidos sedimentables. En este escenario, la concentración promedio a la salida del sistema de sedimentación es de 179 mg/L de sólidos suspendidos, lo que representa 0,61 kg de suelo por cada 1.000 kg de hortalizas procesadas.

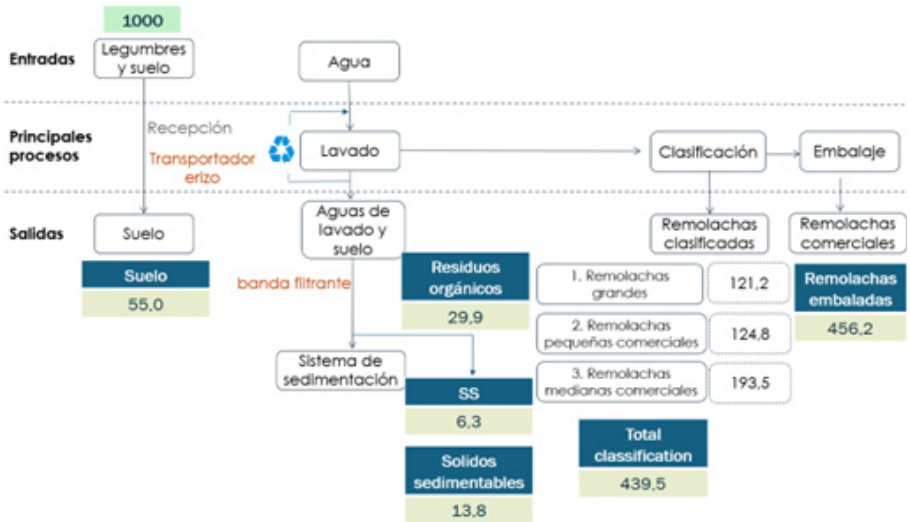


Figura 2. Balance de masa de un lavado típico de remolachas después de la implementación de estrategias de remoción de suelo, material y vegetal y modificación del sistema de sedimentación (valores en kg).

La Tabla 1 presenta las eficiencias en la reducción de SS después de la implementación del sistema de remoción de suelo y material vegetal y la adaptación del sistema de sedimentación. El sistema de recepción acoplado al transportador tipo Hedgehog aporta una reducción del 52% de SS, mientras que la banda filtrante contribuye con un aporte adicional del 28%. En conjunto, las técnicas aplicadas alcanzan una reducción total del 80% de SS.

Table 1. Reducción de SS después de las modificaciones en la línea de lavado y en el sistema de sedimentación.

Tipo de sistema	Descripción	% Reducción de SS
Sistema de reducción de suelo y material vegetal	Recepción + transportador Hedgehog	52
	Banda filtrante	28
	Total	**80**
Sistema de sedimentación	Sistema de sedimentación	59
	Cortina de turbiedad	16
	Total	**75**

Por su parte, el sistema de sedimentación, con un tiempo de retención hidráulico de 8 horas, logra una reducción del 59 %, a la que se suma un 16 % adicional proporcionado por la cortina de turbiedad. En total, esta unidad de tratamiento de aguas de lavado aporta un 75 % de reducción de sólidos suspendidos.

La implementación de técnicas previas a alcanzar una unidad de tratamiento de aguas de lavado demuestra un impacto significativo en la reducción de los aportes de sólidos suspendidos al cuerpo receptor. Los sistemas de sedimentación con altos tiempos de retención favorecen la retención de partículas gruesas e intermedias, como

arenas y limos. La adopción de estrategias empleadas en otros sectores, orientadas a la reducción de sólidos antes de su llegada a los cuerpos receptores, muestra un potencial en mejorar la eficiencia de un sistema de sedimentación, esta y otras tecnologías adaptables en el tratamiento de aguas agrícolas requiere evaluación y cuantificación. El mantenimiento regular de los sistemas de sedimentación exteriores durante la operación de lavado, mediante la remoción de los sólidos acumulados, resultaría esencial para garantizar el funcionamiento de un sistema de sedimentación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ministerio de Relaciones Internacionales y de la Francofonía (MRIF) por su apoyo financiero en el marco de la cooperación Québec–Colombia 2024-2026. Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de Québec (MAPAQ) por el financiamiento otorgado al proyecto sobre gestión ambiental de aguas residuales agrícolas.

CONCLUSIÓN

Las estrategias de eliminación de residuos vegetales y del suelo implementadas aguas arriba de los sistemas de tratamiento de agua de lavado de hortalizas demostraron una alta eficiencia, logrando una reducción de hasta el 80 % de los SS dentro de la línea de lavado y una reducción adicional del 75 % mediante un sistema de sedimentación con un tiempo de retención hidráulica de 8 horas. Estas medidas también dan lugar a reducciones sustanciales de otros contaminantes. Dar prioridad a las técnicas de eliminación de residuos vegetales y suelo en el sistema de recepción y lavado reduce significativamente la concentración de contaminantes vertidos al medio receptor y posteriormente puede reducir los costes asociados al tratamiento posterior de las aguas residuales.

REFERENCIAS

Brassard, P., Généreux. M, Côté. C, Godbout. S, Belzile, L. 2014. Solutions optimales pour une gestion durables des eaux de lavage de légumes à l'échelle de la ferme : projets pilotes. Rapport final. Programme canadien d'adaptation agricole.

Généreux, M., Larouche, L-P. Côté, C. Godbout, S. Brossard, S. Hamel, C. Karasira, S, Pelletier & Ramirez, A. A. 2013. Proposition des solutions intégrées pour une gestion durables des eaux de lavage de légumes. Rapport final. Programme canadien d'adaptation agricole.

Gouvernement du Québec. 2020. Agir pour une agriculture durable. Plan 2020 -2030. ISBN 978-2-550-87792-9.

Ministère de l'Environnement, de la lutte contre les changements climatiques, de la faune et des Parcs (MELCCFP). 2025. Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE). Chapitre XIII. Lavage de fruits et de légumes.

Visser, B., C, Lalonde, T. Brook. V, Hilborn. D. Nemeth, R. Shortt & J. Van de Vegte. 2017. Guide sur le traitement de l'eau de lavage des légumes et des fruits. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO). 122 pages.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Huella hídrica en cultivos de palma de aceite bajo diferentes condiciones agroecológicas de Colombia

Water footprint in oil palm crops under different agroecological conditions in Colombia

Arley Zapata-Hernández[1], Tulia Delgado[1], Julián Monroy[1], Andrés Tupaz[1], Alejandro Camelo[2] and Nolver Arias[1]

Palabras clave:
Híbrido OxG
Huella hídrica
Palma de aceite
Sostenibilidad
Zonas agroecológicas

RESUMEN

Este estudio evaluó la huella hídrica en cultivos de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) y el híbrido interespecífico OxG bajo diferentes condiciones agroecológicas de Colombia. La investigación se realizó en tres plantaciones ubicadas en las zonas oriental, central y norte durante el período 2019-2023. Se aplicó la metodología del Manual de Evaluación de Huella Hídrica de la Water Footprint Network, calculando los componentes verde, azul y gris. Los resultados mostraron variaciones significativas entre zonas: la zona central presentó los menores valores (741-907 $m^3 t^{-1}$), seguida por la zona oriental (1.245-2.173 $m^3 t^{-1}$) y la zona norte (1.600-1.800 $m^3 t^{-1}$). El híbrido OxG demostró consistentemente una menor huella hídrica comparado con *E. guineensis*, con reducciones del 43% en la zona oriental y 18% en la zona central. La distribución de componentes varió según las condiciones climáticas regionales, con mayor participación de la huella azul en zonas de mayor déficit hídrico. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado internacionalmente (560-1.166 $m^3 t^{-1}$), confirmando la competitividad de la palmicultura colombiana. El híbrido OxG presenta ventajas en eficiencia hídrica, siendo una alternativa sostenible para diferentes condiciones agroecológicas del país.

Keywords:
OxG hybrid
Water footprint
Oil palm
Sustainability
Agroecological zones

ABSTRACT

This study assessed the water footprint of oil palm crops (*Elaeis guineensis* Jacq.) and the interspecific hybrid OxG under various agroecological conditions in Colombia. Conducted between 2019 and 2022 across three plantations located in the eastern, central, and northern regions, the research utilized the Water Footprint Network Assessment Manual methodology to calculate green, blue, and grey components of water usage. The results revealed significant variations among the zones: the central zone exhibited the lowest water footprint values (741-907 $m^3 t^{-1}$), followed by the eastern zone (1,245-2,173 $m^3 t^{-1}$) and the northern zone (1,600-1,800 $m^3 t^{-1}$). Notably, the OxG hybrid consistently showed a lower water footprint compared to *E. guineensis*, with reductions of 43% in the eastern zone and 18% in the central zone. The distribution of water footprint components varied according to regional climatic conditions, with a higher proportion of blue water footprint observed in areas experiencing greater water deficits. The values obtained align with internationally reported ranges (560-1,166 $m^3 t^{-1}$), affirming the competitiveness of Colombian palm cultivation. Furthermore, the OxG hybrid demonstrates advantages in water efficiency, making it a sustainable alternative suitable for diverse agroecological conditions in the country.

[1]Cenipalma, Paratebueno, Cundinamarca, Colombia. adzapata@cenipalma.org; tdelgado@cenipalma.org; jmonroy@cenipalma.org; atupaz@cenipalma.org; narias@cenipalma.org; narias@cenipalma.org
[2]Universidad Surcolombiana, Huila, Colombia. u20181167446@usco.edu.co

CC BY NC SA

La palma de aceite (*Elaeis guineensis Jacq.)* representa uno de los cultivos oleaginosos más importantes a nivel mundial, con Colombia posicionándose como el cuarto productor global y el primero en América (Fedepalma, 2024). En el país, las áreas sembradas alcanzaron 576.800 hectáreas en 2022, distribuidas en cuatro zonas agroecológicas: norte (99.637 ha), central (191.905 ha), oriental (265.283 ha) y suroccidental (19.975 ha). La creciente importancia del sector palmicultor colombiano ha generado la necesidad de evaluar la sostenibilidad de los recursos hídricos en su producción.

La huella hídrica, definida como un indicador del uso de agua dulce que considera tanto el uso directo como indirecto del agua (Hoekstra et al., 2011), comprende tres componentes: verde (evaporación de agua lluvia), azul (evaporación de agua de riego) y gris (volumen de agua necesario para diluir contaminantes). La variabilidad climática y la intensificación del riego han incrementado la importancia de evaluar la sostenibilidad hídrica en la producción palmera.

Los estudios internacionales reportan huellas hídricas variables: 1.063 $m^3\ t^{-1}$ en Tailandia (Suttayakul et al., 2016), 1.166 $m^3\ t^{-1}$ en Malasia (Hashim et al., 2014) y entre 560 y 1.140 $m^3\ t^{-1}$ en Indonesia (Safitri et al., 2018). En Colombia, los estudios son limitados, con reportes de 516,7 L kg^{-1} en el piedemonte llanero (Manuel et al., 2022) y valores entre 515 y 864 $m^3\ t^{-1}$ en la zona oriental (Barón & Jiménez, 2020).

El híbrido interespecífico OxG (*Elaeis oleifera x E. guineensis*) presenta características superiores como tolerancia a la pudrición del cogollo, menor tasa de crecimiento y alta adaptabilidad (Espinosa et al., 2021), pero su huella hídrica no ha sido evaluada comparativamente con *E. guineensis* bajo condiciones colombianas.

El objetivo de este estudio fue evaluar la huella hídrica de *E. guineensis* y el híbrido *OxG* en las principales zonas palmeras de Colombia, proporcionando información para la toma de decisiones orientadas hacia una producción más sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

La investigación se realizó en tres plantaciones comerciales ubicadas en diferentes zonas agroecológicas palmeras de Colombia: zona oriental, zona central y zona norte. Los estudios abarcaron cultivares de *E. guineensis Jacq.* e híbrido OxG en etapas adulta y de desarrollo.

Metodología de cálculo de huella hídrica

La estimación se basó en el Manual de Evaluación de Huella Hídrica de la Water Footprint Network (Hoekstra et al., 2011) y la norma ISO 14046. Se calcularon los tres componentes: Huella hídrica verde (Ecuación 1), Huella hídrica azul (Ecuación 2) y Huella hídrica gris (Ecuación 3). El coeficiente de lixiviación y escorrentía para estimar la huella hídrica gris se estimó teniendo en cuenta las condiciones de drenaje, atmosféricas, tasas y épocas de aplicación de agroquímicos, condiciones de suelo y prácticas de manejo (Franke et al., 2013). Para estimar los diferentes flujos de agua se usó el balance hídrico diario a escala de Unidad de Manejo Agronómico – UMA (Nel & Bautista, 2012), donde se tuvo en cuenta el tipo de cultivar, edad, características del suelo y riego aplicado.

Análisis de datos

Para estimar los diferentes flujos de agua se realizó el balance hídrico diario a escala de Unidad de Manejo Agronómico – UMA (Nel & Bautista, 2012), considerando variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento), propiedades del suelo (textura, humedad a capacidad de campo, humedad en el punto de marchitez permanente densidad aparente e infiltración) y características del cultivo (edad, profundidad radicular, coeficiente de cultivo). Los datos de productividad, aplicación de fertilizantes y riego se registraron para el período 2019-2023. Se compararon los resultados entre zonas y mediante análisis descriptivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la huella hídrica mostraron diferencias significativas entre zonas agroecológicas, cultivares y etapas de desarrollo (Figura 1). En la zona oriental, *E. guineensis* presentó una huella hídrica promedio de 2.173 $m^3\ t^{-1}$, mientras que el híbrido OxG registró 1.245 $m^3\ t^{-1}$, evidenciando una reducción del 43% en

el consumo hídrico del material híbrido. La distribución de componentes para *E. guineensis* fue: huella azul 32%, verde 74% y gris 20%, mientras que para OxG fue: azul 36%, verde 52% y gris 12%.

En la zona norte, la huella hídrica fue considerablemente mayor, con valores de 1.600 m^3 t^{-1} para *E. guineensis* y 1.800 m^3 t^{-1} para OxG en etapa de desarrollo. La distribución mostró mayor dependencia del riego (huella azul: 10% en *E. guineensis y* 41% en OxG), reflejando las condiciones de mayor déficit hídrico características de esta región. La huella verde representó 59% y 32%, y la gris 31% y 28% para *E. guineensis* y OxG respectivamente.

La zona central presentó los valores más bajos de huella hídrica, con 907 m^3 t^{-1} para *E. guineensis* y 741 m^3 t^{-1} para OxG. Esta reducción se atribuye principalmente a condiciones climáticas más favorables que minimizan los requerimientos de riego suplementario. La distribución fue similar entre cultivares: huella azul (10% y 9%), verde (59% y 60%) y gris (31% para ambos).

Estos resultados son consistentes con estudios internacionales que reportan variaciones de 560-1.166 m^3 ton^{-1} (Hashim et al., 2014; Safitri et al., 2018), aunque los valores para Colombia se encuentran en el rango superior. La variabilidad observada refleja las diferencias climáticas regionales, donde la zona central, con precipitaciones más

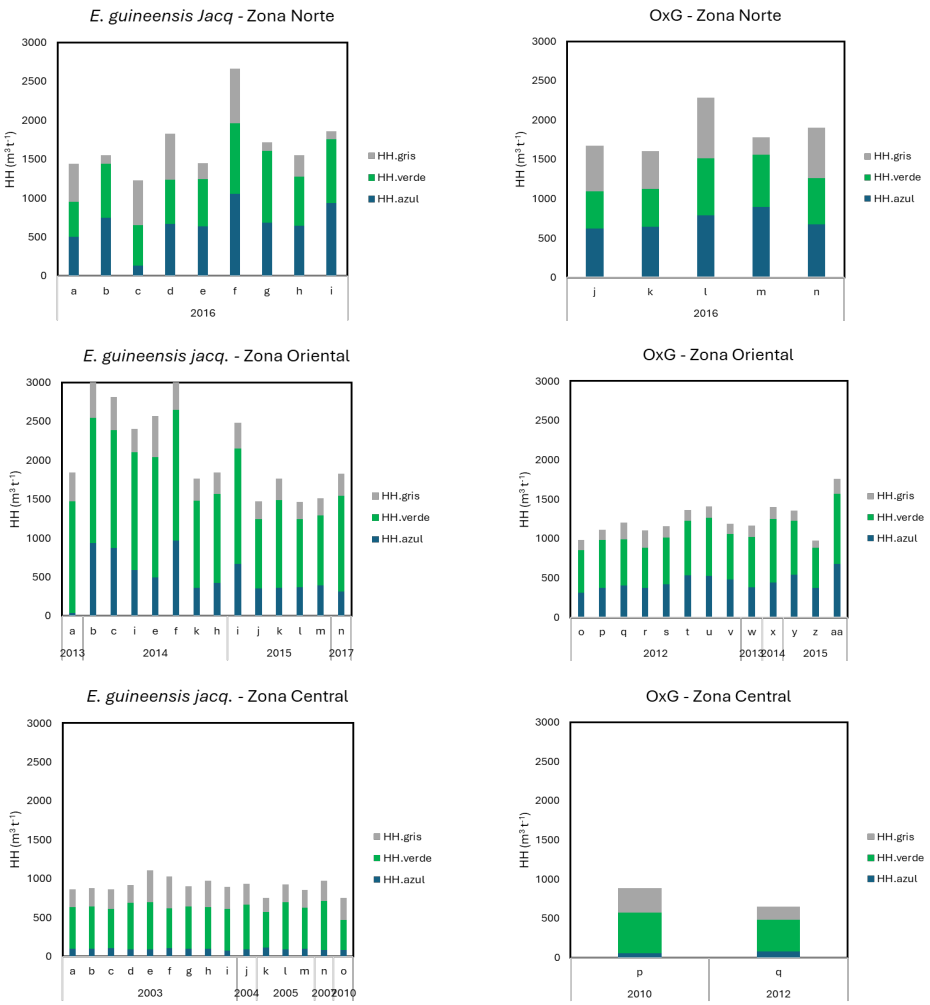


Figura 1. Resultados de estimación de la huella hídrica en las diferentes condiciones agroecológicas evaluadas y diferentes años de siembra de los cultivos. Cada letra distinta indica un lote diferente. Columna izquierda, *Elaeis guineensis jacq.*; columna derecha, Híbrido *OxG.* La fila superior, intermedia e inferior son los valores estimados para las zonas norte, oriental y central respectivamente. HH: Huella Hídrica.

regulares, particularmente en la plantación evaluada, no requiere de riego suplementario en comparación con las zonas oriental y norte.

El mejor desempeño del híbrido OxG, especialmente en las zonas oriental y central, sugiere una mayor eficiencia en el uso del agua, lo cual coincide con estudios previos que destacan las características adaptativas superiores de este material (Espinosa et al., 2021). La menor huella gris del híbrido indica también un manejo agronómico más eficiente en el uso de agroquímicos. En este trabajo no se tuvo en cuenta el análisis de las condiciones sanitarias limitantes en los lotes especialmente con *E. guineensis* que afectan la productividad y por lo tanto los valores estimados de huella hídrica.

La relación inversa observada entre productividad y huella hídrica confirma que sistemas más eficientes no solo optimizan el uso del agua, sino que también incrementan la sostenibilidad económica del cultivo.

CONCLUSIÓN

La evaluación de la huella hídrica en cultivos de palma de aceite bajo diferentes condiciones agroecológicas de Colombia demostró variaciones significativas entre zonas, cultivares y etapas de desarrollo. La zona central presentó los menores valores de huella hídrica (741-907 $m^3\ t^{-1}$), seguida por la zona oriental (1.245-2.173 $m^3\ t^{-1}$) y la zona norte (1.600-1.800 $m^3\ t^{-1}$), reflejando las diferencias climáticas regionales y los requerimientos de riego suplementario.

El híbrido OxG mostró consistentemente una menor huella hídrica comparado con *E. guineensis* Jacq., con reducciones del 43% en la zona oriental y 18% en la zona central, indicando una mayor eficiencia en el uso del agua. Esta ventaja se atribuye a las características de mayor tolerancia a plagas y enfermedades del material híbrido y mayor potencial productivo.

Los resultados obtenidos (741-2.173 $m^3\ t^{-1}$) se encuentran dentro del rango reportado internacionalmente, confirmando la competitividad de la palmicultura colombiana en términos de sostenibilidad hídrica. La metodología desarrollada constituye una herramienta valiosa para la toma de decisiones orientadas hacia la optimización del uso del recurso hídrico y la selección de materiales genéticos más eficientes en diferentes condiciones agroecológicas del país.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Fondo de Fomento Palmero (FFP) administrado por Fedepalma, por la financiación de esta investigación.

REFERENCIAS

Barón, A., & Jiménez, J. (2020). Evaluación de la huella hídrica en el cultivo de palma de aceite en el Campo Experimental Palmar de las Corocoras. Cenipalma.

Espinosa, J. C., Cifuentes, J. D., Gómez, G. A., Quintero, O., Gómez, C., & Ruiz-Delgado, J. (2021). Guía ambiental para la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. Fedepalma.

Fedepalma. (2024). Anuario estadístico 2024: La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite.

Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013). Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines, Value of Water Research Report Series No. 65. UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Hashim, Z., Muhamad, H., & Subramaniam, V. (2014). Water footprint: part 2 - FFB production for oil palm planted in Malaysia. Journal of Oil Palm Research, 26(4), 298-307.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan.

IDEAM. (2022). Estudio Nacional del Agua 2022. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Manuel, J., Tovar-Hernández, N. A., & Aurelio, M. (2022). Water footprint of fresh fruit bunches (FFBs) of oil palm in the Piedemonte Llanero, Colombia. Ingeniería y Competitividad, 24(1), 1-8.

Nel, P., & Bautista, F. (2012). Conformación de Unidades de Manejo Agronómico (UMA) en palma de aceite. Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: Guía para facilitadores.

Safitri, L., Hermantoro, H., Purboseno, S., Kautsar, V., Saptomo, S., & Kurniawan, A. (2018). Water Footprint and Crop Water Usage of Oil Palm (*Eleasis guineensis*) in Central Kalimantan. Water, 11(1), 1-16.

Suttayakul, P., H-Kittikun, A., Suksaroj, C., Mungkalasiri, J., Wisansuwannakorn, R., & Musikavong, C. (2016). Water footprints of products of oil palm plantations and palm oil mills in Thailand. Science of the Total Environment, 542, 521-529.

EJE TEMÁTICO 6
Instrumentación, control y robótica en el sector agrario Colombia



http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Predicción temprana de heladas en agroecosistemas de montaña mediante algoritmos de aprendizaje de máquinas

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Early frost prediction in mountain agroecosystems using machine learning algorithms

Evelin Calderón Caro[1]*, Darío Antonio Castañeda Sánchez[2], John Willian Branch Bedoya[2], and John Ballesteros Parra[2]

RESUMEN

Palabras clave:
Agricultura de precisión
Clasificación binaria
Ecosistemas andinos
Regresión de temperatura mínima
Riesgo agroclimático

Las heladas constituyen uno de los fenómenos climáticos de mayor impacto en los agroecosistemas de montaña en Colombia, especialmente en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, donde se concentran cultivos de flores y tubérculos altamente vulnerables. Este estudio presenta los resultados de una investigación de maestría orientada a la predicción temprana de heladas mediante algoritmos de aprendizaje de máquinas. Se analizaron datos de trece estaciones meteorológicas en nueve municipios, considerando variables como temperatura, humedad relativa, punto de rocío, radiación fotosintéticamente activa y precipitación. Cuatro de los cinco modelos evaluados alcanzaron métricas superiores al 91 % en la detección de heladas, siendo la potenciación del gradiente el de mayor precisión. Asimismo, los modelos de predicción de temperatura mínima presentaron errores menores a 0,55 °C para ventanas de una hora. Estos resultados constituyen un insumo para el desarrollo de sistemas de alerta temprana en agroecosistemas de montaña en el país.

ABSTRACT

Keywords:
Precision agriculture
Binary classification
Andean ecosystems
Minimum temperature regression
Agroclimatic risk

Frost events are among the most impactful climatic phenomena in mountain agroecosystems in Colombia, particularly in the departments of Cundinamarca and Boyacá, where flower and tuber crops are highly vulnerable. This study presents the results of a master's research focused on early frost prediction using machine learning algorithms. Data from thirteen weather stations in nine municipalities were analyzed, considering variables such as temperature, relative humidity, dew point, photosynthetically active radiation, and precipitation. Four out of five evaluated models achieved performance metrics above 91% in frost detection, with gradient boosting showing the highest accuracy. Likewise, minimum temperature prediction models reported errors below 0.55 °C for one-hour time windows. These results provide valuable input for the development of early warning systems in mountain agroecosystems in the country.

[1]Ingeniera Agrónoma. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
[2]Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
*Corresponding author: evcalderonca@unal.edu.co

CC BY NC SA

Las heladas son fenómenos meteorológicos caracterizados por la disminución de la temperatura del aire a valores iguales o inferiores a 0 °C cerca de la superficie del suelo, lo que genera la formación de cristales de hielo en los tejidos vegetales (Snyder & de Melo-Abreu, 2010). Este proceso ocasiona daños fisiológicos severos en los cultivos, afectando tanto la producción como la calidad de los productos agrícolas. En regiones de montaña como la sabana de Bogotá, los departamentos de Cundinamarca y Boyacá concentran una alta vulnerabilidad, debido a la presencia de cultivos de flores, papa y hortalizas, donde los eventos de helada representan pérdidas económicas significativas (González & Torres, 2012).

Tradicionalmente, la predicción de estos eventos se ha basado en métodos estadísticos y modelos físicos, los cuales presentan limitaciones para capturar la compleja interacción entre variables meteorológicas en condiciones tropicales. En este contexto, la inteligencia artificial (IA) se ha posicionado como una herramienta eficaz para el análisis de grandes volúmenes de datos climáticos y la identificación de patrones no lineales. Dentro de este campo, el aprendizaje de máquinas ofrece modelos capaces de realizar tareas de clasificación y regresión, aplicables a la detección y predicción de eventos de helada a partir de información meteorológica histórica.

De este modo, el presente estudio se centra en evaluar algoritmos de aprendizaje de máquinas para la predicción temprana de heladas en agroecosistemas de montaña en Colombia, aportando evidencia científica para el desarrollo de sistemas de alerta temprana en el sector agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron datos históricos de trece estaciones meteorológicas ubicadas en nueve municipios de Cundinamarca. Las variables registradas incluyeron temperatura del aire, humedad relativa, punto de rocío, radiación fotosintéticamente activa (RFA) y precipitación. Los registros abarcaron el periodo comprendido entre 2017 y 2022, con una resolución horaria (24 registros por día), para un total de 137.496 observaciones. Para el análisis, se consideraron únicamente los datos correspondientes a la temporada seca, definida entre los meses de noviembre y febrero. El proceso de limpieza de datos incluyó la detección de valores perdidos, inconsistentes, duplicados y atípicos, los cuales fueron imputados mediante el método KNNImputer y posteriormente estandarizados con *StandardScaler* para evitar efectos de escala. Solo se consideraron los días con veinticuatro registros completos.

El conjunto de datos se diseñó para dos enfoques: clasificación binaria (ocurrencia/no ocurrencia de heladas) y regresión (predicción de la temperatura mínima horaria). Para el modelado, se dividió en tres subconjuntos: 60% para entrenamiento con validación cruzada, 20% para validación y 20% para pruebas.

Para la clasificación se implementaron y compararon cinco algoritmos de aprendizaje de máquinas: regresión logística, árboles de decisión, bosques aleatorios, máquinas de soporte vectorial y potenciación del gradiente. Su desempeño se evaluó mediante validación cruzada, considerando métricas como exactitud, precisión, sensibilidad, especificidad y F1-score. La optimización de los modelos se llevó a cabo mediante el uso de *Pipeline* y el método *GridSearchCV* de la librería Scikit-learn, lo que permitió ajustar de manera sistemática los hiperparámetros de cada algoritmo (Anexo 1). Para el entrenamiento, se consideró únicamente la información de las variables climáticas registrada hasta las 16:00 horas de cada día, con el fin de disponer de una ventana de predicción de 14 horas que posibilitara la implementación oportuna de estrategias de mitigación frente a la ocurrencia de heladas.

En el caso de la regresión, cuyo objetivo fue la predicción de la temperatura mínima, se implementaron dos enfoques: un modelo de bosques aleatorios, en el que se ajustaron el número de árboles (100–1000) y de variables por nodo (3–50) mediante *Grid Search* y RMSE, y un modelo de red neuronal multicapa, configurado con una capa de entrada de variables climáticas horarias, capas ocultas con entre 1 y 30 neuronas y función de activación sigmoidea, y una capa de salida lineal. Ambos modelos fueron entrenados con el conjunto de entrenamiento y evaluados en los subconjuntos de validación y prueba. En la Figura 1 se presenta el flujo metodológico implementado para la detección de heladas.

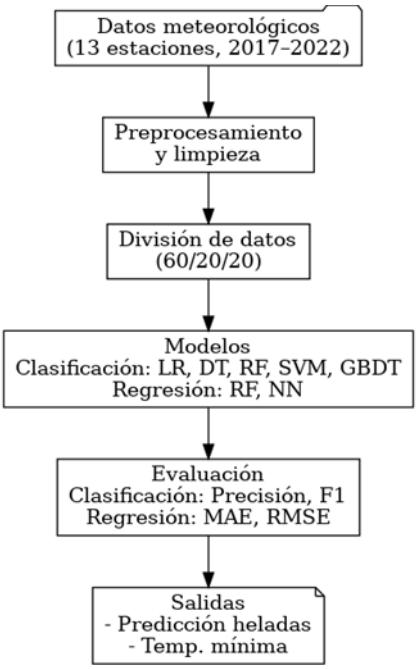


Figura 1. Flujo metodológico implementado para la detección de heladas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento atmosférico de las horas previas a un evento de helada (EH) se caracteriza por condiciones secas, con baja humedad relativa, acompañadas de una reducción de la nubosidad entre las 11:00 y las 14:00 horas, lo que incrementa la radiación térmica emitida desde el suelo hacia la atmósfera (Arribillaga et al., 2020). En este contexto, la presencia de vientos de baja velocidad (<7,2 km h^{-1}) impide compensar la pérdida de energía por radiación, lo que ocasiona un descenso progresivo de la temperatura desde las primeras horas de la noche hasta la madrugada, alcanzando valores por debajo de 0 °C (González & Torres, 2012; Snyder & de Melo-Abreu, 2010). Estos hallazgos aportan evidencia científica para la implementación de sistemas de alerta temprana en agroecosistemas de montaña, donde la detección de estos umbrales críticos permite anticipar con varias horas de antelación la ocurrencia de una helada.

También se evidenció que la ocurrencia de eventos de helada está asociada con temperaturas en la noche de 9,3 ± 1,7 °C, 7,5 ± 2,0 °C, 5,9 ± 2,0 °C y 4,8 ± 1,9 °C para las 20:00, 21:00, 22:00 y 23:00 horas; humedad de 33.6 ± 11.0% a las 12:00 horas y entre 53.5 y 64.6 ± 18.1% para el intervalo de horas entre las 18:00 y 19:00. Adicionalmente, el punto de rocío con valores entre 1.5 y 2.5 ± 2.9 °C entre las 5:00 y las 7:00 horas e inferiores a 5.0 ± 3.6 °C entre las 17:00 y 23:00 horas indican la ocurrencia de una posible helada.

En cuanto a la predicción de este fenómeno se encontró que cuatro de los cinco modelos de clasificación alcanzaron métricas superiores al 91%, siendo la potenciación del gradiente (GBDT) el más robusto en la detección de heladas (Tabla 1). Para la predicción de la ocurrencia de heladas también se han implementado otros algoritmos como el K-vecinos más cercanos (Cadenas et al., 2020), el cual fue entrenado con siete variables climáticas (humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, precipitación, punto de rocío, déficit de presión de vapor y temperatura) monitoreadas con una frecuencia de un registro cada cinco minutos, para la predicción de este fenómeno con una ventana de tiempo de una hora. El modelo desarrollado por estos autores presentó una exactitud y una tasa de verdaderos negativos (Ac = 0,96 y TNR = 0,98) superior a los encontrados con los diferentes métodos en la presente investigación; sin embargo, la tasa de verdaderos positivos y la puntuación F_1 fue inferior (TPR = 0,88 y F_1 = 0,88).

Tabla 1. Métricas de evaluación del rendimiento de los modelos de clasificación en el conjunto de datos de validación.

Métrica	RL[1]	DT[2]	SVM[3]	GBDT[4]	NN[5]
p[6]	0,95	0,93	1,00	0,95	0,95
TPR[7]	0,92	0,94	1,00	0,92	0,92
TNR[8]	0,95	0,93	0,71	0,94	0,95
Ac[9]	0,93	0,93	0,80	0,93	0,93
F_1 score[10]	0,93	0,93	0,75	0,93	0,94

[1]Regresión logística. [2]Árbol de decisión. [3]Máquina de soporte vectorial. [4]Árboles de decisión de aumento del gradiente. [5]Red neuronal. [6]Precisión. [7]Tasa de verdaderos positivos. [8]Tasa de verdaderos negativos. [9]Exactitud. [10]Puntuación F_1

Por otro lado, a partir de los dos modelos de predicción de temperatura mínima se evidenció que el error disminuye al reducir la ventana de tiempo de diez horas a una hora, en este sentido, el RMSE, MAE y MSE se reducen en 1,3 °C, 1,1 °C y 3,4 °C en promedio, respectivamente (Tabla 2). A nivel general, los resultados de los dos modelos son satisfactorios y se puede afirmar que mediante ambos algoritmos se puede predecir la temperatura mínima.

Tabla 2. Métricas de evaluación del rendimiento de los modelos de regresión en el conjunto de datos de validación.

Modelo	Ventana de tiempo (horas)	RMSE[1]	MAE[2]	MSE[3]
NN[4]	10	1,91	1,55	3,65
	7	1,49	1,18	2,24
	3	1,27	0,99	1,60
	1	0,71	0,54	0,49
RF[5]	10	2,04	1,65	4,17
	7	1,59	1,28	2,55
	3	1,28	0,99	1,63
	1	0,71	0,53	0,51

[1]Raíz del error cuadrático medio. [2]Error medio absoluto. [3]Error cuadrático medio. [4]Modelo de red neuronal. [5]Modelo de bosques aleatorios.

Las métricas obtenidas en este estudio son consistentes con lo reportado en la literatura. Roy et al. (2024) encontraron un RMSE DE 1,4 °C para predicciones de temperatura mínima, empleando redes neuronales. De forma similar, Cadenas et al. (2020) lograron un MSE de 0,49 °C y un MAE de 0,51 °C en una ventana de una hora con un algoritmo de k-vecinos más cercanos. Otros enfoques incluyen máquinas de soporte vectorial, con un MSE de 0,008 °C para una hora y 2,35 °C para seis horas (Yu et al., 2016), y modelos LSTM con un RMSE de 0,99 °C y un MAE de 0,57 °C en predicciones a 24 horas bajo infraestructura IoT (Guillén et al., 2020). En los últimos años se han implementado infraestructuras que no solo tienen en cuenta la variación temporal de la temperatura sino también espacial con arquitecturas hibridas de redes neuronales de grafo en conjunto con redes neuronales recurrentes alcanzando métricas de error RMSE de 0,97 °C para ventanas de predicción de tres horas (García et al., 2023). En la práctica agrícola, el principal riesgo para los productores proviene de los falsos negativos, es decir, no detectar un evento de helada real. Nuestros resultados muestran tasas de verdaderos positivos (recall) superiores al 91 %, lo que implica una baja probabilidad de omisión; sin embargo, subrayamos que priorizar el recall frente a otras métricas es fundamental para disminuir este riesgo, incluso si ello conlleva un ligero aumento de falsos positivos. Es importante señalar que los modelos de clasificación se entrenaron con una ventana de 14 horas, lo que permite anticipar la ocurrencia de heladas con suficiente margen para la toma de decisiones en campo. Por su parte, los modelos de regresión de temperatura mínima se evaluaron en horizontes de 1, 3, 7 y 10 horas, evidenciando que los

lapsos cortos (1–3 h) resultan más útiles para la activación inmediata de medidas de mitigación (aspersión, ventilación), mientras que horizontes mayores (6–10 h) ofrecen ventajas logísticas para la planificación de labores y la asignación eficiente de recursos.

En trabajos futuros se resalta la necesidad de incorporar un mayor número de variables y periodos de entrenamiento más amplios. Además, se ha demostrado que entrenar modelos por estación mejora la precisión, dado que las características geográficas y climáticas locales (orografía, elevación, cobertura vegetal) influyen más que un enfoque generalizado (Fuentes et al., 2018; Ghielmi & Eccel, 2006). Estas mejoras en la calidad y representatividad de los datos abren la puerta a la exploración de arquitecturas más avanzadas, donde en la literatura reciente se ha evidenciado el potencial de los mecanismos de atención para mejorar la predicción de fenómenos climáticos. Dichos enfoques permiten asignar pesos diferenciales a las variables en función de su relevancia temporal o espacial; ejemplos destacados son los Transformers aplicados a series de tiempo climáticas (Lira et al., 2022; García et al., 2023) y arquitecturas híbridas LSTM–Attention (Zhou et al., 2022), que han mostrado avances en la captura de dependencias de largo plazo y en la capacidad de generalización frente a contextos variables. En el caso de la predicción de heladas en entornos tropicales, su integración con redes de grafos y sensores distribuidos representa una vía prometedora para capturar simultáneamente patrones locales y regionales.

CONCLUSIÓN

Los algoritmos de aprendizaje de máquinas demostraron un alto potencial para la predicción temprana de heladas en agroecosistemas de montaña, destacando la efectividad de GBDT para la clasificación y la utilidad de modelos de regresión para estimar la temperatura mínima. Estos resultados constituyen un insumo para la toma de decisiones en la gestión del riesgo agroclimático en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a las compañías Soluciones Wiga y Growers Hub Trading Group (GHT) por la financiación otorgada y el aporte de la información para la realización del proyecto. Así mismo, expresamos gratitud al Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial (GIDIA).

REFERENCIAS

Arribillaga, D., Bravo, R., Campos, C., Fuentes, M., Gatica, J., Luchabeche, P., Quintana, J., Reyes, M., Salacar, C., Salvo del Pedregal, J., & Vidal, M. (2020). Heladas. Factores, tendencias y efectos en frutales y vides. In R. Bravo, J. Quintana, & M. Reyes (Eds.), Instituto de Investigaciones Agropecuarias: Vol. Boletín IN (N° 417). https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/6847/Boletín INIA N° 417?sequence=1&isAllowed=y

Cadenas, J. M., Garrido, M. C., Martínez, R., & Guillén, M. A. (2020). Making decisions for frost prediction in agricultural crops in a soft computing framework. Computers and Electronics in Agriculture, 175(May), 105587. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105587

Fuentes, M., Campos, C., & García-Loyola, S. (2018). Application of artificial neural networks to frost detection in central chile using the next day minimum air temperature forecast. Chilean Journal of Agricultural Research, 78(3), 327–338. https://doi.org/10.4067/S0718-58392018000300327

García, L., Cifuentes, J., & Marulanda, G. (2023). *Short-Term Spatio-Temporal Forecasting of Air Temperatures using Deep Graph Convolutional Neural Networks*. https://ssrn.com/abstract=3988117

Ghielmi, L., & Eccel, E. (2006). Descriptive models and artificial neural networks for spring frost prediction in an agricultural mountain area. Computers and Electronics in Agriculture, 54(2), 101–114. https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.09.001

González, O. C., & Torres, C. F. (2012). Actualización nota técnica heladas. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/Documento+FINAL+actua lizacion+nota+tecnica+heladas.pdf/e10a0183-62e6-410a-8e96-7e0739f6f06b

Guillén, M. A., Martínez, R., Llanes, A., Bueno, A., & Cecilia, J. M. (2020). A deep learning model to predict lower temperatures in agriculture. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 12(1), 21–34. https://doi.org/10.3233/AIS-200546

Lira, H., Martí, L., & Sanchez-Pi, N. (2022). A Graph Neural Network with Spatio-Temporal Attention for Multi-Sources Time Series Data: An Application to Frost Forecast. *Sensors*, *22*(4). https://doi.org/10.3390/s22041486

Roy, D. K., Hossain, M. A., Haque, M. P., Alataway, A., Dewidar, A. Z., & Mattar, M. A. (2024). Automated Model Selection Using Bayesian Optimization and the Asynchronous Successive Halving Algorithm for Predicting Daily Minimum and Maximum Temperatures. *Agriculture (Switzerland)*, *14*(2). https://doi.org/10.3390/agriculture14020278

Snyder, R. L., & de Melo-abreu, J. P. (2010). Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. In Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Ed.), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO (Volumen 1). https://www.fao.org/3/y7223s/y7223s.pdf

Yu, H., Chen, Y., Hassan, S. G., & Li, D. (2016). Prediction of the temperature in a Chinese solar greenhouse based on LSSVM optimized by improved PSO. Computers and Electronics in Agriculture, 122, 94–102. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.019

Zhou, I., Lipman, J., Abolhasan, M., & Shariati, N. (2022). Minute-wise frost prediction: An approach of recurrent neural networks. *Array*, *14*. https://doi.org/10.1016/j.array.2022.100158

ANEXOS

Anexo 1. Valores de ajuste para cada hiperparámetro del modelo.

Modelo	Librería	Hiperparámetros	Rango de valores para cada hiperparámetro
LR[1]	LogisticRegression (Sklearn)	C	{0,001 – 50}
		Regularización	{l1, l2, elasticnet}
		Solucionador (solver)	{newton-cg, lbfgs, liblinear, sag, saga}
DT[2]	DecisionTreeClassifier (Sklearn)	Criterio	{gini, entropy}
		Divisor (splitter)	{best, random}
		Profundidad máxima del árbol	{1 - 50}
		Número mínimo de muestras	{1 - 20}
		Máximo número de nodos de hoja	{1 - 50}
GBDT[3]	GradientBoostingClassifier (Sklearn)	Tasa de aprendizaje	{0,0001 – 0,3}
		Número mínimo de muestras	{1 - 50}
		Profundidad máxima	{1 - 50}
		Número máximo de características	{1 - 20}
SVM[4]	SVC (Sklearn)	Regularización	{0,5 – 30}
		Tipo de Kernel	{linear, poly, rbf, sigmoid, precomputed}
		Grado de la función del Kernel polinomial	{1 – 5}
		Gamma	{auto, scale}
NN[5]	MLPRegressor (Sklearn)	Número de neuronas en la i-ésima capa oculta	{(2,), (5,), (10,), (20,), (50,)}
		Función de activación para la capa oculta	{identity, logistic, tanh, relu}
		Solucionador (solver)	{lbfgs, sgd, adam}
		Regularización L2	{0,001 – 1}
		Tasa de aprendizaje	{0,005; 0,01; 0,05; 0,075; 0,1; 0,5}
		Tamaño del lote o Batch size	{50 – 400}

[1]Regresión logística. [2]Árbol de decisión. [3]Arboles de decisión de aumento del gradiente. [4]Máquina de soporte vectorial. [5]Red neuronal.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Penetrologger de bajo costo (GEOEXPEN V1.0) para la medición *in situ* de la resistencia a la penetración del suelo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Low-cost penetrologger (GEOEXPEN V1.0) for *in situ* measurement of soil penetration resistance

Luis Eduardo Lozano Silva[1]* and Oscar Chaparro Anaya[1]

Palabras clave:
Arduino
Compactación del suelo
GEOEXPEN V1.0
Penetrologger
Resistencia a la penetración del suelo

RESUMEN

Se desarrolló un prototipo de Penetrologger de bajo costo denominado GEOEXPEN V1.0, diseñado para medir *in situ* la resistencia a la penetración del suelo hasta 60 cm de profundidad. Este instrumento, con aplicaciones en ingeniería agrícola, civil y ciencias del suelo, integra una celda de carga acoplada a un cono conforme a la norma ASABE S313.3, un sensor de profundidad y una unidad de procesamiento Arduino MEGA 2560 que permite la adquisición y visualización inmediata de datos en una pantalla LCD táctil de 2,4". Su funcionamiento, basado en la aplicación de una fuerza constante, asegura la penetración vertical del cono y minimiza la variabilidad asociada a la velocidad de inserción. Las pruebas de campo mostraron que las mediciones del GEOEXPEN V1.0 no difirieron significativamente de las obtenidas con un penetrómetro comercial, con un error relativo inferior al 5% y una alta correlación entre equipos. Estos resultados confirman la confiabilidad del prototipo y destacan su potencial como herramienta práctica, accesible y económica para estudios de compactación y manejo sostenible del suelo.

Keywords:
Arduino
Soil compaction
GEOEXPEN V1.0
Penetrologger
Soil penetration resistance

ABSTRACT

A low-cost Penetrologger prototype, named GEOEXPEN V1.0, was developed to measure in situ soil penetration resistance up to a depth of 60 cm. This instrument, with applications in agricultural engineering, civil engineering, and soil science, integrates a load cell coupled to a cone compliant with the ASABE S313.3 standard, a depth sensor, and an Arduino MEGA 2560 processing unit that enables real-time data acquisition and immediate visualization on a 2.4" touchscreen LCD. Its operation, based on the application of a constant force, ensures vertical cone penetration and minimizes variability associated with insertion speed. Field tests showed that measurements obtained with GEOEXPEN V1.0 did not differ significantly from those of a commercial penetrometer, with a relative error below 5% and a high correlation between devices. These results confirm the reliability of the prototype and highlight its potential as a practical, accessible, and cost-effective tool for soil compaction studies and sustainable soil management.

[1]Facultad de Ingeniería y Administración, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
*Correponding author: lulozanos@unal.edu.co

CC BY NC SA

La resistencia a la penetración del suelo es un indicador esencial para evaluar su compactación, condición que afecta la aireación, el movimiento del agua y el desarrollo radicular de los cultivos (Hamza & Anderson, 2005). La compactación se considera uno de los principales limitantes de la productividad agrícola, especialmente en suelos cultivados con maíz (*Zea mays* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) y soya (*Glycine max* L. Merr.), ya que incrementa la densidad aparente y restringe la exploración de raíces (Lipiec & Hatano, 2003). En este sentido, disponer de mediciones precisas y eficientes resulta fundamental para la toma de decisiones en el manejo del suelo y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Los equipos disponibles para este propósito suelen tener costos elevados y, en algunos casos, limitaciones de portabilidad y procesamiento en campo (Herrick & Jones, 2002). En contraposición, estudios recientes resaltan el potencial de dispositivos electrónicos de bajo costo y código abierto, basados en microcontroladores como Arduino, para desarrollar instrumentos agrícolas accesibles, versátiles y confiables (González et al., 2019; López & Ramírez, 2020).

La norma ASABE S313.3 establece que la resistencia mecánica del suelo a la penetración debe medirse con penetrómetros que utilicen un cono estandarizado de 30° y 323 mm² de área basal (0,5 in²). Estas especificaciones permiten uniformidad en los resultados y garantizan que los valores puedan expresarse en unidades de presión (kPa o MPa), lo cual resulta imprescindible en estudios de ingeniería agrícola y de suelos.

En este marco se desarrolló el prototipo GEOEXPEN V1.0, un Penetrologger de bajo costo que integra sensores de fuerza y profundidad con un Arduino MEGA 2560, diseñado para realizar mediciones *in situ* hasta 60 cm de profundidad. El problema que orienta este trabajo radica en la necesidad de contar con equipos accesibles y confiables que permitan evaluar la compactación del suelo en diferentes contextos agrícolas y civiles.

La hipótesis de este estudio establece que el GEOEXPEN V1.0 permite obtener mediciones de resistencia a la penetración comparables con las de equipos comerciales, pero a un costo considerablemente menor. En este marco, el objetivo general es diseñar, construir y validar un prototipo funcional de Penetrologger para la caracterización de la resistencia mecánica del suelo. Los objetivos específicos son: (i) diseñar la estructura y los componentes electrónicos del prototipo, y (ii) implementar un sistema de adquisición y visualización de datos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

El desarrollo y validación del prototipo GEOEXPEN V1.0 se llevaron a cabo en el Laboratorio de Maquinaria Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira (UNAL-PAL), y en el Centro Experimental de la misma institución (CEUNP), ubicado en las coordenadas 3°25'34.46" N y 76°25'51.90" O, a una altitud de 950 m s. n. m. La zona presenta un clima tropical, con temperatura media anual de 26,9 °C y precipitación promedio anual de 822 mm.

Diseño del prototipo

El GEOEXPEN V1.0 se contruyó integrando una celda de carga de tensión/compresión Tedea-Huntleigh, modelo 614, con rango de medición de 0 a 10.000 kPa, acoplada a una varilla de sondeo con cono de acero templado de 30° de ángulo y 130 mm² de área basal. El sistema incluye un módulo amplificador de señal AD620, una estructura de soporte, un sensor ultrasónico de distancia HC-SR04 (rango de 2 a 450 cm), un paquete de tres baterías de litio 18650 en serie (12 V – 6800 mAh), una pantalla táctil LCD TFT de 2,4" para visualización de datos y una tarjeta programable Arduino MEGA 2560 (Figura 1).

Programación

La programación se realizó en el entorno Arduino IDE (versión gratuita), empleando código, librerías y funciones específicas para el procesamiento de señales y la integración de los diferentes componentes electrónicos (Figura 2).

Procedimiento experimental

La calibración de la celda de carga TEDEA se efectuó en la máquina universal de ensayos Shimadzu del laboratorio de materiales de la UNAL-PAL. Se aplicaron cargas crecientes y decrecientes en distintos puntos del

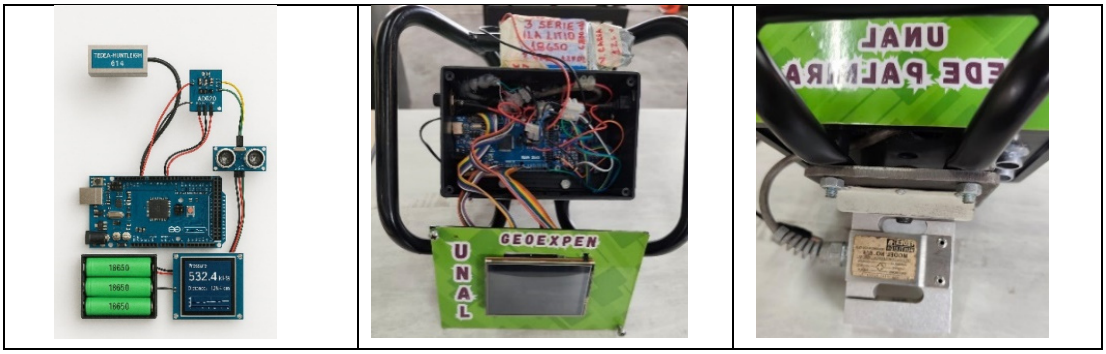


Figura 1. Componentes del prototivo GEOEXPEN V1.0

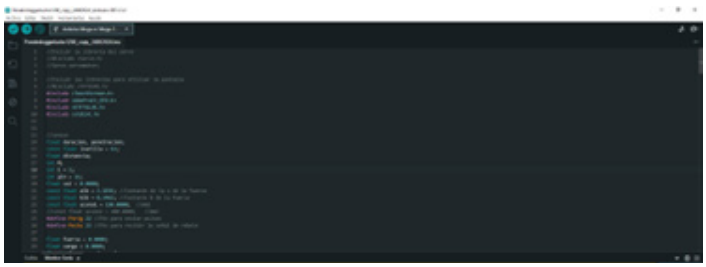


Figura 2. Software - Programa GEOEXPEN

rango de trabajo, registrando tanto la fuerza de referencia medida por la Shimadzu como la señal entregada por la celda en el sistema Arduino. Posteriormente, se ajustó un modelo de regresión lineal entre ambas variables y se calculó el coeficiente de determinación (R^2), con el propósito de evaluar la correlación y confiabilidad de la celda en su rango operativo. Las pruebas del GEOEXPEN V1.0 consistieron en introducir el cono en el suelo aplicando una fuerza manual constante sobre las empuñaduras de la estructura. Se efectuaron mediciones de resistencia a la penetración hasta 60 cm de profundidad, registrando datos cada 10 cm. Con el fin de reducir la variabilidad, la velocidad de penetración se estandarizó en aproximadamente 30 $mm \cdot s^{-1}$, siguiendo las recomendaciones de la norma ASABE S313.3 (ASABE, 2011).

Recolección de datos

La recolección de datos se llevó a cabo en el CEUNP. Los valores obtenidos con el GEOEXPEN V1.0 se almacenaron en formato digital para su análisis posterior. Paralelamente, se realizaron mediciones con un penetrómetro comercial (Penetrologger Eijkelkamp), empleado como equipo de referencia. Cada tratamiento se replicó tres veces en diferentes puntos de muestreo dentro de la parcela experimental (Figura 3).



Figura 3. Recolección datos in situ - CEUNP.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El prototipo GEOEXPEN V1.0 se evaluó en condiciones de campo para validar su precisión y compararlo con un equipo comercial de referencia. Los resultados se resumen en la Tabla 1.

En cuanto a la precisión del sensor de fuerza, se observó que las mediciones realizadas con el GEOEXPEN V1.0 no difirieron significativamente de las obtenidas con el penetrómetro comercial, registrándose un error relativo inferior al 5 %. Este desempeño confirma que el sistema electrónico basado en la tarjeta Arduino MEGA 2560 cumple con los requerimientos para mediciones in situ, coincidiendo con lo reportado en otros desarrollos de bajo costo aplicados a la agricultura (González et al., 2019).

Tabla 1. Comparación de la resistencia a la penetración (MPa) medida con un penetrómetro comercial y con el GEOEXPEN V1.0 a diferentes profundidades

Profundidad (cm)	Comercial (MPa)	GEOEXPEN V1.0 (MPa)
10	1,0	0,7
20	1,4	2,0
30	2,0	2,1
40	2,1	2,3
50	2,4	2,4
60	2,6	2,8

En relación a las pruebas de campo relacionadas con el comportamiento del equipo en la medición de la resistencia a la penetración, realizadas en un lote del CEUNP con caracteristicas de textura franco arcillosa a una humedad ubicada en la zona friable con medición cada 3 metros a lo largo de un transecto de 30 metros hasta una profundidad de 60 cm se encontro una alta correlación entre los datos promedios medidos con el GEOEXPEN V1.0 y el Penetrologger digital comercial (Tabla 1). El coeficiente de correlación de Pearson fue de 0,92 entre el penetrologger Comercial y GEOEXPEN V1.0

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis de la investigación: el GEOEXPEN V1.0 proporciona mediciones comparables con las de equipos comerciales, con la ventaja adicional de ser más económico y accesible. Este hallazgo resalta su potencial como alternativa tecnológica para la evaluación de la compactación del suelo en diferentes contextos agrícolas.

CONCLUSIÓN

La integración de sensores de fuerza y profundidad con una unidad de procesamiento basada en Arduino MEGA 2560 permitió desarrollar un sistema confiable de adquisición y visualización de datos in situ, facilitando la interpretación inmediata de la información en campo. La aplicación de una fuerza constante durante la inserción del cono redujo la variabilidad asociada a la velocidad de penetración, garantizando mediciones más precisas y repetibles en diferentes condiciones de suelo. De esta manera, el GEOEXPEN V1.0 se consolida como una alternativa práctica, accesible y de bajo costo frente a los equipos comerciales, con potencial de aplicación en estudios de compactación agrícola. Además, este desarrollo aporta al conocimiento en instrumentación agrícola al demostrar la viabilidad de soluciones de bajo costo basadas en microcontroladores y abre la posibilidad de investigaciones futuras orientadas a optimizar el diseño del prototipo, incorporar sistemas inalámbricos de transmisión de datos y ampliar su rango de aplicaciones en la gestión sostenible del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al profesor Luis Arnobi Rodríguez Hurtado y a la UNAL-PAL por el apoyo brindado en el desarrollo del prototipo GEOEXPEN V1.0.

REFERENCIAS

ASABE. (2011). ASABE S313.3: Soil cone penetrometer. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.

González, J., Ramírez, P., & López, A. (2019). Desarrollo de

instrumentos de bajo costo para la medición de propiedades físicas del suelo en agricultura de precisión. Revista de Ingeniería Agrícola, 45-56.

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil & Tillage Research, 121–145. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009.

Herrick, J. E., & Jones, T. L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal, 1320–1324. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1320.

Lipiec, J., & Hatano, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. Geoderma, 107–136. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1.

López, P., & Ramírez, H. (2020). Desarrollo de sensores agrícolas de bajo costo basados en plataformas de hardware abierto. Revista de Tecnología e Innovación Agropecuaria, 55–67.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Tecnologías térmicas emergentes para la desinfección del suelo: desempeño de microondas y radiación infrarroja en el control de nematodos fitopatógenos

Emerging thermal technologies for soil disinfection: performance of microwave and infrared radiation in the control of phytoparasitic nematodes

Guilherme Mathias Lopes[1], Fernanda Pancieri Diniz[2], Lidja Dahiane Menezes Santos Borele[3], William Cesar Terra[3], Irineu Petri Júnior[3] and Jefferson Luiz Gomes Corrêa[3]

Palabras clave:
Baño de aceite
Desinfección térmica
Manejo del suelo
Meloidogyne incognita
Tecnologías alternativas

RESUMEN

El uso de tecnologías térmicas ha emergido como una alternativa sostenible al control químico de nematodos fitopatógenos, como *Meloidogyne incognita,* que comprometen la productividad agrícola. Este estudio evaluó la eficiencia del uso de microondas, radiación infrarroja y baño de aceite en el proceso de desinfección y el consumo energético asociado. Suelos libres de patógenos fueron inoculados con *M. incognita* y sometidos a tratamientos térmicos hasta alcanzar temperaturas de 50 y 90 °C, evaluándose los parámetros tiempo de calentamiento, consumo de energía y control de agallas. Los resultados indicaron que la temperatura de 90 °C condujo a la esterilización de los suelos, siendo las microondas el método más rápido para alcanzar esta temperatura (293 segundos), mientras que la radiación infrarroja presentó el menor consumo energético (0,0236 kWh), manteniendo eficacia total en la eliminación de agallas. El baño de aceite, aunque eficiente en la inactivación de los nematodos, presentó un tiempo operativo y un consumo energético elevados, lo que hace inviable su aplicación. La radiación infrarroja se destacó como tecnología prometedora al combinar eficacia técnica, bajo costo operativo y sostenibilidad, especialmente en contextos agrícolas con infraestructura limitada. Estos resultados refuerzan el potencial de estas técnicas en el manejo integrado de nematodos en suelos agrícolas.

Keywords:
Oil bath
Thermal disinfection
Soil management
Meloidogyne incognita
Alternative technologies

ABSTRACT

The use of thermal technologies has emerged as a sustainable alternative to the chemical control of phytopathogenic nematodes, such as *Meloidogyne incognita*, which compromise agricultural productivity. This study evaluated the efficiency of using microwaves, infrared radiation, and oil bath in the soil disinfection process, as well as the associated energy consumption. Pathogen-free soils were inoculated with *M. incognita* and subjected to thermal treatments until reaching temperatures of 50 and 90 °C, assessing heating time, energy consumption, and gall control parameters. The results indicated that a temperature of 90 °C led to soil sterilization, with microwaves being the fastest method to reach this temperature (293 seconds), while infrared radiation showed the lowest energy consumption (0.0236 kWh) while maintaining total efficacy in gall elimination. The oil bath, although effective in nematode inactivation, required long operational times and high energy consumption, making its application unfeasible. Infrared radiation stood out as a promising technology by combining technical efficiency, low operating cost, and sustainability, especially in agricultural contexts with limited infrastructure. These results reinforce the potential of these techniques for integrated nematode management in agricultural soils.

[1]Ms. en Ingeniería Agrícola, Doctorando, DEG, UFLA, Lavras-MG, Brasil. gmlopes25@gmail.com;
[2]Estudiante de Ingeniería Química, DQM, UFLA, Lavras-MG, Brasil. Fernanda.diniz@estudante.ufla.br;
[3]Profesor, DQM, UFLA, Lavras-MG,Brasil. lidja.borel@ufla.br; willianterra@ufla.br; irineupetri@gmail.com; jefferson@ufla.br

CC BY NC SA

Los nematodos del género *Meloidogyne*, conocidos como nematodos formadores de agallas, representan uno de los principales grupos de fitopatógenos presentes en suelos agrícolas, causando serias pérdidas en la productividad de diversos cultivos de importancia económica (Jones et al. 2013; Sikora et al. 2022). El control químico mediante nematicidas sintéticos, aunque ampliamente utilizado, ha sido progresivamente restringido debido a sus impactos ambientales, toxicidad y potencial de contaminación del suelo y del agua (Desaeger et al. 2020). En este contexto, aumenta el interés por estrategias alternativas, eficaces y ambientalmente sostenibles para el manejo de estos organismos.

En este escenario, los tratamientos térmicos surgen como un enfoque prometedor, como el uso de técnicas de solarización o la aplicación de vapor de agua. Estas prácticas se basan en el principio de la conducción térmica, mediante el cual el calor se transfiere al suelo elevando su temperatura a niveles capaces de inactivar patógenos. Sin embargo, estas técnicas requieren largos periodos de exposición a las fuentes de calor, lo que incrementa el costo operativo (Silva et al. 2001).

En este sentido, en los últimos años han cobrado relevancias técnicas emergentes de calentamiento que promueven la inactivación de patógenos sin el uso de agentes químicos. Tecnologías como las microondas y la radiación infrarroja han sido exploradas por su capacidad de elevar rápidamente la temperatura del suelo, alcanzando rangos considerados letales para nematodos (Ferraz and Brown, 2016). No obstante, las comparaciones directas entre estas técnicas, especialmente en términos de eficiencia energética y viabilidad práctica en contextos agrícolas, aún son escasas en la literatura.

Ante esta situación, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar comparativamente el desempeño térmico y energético de los métodos de calentamiento por microondas, radiación infrarroja y baño de aceite para la desinfección de suelos contaminados con *Meloidogyne incognita,* con el fin de identificar tecnologías viables para el manejo térmico de estos fitonematodos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en los laboratorios de Procesamiento de Productos Agrícolas, Nematología e invernadero de la Universidade Federal de Lavras (UFLA), ubicada en Lavras, MG, Brasil. El suelo experimental consistió en una mezcla (1:1 v/v) de Latossolo Rojo-Amarillo y sustrato orgánico comercial (50% turba y 50% perlita). La mezcla fue previamente esterilizada en autoclave y colocada en macetas de 500 ml, conteniendo 400 g de suelo por repetición. En total se realizaron 6 repeticiones por tratamiento.Se evaluaron las técnicas de microondas, radiación infrarroja y baño de aceite para el calentamiento del suelo hasta alcanzar temperaturas de 50 y 90 °C, según se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño experimental.

Código	Tratamiento	Temperatura (°C)
Control	-	-
MW50	Microondas	50
MW90	Microondas	90
IV50	Infrarrojo	50
IV90	Infrarrojo	90
OB50	Baño de aceite	50
OB90	Baño de aceite	90

El tiempo necesario para alcanzar las temperaturas objetivo se determinó mediante el monitoreo con termopares y un termómetro digital insertados en el centro de las muestras. Para cada método se siguieron los siguientes procedimientos:

-Tratamiento con microondas:

El suelo fue irradiado en un horno de microondas modificado, operando a 2450 MHz con una potencia de 1150 W. Las muestras se distribuyeron en un recipiente refractario de vidrio con un espesor de 0,5 cm.

-Tratamiento con radiación infrarroja:
La radiación infrarroja se aplicó mediante una lámpara de 250 W, colocada a 23 cm sobre el portamuestras de suelo con 16 cm de diámetro y 0,5 cm de espesor.

-Tratamiento con baño de aceite:
Se utilizó un baño maría (Modelo 550, 40 a 120 °C ± 2 °C) con aceite mineral como medio conductor de calor. Las muestras se colocaron en vasos de precipitados de vidrio y se sumergieron en el baño hasta alcanzar las temperaturas objetivo.

Las temperaturas se registraron al final de cada tratamiento y el consumo energético se midió con un multímetro digital, considerando el tiempo de operación, la corriente eléctrica y el voltaje. El consumo total de energía (kWh) se calculó según la Ecuación 1

$$CE = V\ x\ I\ x\ t^2 \qquad [1]$$

Donde: CE es el consumo energético [kWh], V el voltaje [V], I la corriente eléctrica [A] y t el tiempo de exposición [h].

Tras los tratamientos, las muestras de suelo se dejaron enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente (25 °C) y se transfirieron a macetas de 500 ml, donde se trasplantaron plántulas de tomate (Santa Clara). Las macetas se colocaron en el invernadero y, después de 42 días de crecimiento, se evaluó la presencia de nematodos.

-Conteo de agallas
La presencia de nematodos se evaluó mediante análisis visual del sistema radicular de las plantas, basado en el conteo de las agallas formadas. Las raíces se lavaron cuidadosamente con agua corriente para eliminar el suelo adherido y, posteriormente, se secaron con papel absorbente. La cuantificación se realizó contando el número total de agallas presentes en las raíces de cada muestra, de acuerdo con la metodología descrita por Souza et al. (2019).

-Análisis estadístico
El análisis estadístico de los datos se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA), con el fin de verificar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. Cuando se detectaron diferencias significativas por la prueba F ($p < 0,05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey, al nivel de 5% de probabilidad. Todos los análisis se llevaron a cabo utilizando el software Statistica 14.1.0.8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los tratamientos se presentan en la Tabla 2, correspondiente al desempeño de los métodos de tratamiento térmico aplicados al suelo. Todos los métodos evaluados fueron eficaces en la reducción o eliminación de nematodos. Estudios previos han señalado que el éxito de la eclosión de los huevos de nematodos está estrechamente relacionado con las temperaturas alcanzadas por el suelo tratado (Ferraz and Brown, 2016). Sin embargo, los autores también indican que a temperaturas superiores a 40 °C ocurre la inactivación de estos huevos. En el presente estudio, los huevos de *M. incognita* mostraron resistencia térmica cuando los tratamientos alcanzaron temperaturas de 50 °C.

Tabla 2. Desempeño de los métodos de tratamientos térmicos aplicados en los suelos.

Tratamiento	Tiempo (s)	Número de Agallas	Consumo de energía (kWh)
Control	0	939	-
MW50	30±3a	36	0,0135±0,000009ab
MW90	293±11a	0	0,1361±0,004616d
IV50	175±16a	28	0,0107±0,000929a
IV90	420±15a	0	0,0236±0,001779b
OB50	4.255±410b	45	0,0500±0,001000c
OB90	10.716±1060c	0	0,1800±0,001000f

Las muestras sometidas al tratamiento con microondas alcanzaron las temperaturas objetivo de 50 y 90 °C en tan solo 30 y 293 segundos, respectivamente. Los tratamientos con radiación infrarroja presentaron un desempeño similar, aunque requirieron 175 y 420 segundos para alcanzar las mismas temperaturas. En contraste, el calentamiento por baño de aceite demandó tiempos mucho mayores, siendo necesarios 4.255 y 10.716 segundos para llegar a 50 y 90 °C, respectivamente.

Esta diferencia en la velocidad de calentamiento se atribuye a la naturaleza de las ondas electromagnéticas, que interactúan con las moléculas del suelo. En el caso de las microondas, el calentamiento ocurre principalmente por la rotación de los dipolos moleculares inducidos por el campo electromagnético alterno, lo que genera calor rápidamente mediante fricción interna.

No obstante, el análisis del consumo energético mostró que, para que las microondas alcanzaran la temperatura de letalidad (90 °C), se requirieron 0,1361 kWh. Este factor puede comprometer la viabilidad de la tecnología en zonas con restricciones en el suministro eléctrico. Por su parte, la radiación infrarroja presentó un consumo significativamente menor, utilizando solo 0,0236 kWh para alcanzar la temperatura de inactivación. El bajo costo operativo, junto con la menor exposición a riesgos ocupacionales, hace que esta técnica sea prometedora para su aplicación en el sector agrícola.

Aunque el baño de aceite alcanzó los 90 °C y fue eficaz en la inhibición de la formación de agallas en las raíces, el método requirió un tiempo prolongado, resultando en un consumo elevado de energía (0,1800 kWh). Este factor limita su aplicación práctica, tanto por cuestiones logísticas como por los riesgos ambientales asociados.

CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio demostraron que el inóculo de *Meloidogyne incognita* es termorresistente a los tratamientos que calentaron el suelo hasta 50 °C, siendo su inactivación posible únicamente cuando los tratamientos alcanzaron temperaturas de 90 °C. Los métodos térmicos emergentes, microondas y radiación infrarroja, fueron eficaces en la inactivación de *M. incognita,* siempre que se alcanzara la temperatura de 90 °C. Aunque el baño de aceite fue eficiente en la desinfección de las muestras, las limitaciones en el consumo energético y los impactos ambientales impiden su adopción. Entre las tecnologías evaluadas, la radiación infrarroja se destacó como la más prometedora, ya que combina eficiencia térmica, tiempo de exposición reducido y bajo consumo energético.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y a la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES) por el apoyo financiero mediante la concesión de una beca de investigación al primer autor. Asimismo, agradecen a la Universidade Federal de Lavras (UFLA) por el apoyo técnico y la infraestructura proporcionada

REFERENCIAS

Desaeger J, Wram C, Zasada I (2020) New reduced-risk agricultural nematicides-rationale and review. J Nematol 52. https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-091

Ferraz FCCB, Brown DJF (2016) Nematologia de plantas fundamentos e importância., NORMA EDITORA. Manaus

Jones JT, Haegeman A, Danchin EGJ, et al (2013) Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. Mol Plant Pathol 14: 946–961

Sikora RA, Molendijk LPG, Desaeger J (2022) Integrated nematode management and crop health: Future challenges and opportunities. In: Integrated Nematode Management: State-of-the-art and Visions for the Future. CABI International, pp 3–10

Silva JBC, Oliveira-Napoleão IT, Falcão LL (2001) Desinfestação de substratos para produção de mudas, utilizando vapor de água. Hortic Bras 19:155–158. https://doi.org/10.1590/s0102-05362001000200013

Souza DHG, Fujimoto JYH, Kuhn OJ, et al (2019) Métodos básicos para experimentação em nematologia. In: A produção do Conhecimento nas Ciências Agrárias e Ambientais 4. Atena Editora, pp 41–53

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Diseño y validación de un secador solar automatizado con control IoT para productos agrícolas

Design and validation of an automated solar dryer with IoT control for agricultural products

Ángel Leonardo González Padilla[1], Angie Katherine Hurtado Montañez[1]* and Jhony Javier Patiño Alvira[1]

Palabras clave:
Control de temperatura
Contenido de humedad
Deshidratación
Prototipo
Secador solar

RESUMEN

Este artículo presentó el diseño, construcción y validación de un prototipo de secador solar indirecto automatizado para productos agrícolas, desarrollado en Bogotá. Como caso de prueba se utilizaron rodajas de papa. El sistema integró un colector con placa de ferrocemento para almacenamiento térmico, una cámara de secado pintada de negro y un lazo de control conformado por sensores DHT11 y una termocupla, gestionados por un microcontrolador ESP32/Arduino, que activó un ventilador al registrarse una diferencia de temperatura entre bandejas igual o superior a 2 °C. Durante aproximadamente 23 horas de operación se registró temperatura, humedad relativa y pérdida de peso, alcanzando valores cercanos a 35 °C y una reducción significativa del contenido hídrico, con mayor eficiencia en los días 2 y 3. El diseño muestra un incremento en la capacidad térmica gracias a la placa interna y la pintura negra, mientras que el control automatizado mantiene condiciones favorables de operación. El sistema resulta aplicable al secado de hojas aromáticas y frutos pequeños (como uchuva y arándano), y se recomienda una adecuada ubicación y manejo para optimizar su desempeño.

Keywords:
Temperature control
Moisture content
Dehydration
Prototype
Solar dryer

ABSTRACT

This paper presents the design, construction, and validation of an automated indirect solar dryer prototype for agricultural products, developed in Bogotá. Potato slices were used as a test case. The system integrated a collector with a ferrocement plate for thermal storage, a drying chamber painted black, and a control loop consisting of DHT11 sensors and a thermocouple, managed by an ESP32/Arduino microcontroller, which activated a fan when a temperature difference between trays of 2 °C or higher was recorded. Over approximately 23 hours of operation, temperature, relative humidity, and weight loss were recorded, reaching values close to 35 °C and achieving a significant reduction in moisture content, with greater efficiency observed on days 2 and 3.The design shows an increase in thermal capacity thanks to the internal plate and black paint, while the automated control maintains favorable operating conditions. The system is applicable for drying aromatic leaves and small fruits (such as goldenberry and blueberry), and proper location and handling are recommended to optimize its performance.

[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
*Corresponding author: anhurtadom@unal.edu.co

En Colombia se registran pérdidas en la postcosecha por el alto contenido de agua en frutas y hortalizas, lo que resalta la necesidad de métodos de conservación económicos y sostenibles (Díaz & Murcia, 2019). El secado solar directo es una alternativa tradicional de bajo costo, pero depende del clima y del manejo manual, lo que limita su calidad y eficiencia. La integración de tecnologías IoT ha demostrado optimizar estos procesos mediante el monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad, como en los secadores de convección forzada de Villa-Medina et al., que incorporan paneles solares, baterías y control remoto para mejorar la calidad y la seguridad alimentaria.

Con base en estas experiencias, el proyecto replica y optimiza un secador solar indirecto de bandejas con control de temperatura y humedad, empleando rodajas de papa como caso de estudio y proyectando su aplicación en hojas aromáticas y frutos pequeños. El sistema utiliza sensores DHT11 y un microcontrolador ESP32 para registrar y transmitir datos a la nube con respaldo en tarjeta SD, asegurando visualización en tiempo real y autonomía mediante energía solar. Se plantean dos hipótesis: el diseño incrementa la capacidad térmica y reduce los tiempos de secado frente a métodos convencionales, y el lazo de control mantiene condiciones estables incluso bajo la variabilidad climática de Bogotá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y Construcción del Secador Solar

El secador solar indirecto de bandejas se diseñó en software CAD y se construyó con estructura de madera de pino por su bajo costo y propiedades aislantes. El colector incorporó una placa de ferrocemento para almacenamiento térmico y la cámara de secado se fabricó con vidrio transparente y bastidores metálicos para mayor durabilidad, ambos pintados en negro mate para optimizar la absorción de radiación. El colector se inclinó 10° para favorecer la convección natural, y en la cámara se dispusieron cuatro bandejas escalonadas con malla plástica permeable para asegurar un flujo uniforme de aire caliente. Las dimensiones fueron 50 × 17 × 71 cm en la torre de secado y 37 × 41 cm en el colector.

Las figuras mostradas a continuación permiten visualizar el montaje del secador solar. Es posible observar en el montaje del secador, la torre de secado (Figura 1-A), compuesta por las cuatro bandejas (Figura 1-B), la línea de conexión de los 4 sensores DHT11 (Figura 1-C), malla plástica esta permite el flujo del aire (Figura 1-D), el ventilador (Figura 1-E) y la cobertura de vidrio (Figura 1-F) que permite mantener aislado el medio de secado y el exterior.



Figura 1. Prototipo del Secador Solar, vista frontal.

El flujo de aire, después de circular a través de la torre de secado y deshidratar los productos, es evacuado mediante aberturas ubicadas en la parte posterior del secador solar. Este flujo continuo permite la expulsión del aire húmedo y la entrada de aire nuevo a través de la malla frontal.

Sistema de Control y Automatización

El sistema de control se implementó para monitorear y regular las condiciones ambientales del secador. Se emplearon dos sensores DHT11 ubicados en la bandeja inferior y superior, con precisiones de ±2 °C y ±5 % HR,

conectados a un microcontrolador ESP32 que ejecutó la lógica de control en C++. Mediante un lazo comparativo, se activó un ventilador axial (50 × 50 × 12 mm, 12 V, ~10 CFM) cuando la diferencia de temperatura entre bandejas fue ≥2 °C, asegurando la renovación de aire y evitando la saturación de humedad.

Se integraron tecnologías *IoT* (*Internet of Things*) para la recolección y visualización remota de datos. El ESP32 sincronizó su reloj vía Wi-Fi, realizó mediciones cada 5–10 minutos, almacenó la información en tarjeta SD y la envió a un servidor en la nube mediante una API. Dicho servidor, implementado con Docker, incluyó: (i) base de datos PostgreSQL, (ii) API en Python/FastAPI, y (iii) interfaz web en React para visualización en tiempo real de gráficos y alertas. El sistema incorporó mecanismos de caché para reintentos en caso de fallas de conexión y fue alimentado con paneles solares y baterías recargables, garantizando autonomía y sustentabilidad.

El montaje de los componentes electrónicos, sensores, microcontrolador, ventilador y módulo de conexión a la base de datos, se realizó sobre una *perfboard* adherida a la parte inferior del secador (Figura 2) con el fin de monitorear las condiciones ambientales como temperatura y humedad, garantizando su aislamiento y protección.



Figura 2. Montaje realizado en la *perfboard.*

Con el objetivo de asegurar la sostenibilidad del sistema, se incorporó un panel solar que alimenta una batería de 3.3 V, proporcionando la energía necesaria para el funcionamiento autónomo del ventilador bajo las condiciones operativas establecidas.

Protocolo Experimental

Los ensayos se realizaron con rodajas de papa (*Solanum tuberosum*) como producto modelo, debido a su alto contenido de humedad inicial (~80 %) y relevancia agrícola. Las rodajas, de 3–5 mm de espesor se distribuyeron en cuatro bandejas. Los experimentos se efectuaron en Bogotá (4°35'56"N, 74°04'51"O; 2600 m.s.n.m.) durante días soleados, con exposición solar entre 08:00 y 16:00 h, registrando la última medición al día siguiente para evaluar estabilización nocturna.

El peso de cada bandeja se midió con balanza digital (precisión 0.01 g) a intervalos de 30–60 min en la mañana y 60–120 min en la tarde. La temperatura y la humedad relativa se monitorearon continuamente con dataloggers en bandejas superior e inferior, complementados con sensores DHT11.

Las condiciones ambientales (radiación, temperatura y humedad exterior) se midieron in situ con piranómetro e higrómetro portátil. A partir de los datos, se calcularon el porcentaje de pérdida de peso (%PP) y el porcentaje de sólidos totales (%ST).

Análisis de Datos

A partir de los datos registrados, se calcularon el porcentaje de pérdida de peso (%PP) y el porcentaje de sólidos totales (%ST) mediante las ecuaciones [1] y [2]. Adicionalmente, se generaron curvas de secado (peso vs. tiempo) para cada bandeja y se evaluó la estabilidad térmica y la respuesta del sistema de control.

$$\%PP = \frac{mi - mf}{mi} \times 100 \qquad [1]$$

Donde; $\%PP$: Pérdida de peso [%], mi: Masa inicial [kg], mf: Masa final [kg]

$$\%ST = \frac{ms}{mi} \times 100 \qquad [2]$$

Donde; $\%ST$: Solidos totales [%], ms: Masa seca [kg], mi: Masa inicial [kg]

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El secador solar logró reducir el contenido de humedad de las rodajas de papa en un tiempo total aproximado de 23 horas, con una eficiencia notablemente superior a la reportada en secadores solares tradicionales, los cuales requieren entre 48 y 72 horas bajo condiciones climáticas óptimas. La Tabla 1 muestra el porcentaje de pérdida de peso (%PP) registrado por bandeja durante los tres días de experimentación. Se observa que la mayor eficiencia de secado se alcanzó en los días 2 y 3, con valores de %PP superiores al 75% en todas las bandejas.

Tabla 1. Porcentaje total de pérdida de peso de la papa (%PP).

Día	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4
1	27.91	41.46	40.26	52.38
2	78.33	76.27	75.00	77.61
3	77.42	76.36	80.36	76.47

De manera complementaria, la Tabla 2 presenta el porcentaje de sólidos totales (%ST) al final del proceso de secado. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango esperado para papa seca (13–35 %), lo que confirma la efectividad del prototipo en la deshidratación del producto.

Tabla 2. Porcentaje de sólidos totales al final del secado (%ST).

Día	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja4
1	51.16	58.54	59.74	47.62
2	21.67	23.73	25.00	22.39
3	22.58	23.64	19.64	23.53

Curvas de secado

Las curvas de secado obtenidas (Figura 3) reflejan una pérdida de peso constante y acelerada en comparación con estudios previos, como los reportados por García et al. (2015) y la UNESCO (2005). Este comportamiento se atribuye al diseño térmico del

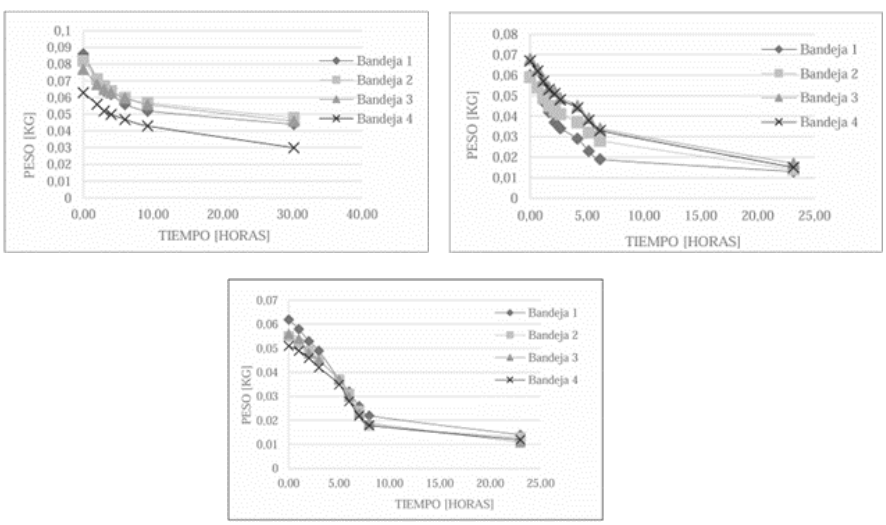


Figura 3. Curvas de secado para días 1,2,3 respectivamente.

secador con la placa de ferrocemento y la pintura negra y a la automatización del flujo de aire, que en conjunto incrementaron la capacidad de remoción de humedad.

Los resultados demuestran que el prototipo no solo reduce significativamente el tiempo de secado, sino que también mantiene su eficiencia bajo las condiciones climáticas variables de Bogotá. Esto lo convierte en una alternativa viable para el secado de productos agrícolas a pequeña escala, especialmente en regiones con alta humedad relativa y radiación solar intermitente.

CONCLUSIÓN

El prototipo de secador solar indirecto mostró efectividad en la deshidratación de rodajas de papa con un tiempo total aproximado de 23 horas y temperaturas de cámara hasta ~35 °C, evidenciando un rendimiento superior a referencias tradicionales en condiciones similares.

El uso de una placa de ferrocemento en el colector y pintura negra incrementó la capacidad térmica del equipo, mejorando estabilidad térmica y eficiencia de secado.
El sistema de control automatizado (DHT11 + termocupla + ESP32/Arduino + ventilador) fue efectivo para gestionar recambios de aire y evitar saturación en la cámara, manteniendo condiciones adecuadas de secado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación, así como a los laboratorios de la institución por facilitar los equipos e instalaciones necesarios para la construcción y validación del prototipo. De igual manera, se reconoce la colaboración de los compañeros de investigación y docentes que con sus observaciones y recomendaciones enriquecieron el proceso de diseño y análisis. Se declara que no existe ningún conflicto de intereses en la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

Díaz-Acosta, M. C., & Murcia-Velasco, D. A. (2019). Diseño, construcción y control de un prototipo de secador solar. Revista de Aplicación Científica y Técnica, 3(10), 1–5.

Sharma, B. B., Vaidya, P., Kumar, N., Tiwari, A., Bansal, S., Rashed, M., & Al-Mugren, K. S. (2025). Enhancing post-harvest sustainability in temperate crops through smart IoT-integrated indirect solar dryer. Scientific Reports, 15.

Villa-Medina, J. F., Porta-García, M. Á., Gutiérrez, J., & Porta-Gándara, M. Á. (2025). Solar forced convection dryer for agriproducts monitored by IoT. Internet of Things, 31, 101566.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Análisis del cambio de cobertura vegetal en Caicedonia (2015-2023) mediante teledetección

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Vegetation cover change analysis in Caicedonia (2015-2023) using remote sensing

Harold Santiago Vergara Torres[1] and Sergio Lamos Lozano[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Caicedonia
Cambio de cobertura
Máquinas de soporte vectorial (SVM)
Sistemas de información geográfica (SIG)
Teledetección

La producción de café en Colombia ha enfrentado una disminución sostenida, impulsando a los agricultores a sustituir este cultivo por alternativas más rentables. Esta investigación tuvo como propósito diagnosticar el cambio en el uso del suelo en el área rural de Caicedonia, un municipio del Paisaje Cultural Cafetero, entre los años 2015 y 2023 para comprender las causas de esta transición. Se empleó una metodología basada en técnicas de teledetección, utilizando imágenes satelitales Landsat que fueron sometidas a calibración radiométrica y corrección atmosférica mediante el método de Sustracción del Objeto Oscuro (DOS). Posteriormente, se realizó una clasificación supervisada de la cobertura del suelo con el algoritmo de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). Los resultados parciales permitieron generar un mapa de cobertura para el año 2023, donde se identificó una distribución espacial coherente de cultivos como café, cítricos, aguacate y musáceas, además de bosques y áreas desarrolladas. Se concluye que la metodología implementada es eficaz para caracterizar paisajes agrícolas complejos y establece una base sólida para el análisis multitemporal, el cual permitirá cuantificar con precisión la sustitución de cultivos y ofrecer insumos clave para la formulación de políticas agrícolas y ambientales en la región.

ABSTRACT

Keywords:
Caicedonia
Land cover change
Support vector machines (SVM)
Geographic Information systems (GIS)
Sensing remote

Coffee production in Colombia has faced a sustained decline, prompting farmers to replace this crop with more profitable alternatives. The purpose of this research was to diagnose the change in land use in the rural area of Caicedonia, a municipality within the Coffee Cultural Landscape, between 2015 and 2023 to understand the causes of this transition. A methodology based on remote sensing techniques was used, employing Landsat satellite images that underwent radiometric calibration and atmospheric correction using the Dark Object Subtraction (DOS) method. Subsequently, a supervised classification of land cover was performed with the Support Vector Machine (SVM) algorithm. The partial results generated a land cover map for the year 2023, identifying a coherent spatial distribution of crops such as coffee, citrus, avocado, and musaceae, as well as forests and developed areas. It is concluded that the implemented methodology is effective for characterizing complex agricultural landscapes and establishes a solid foundation for multitemporal analysis, which will allow for the precise quantification of crop substitution and provide key inputs for the formulation of agricultural and environmental policies in the region.

[1]Universidad del Valle, Cali, Colombia. harold.vergara@correounivalle.edu.co; sergio.lamos@correounivalle.edu.co

CC BY NC SA

La participación de Colombia en el mercado mundial de café ha experimentado una disminución progresiva durante las últimas décadas, un fenómeno gestado a lo largo del tiempo que responde a desafíos estructurales del sector. Entre los factores que explican esta tendencia se identificaron los elevados costos laborales, que representan aproximadamente el 70% de los costos totales de producción, una baja adopción tecnológica y un incremento en los gastos de mantenimiento de las plantaciones. Esta situación ha reducido la rentabilidad del cultivo y ha motivado a que numerosos agricultores opten por sustituir el café por alternativas más competitivas que demandan una menor inversión. El presente estudio se enfocó en el municipio de Caicedonia, un territorio parte del Paisaje Cultural Cafetero (PCC) donde históricamente el café ha sido el cultivo predominante, pero que en años recientes ha registrado una marcada disminución en su producción. Ante esta problemática, se planteó la pregunta de cuáles son las causas de esta dinámica y qué cultivos están desplazando al café en la región. Para responder a esto, se propuso el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de teledetección para analizar la evolución del uso del suelo. El objetivo principal de la investigación fue diagnosticar el cambio de la cobertura del suelo en el área rural del municipio de Caicedonia entre 2015 y 2023, mediante el análisis de imágenes de satélite para comprender sus causas

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló sobre el área rural del municipio de Caicedonia. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ C2 L2 correspondientes a los años 2015 y 2023, obtenidas de la plataforma EarthExplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La selección de las imágenes se basó en criterios de baja nubosidad y alta claridad visual del terreno.

El procesamiento de las imágenes se realizó en un software SIG y comprendió varias fases. Primero, se recortó el área de estudio de las imágenes satelitales utilizando como máscara un archivo vectorial (shapefile) con el límite municipal de Caicedonia. A continuación, se llevó a cabo la calibración radiométrica para convertir los niveles digitales (DN) de cada banda a valores de radiancia espectral en la cima de la atmósfera (Lsat), mediante la Ecuación [1]

$$Lsat = G\lambda \cdot DN\lambda + B\lambda \qquad [1]$$

Donde;
Lsat: Radiancia espectral, Gλ: Ganancia de la banda, DNλ: Nivel digital y Bλ: Sesgo de la banda.

Posteriormente, la radiancia se transformó a reflectancia en la cima de la atmósfera (ρTOA), un paso fundamental para normalizar los datos y minimizar los efectos de la variación en la iluminación solar, utilizando la Ecuación [2]:

$$\rho TOA = \frac{\pi \cdot Lsat}{E0 \cdot d^{-2} \cdot cos\ \theta z} \qquad [2]$$

Para mitigar los efectos de la dispersión atmosférica (bruma), se aplicó el método de corrección atmosférica de Sustracción del Objeto Oscuro (DOS). Este método se fundamenta en la suposición de que ciertos píxeles en la imagen, como las sombras de nubes utilizadas en este estudio, deberían tener una reflectancia cercana a cero, atribuyendo cualquier valor superior a la interferencia atmosférica.

Donde; ρTOA: Reflectancia en la cima de la atmósfera, E0: Irradiancia solar exoatmosférica, d: Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas y θz: Ángulo cenital solar.

Para mitigar los efectos de la dispersión atmosférica (bruma), se aplicó el método de corrección atmosférica de Sustracción del Objeto Oscuro (DOS). Este método se fundamenta en la suposición de que ciertos píxeles en la imagen, como las sombras de nubes utilizadas en este estudio, deberían tener una reflectancia cercana a cero, atribuyendo cualquier valor superior a la interferencia atmosférica

Una vez corregidas las bandas, se generó una composición en color verdadero (RGB) para facilitar la interpretación visual. Finalmente, se realizó una clasificación supervisada de la cobertura del suelo empleando el algoritmo de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). Para ello, se crearon clases de entrenamiento mediante la digitalización de polígonos sobre áreas representativas de las coberturas de interés: agua, desarrollado, café, bosque, cítricos, musáceas, aguacate y cereales. La representación cartográfica final se estandarizó utilizando la paleta de colores de la metodología CORINE Land Cover.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de la metodología descrita resultó en la generación de un mapa clasificado de la cobertura del suelo para el área rural del municipio de Caicedonia correspondiente al año 2023 (Figura 1). En dicho mapa se logró una diferenciación adecuada de las clases de cobertura definidas, mostrando su distribución espacial de manera coherente con los patrones productivos y ecológicos conocidos del territorio. El análisis visual del producto cartográfico evidenció una predominancia de cultivos como musáceas, aguacate, cereales y cítricos. La clase denominada 'desarrollado', concentrada principalmente en la porción norte del municipio, agrupó tanto áreas urbanas y construidas como superficies de suelo desnudo. Estos resultados constituyeron la base para la posterior comparación temporal con la clasificación del año 2015. La discusión de estos hallazgos permite afirmar que el uso del suelo en Caicedonia presenta una notable diversificación agrícola. Es importante señalar que la firma espectral de la clase 'desarrollado' puede corresponder tanto a superficies construidas como a suelo desnudo. Esta última condición es particularmente relevante para

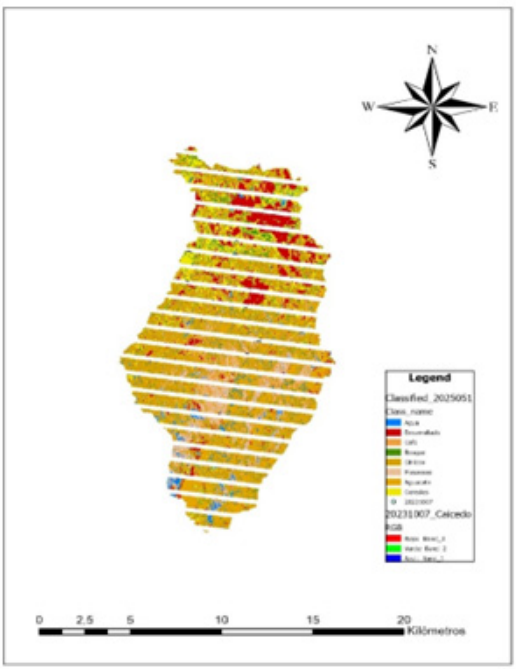


Figura 1. Mapa de cobertura del suelo del municipio de Caicedonia para el año 2023 obtenido mediante clasificación SVM.

los objetivos del estudio, ya que el suelo sin vegetación puede ser un indicador de terrenos en preparación para nuevos cultivos, lo que reflejaría directamente el proceso de sustitución agrícola que se investiga. La efectividad del algoritmo SVM para clasificar un paisaje heterogéneo queda demostrada, aunque esta ambigüedad espectral representa un factor a considerar en el análisis multitemporal para diferenciar la expansión urbana de las dinámicas de rotación de cultivos.

CONCLUSIÓN

La metodología que combina el preprocesamiento radiométrico, la corrección atmosférica DOS y la clasificación supervisada con SVM fue eficaz para mapear con precisión las diferentes coberturas vegetales en el área rural de Caicedonia.

El mapa de cobertura del suelo generado para el año 2023 confirma la existencia de un paisaje agrícola diversificado, donde cultivos como cítricos, aguacate y musáceas ocupan extensiones significativas junto a las áreas remanentes de café, lo que evidencia una transición productiva en curso.

Este estudio establece una línea base robusta y detallada, indispensable para realizar el análisis multitemporal

comparativo con el año 2015. Dicho análisis permitirá cuantificar la magnitud de la disminución del cultivo de café e identificar los cultivos que lo están reemplazando.

Los productos cartográficos generados representan una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones en el ámbito de la planificación agrícola y la gestión ambiental, contribuyendo a una mejor comprensión de las dinámicas socioeconómicas que transforman el Paisaje Cultural Cafetero.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende un especial agradecimiento al profesor César Augusto Penilla Sepúlveda, por su invaluable guía e instrucción a lo largo de este proceso de investigación en tecnología SIG. Asimismo, se agradece a la Universidad del Valle por el apoyo brindado para la participación en eventos de investigación como RREDSI y por la vinculación al programa de semilleros IDICA. No existen conflictos de interés en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

P., Carlos, Cano, G., S., César, Mejía, V., Caicedo, E., G., Juan, Torres, S.A., & Calderón, T. (2012). El mercado mundial del café y su impacto en Colombia.

ESRI. (s.f.). ¿Qué son los datos ráster? - ArcMap | Documentación. Recuperado el 23 de abril de 2024, de https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm

González, F., Martínez, J. & Vega, M. (2019). Optimización de recursos hídricos en sistemas agrícolas.

IBM. (s.f.). Funcionamiento de SVM - Documentación de IBM. Recuperado el 23 de abril de 2024, de https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=models-how-svm-works

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). METODOLOGÍA CORINE LAND COVER. Recuperado el 22 de abril de 2024, de http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover

Barrera-Narváez, C. F., González-Sanabria, J. S., & Cáceres-Castellanos, G. (2020). Toma de decisiones en el sector turismo mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica e inteligencia de negocios. Revista Científica, 38(2), 160-173.

¿Qué es la Teledetección? (s.f.). Instituto Geográfico Nacional. Recuperado el 23 de abril de 2024, de http://www.ign.es

ESA - Eduspace ES - Inicio - Firmas espectrales. (n.d.). Retrieved April 23, 2024, from: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Sistema inteligente de monitoreo de calidad de agua en viñedos Valle del Río Maipo, Chile

Smart water quality monitoring system in vineyards of the Maipo River Valley, Chile

Christian Correa Farías[1]*, Diego Dujovne[2] and Fernando Bolaño Pacheco[1]

Palabras clave:
Calidad de agua
IoT
Lora
Monitoreo inteligente

RESUMEN

En un viñedo del Valle del Maipo, Chile el agua de riego presenta alta turbidez, lo que provoca taponamiento de goteros, frecuentes retrolavados en filtros y la necesidad de tratamiento químico en sedimentadores. Este trabajo, evalúa si un diseño ad hoc, de un sistema IoT multiparamétrico, puede anticipar cambios en la calidad del agua y optimizar dicho proceso. Para ello se diseñó e instaló dos nodos de sensado antes y después del sedimentador, equipados con sensores ópticos de OD, pH, CE, turbidez y temperatura, integrados a un microcontrolador ESP32 con comunicación 4G y LoRa. Los datos fueron enviados y procesados en la nube. Los resultados evidencian que el sistema permitió anticipar aumentos de turbidez y optimizar la dosificación de coagulantes.

Keywords:
Water quality
IoT
Lora
Smart monitoring

ABSTRACT

In a vineyard located in the Maipo Valley, Chile, irrigation water presents high turbidity, causing emitter clogging, frequent filter backwashing, and the need for chemical treatment in sedimentation tanks. This study evaluates whether a multiparametric IoT system can anticipate changes in water quality and optimize this process. Two sensing nodes were designed and installed before and after the sedimentation tank, equipped with optical sensors for DO, pH, electrical conductivity, turbidity, and temperature, integrated into an ESP32 microcontroller with 4G and LoRa communication. Data were transmitted and processed to the cloud via the MQTT protocol. Results show that the system enabled early detection of turbidity increases and optimized coagulant dosing.

[1]Universidad de Concepción, Chile. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4748-2129
[2]Universidad Diego Portales, Chile. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4207-633X
*Corresponding author: ccorrea@udec.cl

CC BY NC SA

La vitivinicultura chilena depende en gran medida de la calidad y disponibilidad del agua de riego. En la zona central del país, el río Maipo constituye una fuente estratégica, pero presenta altos niveles de turbidez, especialmente durante periodos de deshielo y crecidas. Esta condición afecta la operación de sistemas de riego tecnificado, ya que produce taponamiento en goteros, genera frecuentes retrolavados en filtros, incrementando costos y reduciendo eficiencia.

Un viñedo del Valle del Maipo utiliza sedimentadores con adición de coagulantes como sulfato de alúmina para clarificar el agua, ya que su sedimentador no es sufieciente para los niveles de turbidez presentes. Pero este proceso demanda monitoreo constante para ajustar la dosis a la turbidez. Una sobredosificación implica gastos innecesarios, mientras que una subdosificación compromete la eficiencia del tratamiento y puede generar interrupciones en el riego.

En la literatura internacional, se ha documentado el uso de IoT en la gestión hídrica. Muñoz et al. (2020) presentaron una arquitectura IoT para la gestión de recursos hídricos en entornos agroindustriales en España, validando la importancia de plataformas distribuidas y comunicación en tiempo real. Zainurin et al. (2023) integraron un marco de sensado con un sistema de apoyo a la decisión para monitorear la calidad de agua en agricultura, y la revisión de Garrido-Momparler y Peris (2022) sintetiza el papel de sensores inteligentes e infraestructuras de nube en monitoreo de calidad de agua ambiental, destacando requisitos de comunicación, fiabilidad y analítica para operación continua. No obstante, son pocos los estudios aplicados a sistemas agrícolas que enfrentan fuentes superficiales altamente turbias.

A partir de esta problemática, se plantea si, es posible implementar un sistema IoT confiable y energéticamente autónomo para monitorear en línea la eficiencia de un sedimentador en un viñedo del Valle del Maipo con aguas altamente turbias, permitiendo optimizar la dosificación de coagulantes y mejorar la operación del riego

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema se instaló en la estación de bombeo de un viñedo, a 50 m del canal de captación del río Maipo. El canal de entrada presenta sección rectangular de 0.50 × 0.50 m, mientras que el sedimentador posee sección trapezoidal, 7 m de ancho y 4 m de profundidad, con un caudal de diseño de 85 L s^{-1} y un tiempo de retención hidráulica estimado en 1.3 h.

Se diseño e instaló dos nodos de monitoreo: uno en el canal de entrada y otro en la piscina de succión de la bomba, después del sedimentador. Cada nodo integró sensores MODBUS, marca DINSEN modelo DS2100. Este sensor multiparamétrico óptico mide turbidez, pH, conductividad electrica (CE), oxigeno sisuelo (OD) y temperatura. Los sensores cuentan con limpieza automática mediante escobilla motorizada, lo que reduce la formación de biofilm. Sus características son: turbidez 0–1000 NTU con precisión ±2 %, pH 2–12 con ±0.1, conductividad 0–2000 µS cm^{-1} con ±1 %, oxígeno disuelto 0–20 mg L^{-1} con ±0.2 y temperatura –5 a 50 °C con ±0.2. La electrónica se basó en un ESP32-WROOM32 de 240 MHz y 520 KB RAM, un módem celular con LTE-M/NB-IoT y un transceptor LoRa SX1265 de +22 dBm y sensibilidad –148 dBm. La comunicación local entre el nodo del canal y el nodo principal en la caseta se realizó mediante LoRa, mientras que la transmisión hacia la nube (ThingBoard) se hizo via MQTT sobre red celular 4G. Ninguno de los enlaces presentó fallos durante la campaña.

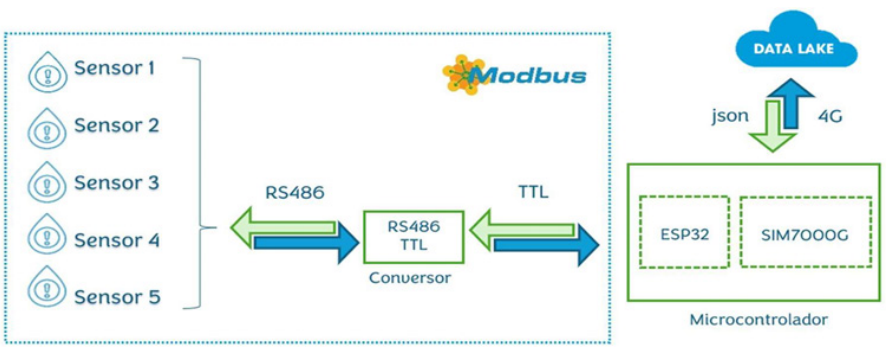


Figura 1. Arquitectura del sistema de adquisición de datos. En el se aprecia como los sensores modbus se conectan en un solo bus de datos RS485, luego convertidos a niveles TTL 3.3VDC, para que el microcontrolador los pueda leer, filtrar, procesar y enviar a la plataforma web.

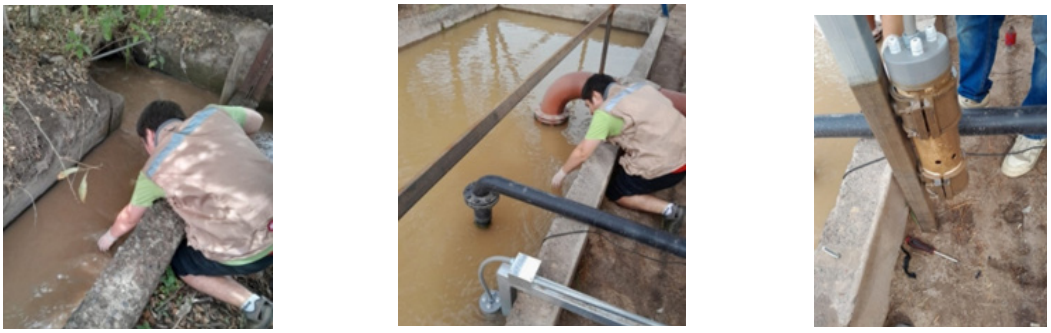


Figura 2. A la izquierda imagen de la toma de muestras para validación de los sensores. Se puede apreciar el grado de turbidez del agua entrante. En el centro, una imágen de la toma de muestras en la picina de succión. A la derecha, imágen de la tuberia de PVC perforada con los sensores.

El sistema se energizó con un panel solar de 50 Wp y una batería AGM de 12 V y 20 Ah, lo que otorgó autonomía de hasta 7 días sin radiación solar. La electrónica se alojó en cajas IP67 y los sensores en módulos IP68. Para protegerlos de residuos sólidos, se instalaron dentro de una tubería de PVC perforada de 160 mm, sumergida en el flujo principal.

La calibración de los sensores se realizó antes y después de la temporada de riego: para turbidez con Formazina, para pH con soluciones tampón, para conductividad con soluciones patrón y para OD mediante verificación con equipos de referencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema recolectó 43,200 registros por nodo durante la campaña. La comunicación LoRa entre el nodo del canal y la caseta funcionó sin interrupciones, y la transmisión vía MQTT a la nube no presentó pérdidas de paquetes, logrando confiabilidad del 100 % y ademas, permitio crear un sistema de alertas automáticas. Los resultados promedio de calidad de agua se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua promedio antes y después del sedimentador

Parámetro	Antes	Después
Turbidez (NTU)	1300	180
pH	7.99	7.95
Conductividad (µS cm-¹)	31.2	35.8
Temperatura (°C)	22.1	22.1

La turbidez de entrada alcanzó valores de hasta 1500 NTU durante eventos de lluvia, reduciéndose tras el sedimentador a 150–200 NTU. El sistema permitió diagnosticar en tiempo real si el sedimentador estaba funcionando de acuerdo a su tiempo de retención y si la dosis de coagulante era suficiente.

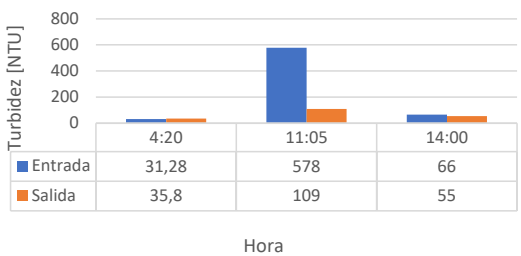


Figura 3. Gráfico con los datos de las muestras de validación. En la muestra de las 4:20 se puede observar que, cuando el agua llega con muy baja turbidez, el sedimentador no produce un reduccción en los niveles de turbidez. La pequeña variación al alza, se debe a que, en la piscina de succión, el agua es bombeada desde el fondo provocando un leve movimiento ascendente de sedimentos.

El sistema validó la utilidad de integrar IoT en contextos agrícolas con aguas superficiales de alta turbidez, algo poco tratado en la literatura. Mientras Muñoz et al. (2020) mostraron la aplicación de arquitecturas IoT en entornos agroindustriales de España, y Zainurin et al. (2023) desarrollaron un marco de sensado integrado con sistemas de apoyo a la decisión en agricultura, este estudio se focalizó en el control en línea de sedimentadores para riego, en un contexto de aguas con elevada carga de sólidos. Por su parte, la revisión de Garrido-Momparler y Peris (2022) enfatiza el rol de sensores inteligentes y servicios en la nube para monitoreo de calidad de agua; en concordancia, aquí se comprobó el valor del uso de MQTT para enviar datos en tiempo real y generar alertas sin latencia, sobre TLS/SSL para una transmisión segura.

Si bien existen sistemas comerciales de monitoreo de calidad de agua, muchos de ellos presentan limitaciones para su uso en contextos agrícolas de alta turbidez, como el Valle del Maipo. Las soluciones comerciales suelen requerir infraestructura eléctrica permanente, presentan costos elevados, o carecen de mecanismos de autolimpieza robustos. Por estas razones, se optó por el desarrollo de una solución IoT de bajo costo, energéticamente autónoma, y adaptada específicamente a las condiciones del lugar.

El diseño permitió monitorear variables del propceso y optimizar el uso de floculante. Además, el sistema de autolimpieza de sensores y la protección mecanica, aseguraron continuidad operativa incluso con alta carga de sólidos. Las principal limitacion esta en la recalibración de los sensores opticos debido a la tutbidez Futuras mejoras podrían incluir algoritmos de inteligencia artificial para anticipar eventos de turbidez a partir de datos climáticos.

CONCLUSIÓN

Se demostró que es factible implementar un sistema IoT autónomo en términos energéticos y confiable en la adquisición y transmisión de datos, para el monitoreo en línea de sedimentadores. Esta solución permitió optimizar la operación en viñedos afectados por altas turbideces, mejorando la eficiencia del tratamiento de agua y la gestión del riego.

REFERENCIAS

Garrido-Momparler, V., & Peris, M. (2022). Smart sensors in environmental/water quality monitoring using IoT and cloud services. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 35, e00173. https://doi.org/10.1016/j.teac.2022.e00173

Muñoz, M., Gil, J. D., Roca, L., Rodríguez, F., & Berenguel, M. (2020). An IoT architecture for water resource management in agroindustrial environments: A case study in Almería (Spain). *Sensors*, 20(3), 596. https://doi.org/10.3390/s20030596

Zainurin, S. N., Ismail, W. Z. W., Mahamud, S. N. I., Ismail, I., Jamaludin, J., & Ab. Aziz, N. A. (2023). Integration of sensing framework with a decision support system for monitoring water quality in agriculture. *Agriculture*, 13(5), 1000. https://doi.org/10.3390/agriculture13051000

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Diseño de modelo estadístico predictivo del confort térmico en pollos de engorde con inteligencia artificial

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Design of a statistical predictive model for thermal comfort in broiler chickens using artificial intelligence

Andrés Mauricio Diaz Lopera[1], Jean Pierre Diaz[2], Jairo Alexander Osorio Saraz[3] and Felipe Andrés Obando Vega[4*]

Palabras clave:
Aprendizaje automático
Avicultura de precisión
Bienestar animal,
Monitoreo no invasivo
Sensores de bajo costo

RESUMEN

Este trabajo propone el diseño y validación de un modelo predictivo del índice de confort térmico en pollos de engorde, basado en inteligencia artificial (IA) e Internet de las Cosas (IoT), orientado a pequeños y medianos productores. Se desarrollará una red de biosensores de bajo costo para adquisición en tiempo real de variables microclimáticas y fisiológicas, priorizando señales que reflejan la sensación térmica del ave más que solo el ambiente. Se integrarán temperatura y humedad relativa del aire, velocidad del aire, temperatura de globo negro, radiación y luminosidad, junto con temperatura corporal, y se calcularán índices como THI y BGHI. Los datos serán transmitidos a una plataforma de analítica donde se entrenarán modelos supervisados (regresión y clasificación) para predecir niveles de confort/estrés térmico y generar alertas operativas. La red se validará frente a instrumentos patrón previamente calibrados, con el objetivo de mantener un error relativo <5% y reducir costos >90% respecto a soluciones comerciales. Se espera que el sistema permita anticipar episodios de estrés calórico, optimizar decisiones de manejo y mejorar bienestar y productividad, aportando una solución accesible y escalable para el sector avícola.

Keywords:
Machine Learnig
Precision poultry farming
Animal welfare
Non-invasive monitoring
Low-cost sensors

ABSTRACT

This work proposes the design and validation of a predictive model of the thermal comfort index in broiler chickens, based on artificial intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT), aimed at small and medium-scale producers. A low-cost biosensor network will be developed for real-time acquisition of microclimatic and physiological variables, prioritizing signals that reflect the birds' thermal sensation rather than only the surrounding environment. Variables to be integrated include air temperature and relative humidity, air velocity, black globe temperature, radiation, and luminosity, together with body temperature, and indices such as THI and BGHI will be calculated. The data will be transmitted to an analytics platform where supervised learning models (regression and classification) will be trained to predict comfort/heat stress levels and generate operational alerts. The network will be validated against calibrated reference instruments, aiming to maintain a relative error of less than 5% and to reduce costs by more than 90% compared to commercial solutions. It is expected that the system will allow anticipating heat stress episodes, optimizing management decisions, and improving welfare and productivity, thus providing an accessible and scalable technological solution for the poultry sector.

[1]Estudiante Doctorado, Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia. mauroforestal3@gmail.com
[2]Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia. jpdiaz@elpoli.edu.co
[3]Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. aosorio@unal.edu.co
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7241-7065
*Corresponding author: faobando345@gmail.com

CC BY NC SA

El confort térmico en sistemas intensivos de producción avícola constituye un determinante crítico del bienestar animal, la eficiencia zootécnica y la sostenibilidad económica del sistema productivo. En condiciones de estrés térmico, los pollos de engorde, experimentan alteraciones fisiológicas y conductuales que deterioran la ganancia de peso, el consumo y la conversión alimenticia, con impactos directos sobre la rentabilidad y la resiliencia del sistema (Montoya et al., 2024b; Ribeiro & Yanagi, 2022). Esta vulnerabilidad se vuelve más relevante en un sector que crece de forma sostenida a nivel global y nacional y en el que los pequeños y medianos productores cumplen un papel decisivo, pero enfrentan limitaciones para acceder a tecnologías de monitoreo ambiental y toma de decisiones en tiempo real.

En los últimos años, la incorporación de tecnologías emergentes al ámbito agropecuario ha permitido avanzar desde mediciones ambientales puntuales hacia esquemas de sensado continuo y análisis de datos integrados. Destacan, en particular, los biosensores de bajo costo, los sistemas de sensado microclimático y la analítica basada en inteligencia artificial (IA), con capacidad para capturar, procesar e interpretar señales ambientales y fisiológicas de manera sincrónica (de Oliveira Júnior et al., 2018; Afroz et al., 2024). Además de temperatura y humedad relativa, hoy es viable registrar concentraciones de gases nocivos, niveles de polvo y patrones comportamentales estrechamente asociados al confort térmico y al bienestar (Ben Sassi et al., 2016; Afroz et al., 2024). En paralelo, se reportan redes IoT de bajo costo que integran variables internas y externas junto con parámetros fisiológicos y comportamentales mediante cámaras térmicas, micrófonos y sensores de flujo de aire, conectadas a plataformas abiertas y protocolos de comunicación como MQTT para la toma de decisiones en tiempo real (Saraz et al., 2025; Osorio et al., 2025).

La literatura reciente sostiene que la IA y el aprendizaje automático aplicados a datos avícolas ofrecen un marco prometedor para estimar el confort térmico, anticipar eventos adversos y optimizar la gestión del bienestar animal (Ojo et al., 2022; Sassi et al., 2016). Sin embargo, persiste una brecha entre el potencial de estas herramientas y su adopción efectiva por parte de pequeños y medianos productores, condicionada por barreras económicas, técnicas y de infraestructura (Montoya et al., 2024b; Ribeiro & Yanagi, 2022). Además, buena parte de las soluciones disponibles continúan centradas en el ambiente aéreo del galpón, con escasa consideración de la sensación térmica real del ave y de su respuesta fisiológica y comportamental. En este contexto, se propone el diseño y validación de un modelo predictivo del índice de confort térmico en pollos de engorde, basado en IA e IoT, que integre variables microclimáticas (p. ej., temperatura, humedad relativa, velocidad del aire, temperatura de globo negro, radiación, luminosidad) con indicadores fisiológicos y comportamentales (p. ej., temperatura corporal, agrupacion) y con índices compuestos (THI y BGHI), adquiridos mediante una red de biosensores de bajo costo. El objetivo es anticipar episodios de estrés calórico con un desempeño cuantificable (error relativo <5% frente a instrumentos patrón) y una reducción de costos >90% respecto a alternativas comerciales, ofreciendo una solución accesible, escalable y centrada en el animal para fortalecer el bienestar y la productividad en contextos de recursos limitados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevará a cabo en las granjas experimentales de la Universidad Nacional de Colombia (Medellín), instalando una red de sensores IoT de bajo costo en puntos estratégicos de los galpones (entradas, salidas de aire y zonas de mayor variación térmica). Cada nodo registrará condiciones del ambiente (temperatura, humedad, velocidad del aire, radiación y luz) y respuestas de las aves (temperatura superficial, jadeo y actividad). Los datos se recopilarán de forma continua (microclima cada minuto y señales fisiológicas cada 10–30 segundos) durante al menos 14 días por lote, en dos o más galpones. Todos los equipos serán calibrados con instrumentos de referencia, garantizando una precisión mayor al 95% (Afroz et al., 2024; Ribeiro & Yanagi, 2022).

La información será procesada en una pasarela central que filtrará ruidos, detectará valores anormales y completará huecos cortos de datos. Además, se calcularán los principales índices de confort térmico (THI y BGHI) y se organizarán ventanas de 10 a 30 minutos para obtener variables estadísticas como promedios,

máximos o tendencias. Estos resúmenes serán enviados al servidor principal para su análisis, mientras que los datos originales quedarán almacenados en archivos de respaldo para auditoría o futuros ajustes del sistema (de Oliveira Júnior et al., 2018; Ojo et al., 2022; Osorio et al., 2025).

Finalmente, se entrenará un modelo predictivo que combinará enfoques simples y fáciles de interpretar (regresiones) con otros más avanzados (árboles de decisión y redes LSTM) para aprovechar la información temporal. El sistema será validado comparando galpones y lotes distintos, y se evaluará su precisión con métricas como error promedio, R^2 y F1-macro. En fase operativa, un microservicio entregará en tiempo real: (a) el índice de confort, (b) la probabilidad de cada nivel de estrés y (c) una alerta tipo semáforo cuando exista riesgo de estrés térmico moderado o severo. Ante estas alertas, se activarán protocolos de manejo como ventilación o enfriamiento, buscando anticipar situaciones críticas y mejorar el bienestar animal (Ben Sassi et al., 2016; Ribeiro & Yanagi, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la fase de captura y calidad, se espera que la red de sensores funcione de forma estable y precisa: cada nodo medirá ambiente (temperatura, humedad, velocidad del aire, temperatura de globo negro, luz) y señales del ave (temperatura superficial, jadeo, actividad), con calibraciones previas frente a equipos de referencia. El objetivo es que el error promedio sea <5% y que no aparezca deriva relevante a lo largo de los días. Con esta base, el sistema entregará datos continuos y sincronizados, lo que permite alimentar el modelo sin "huecos" problemáticos y asegurar que cualquier conclusión esté respaldada por mediciones confiables (Afroz et al., 2024; Ribeiro & Yanagi, 2022).

Para que el modelo "entienda" el contexto térmico real, la información se resumirá en ventanas deslizantes de 10–30 minutos (con paso de 1 minuto), calculando promedios, máximos, tendencias y los índices THI y BGHI. Este preprocesamiento se hará en la pasarela de borde, que también filtrará ruido y marcará valores atípicos. El resultado son resúmenes compactos que viajan rápido al servidor y permiten una latencia extremo a extremo $\leq$30 s, requisito clave para tener alertas oportunas y útiles en la operación diaria del galpón (de Oliveira Júnior et al., 2018; Ojo et al., 2022).

Con esos resúmenes, se entrenará un modelo predictivo para dos salidas: (i) un índice continuo de confort térmico y (ii) una clasificación en cinco niveles (de confort a estrés severo). Como metas de desempeño, se esperan RMSE $\leq$10% del rango y R^2 $\geq$0,75 en la salida continua. Además de la precisión, el equipo priorizará la explicabilidad para saber qué variables "marcan"; se anticipa que temperatura de globo negro, humedad, velocidad del aire y temperatura superficial del ave sean determinantes, en línea con la literatura sobre confort térmico en broilers (Ben Sassi et al., 2016; Ribeiro & Yanagi, 2022; Osorio et al., 2025).

En operación, se espera que un microservicio entregue en tiempo real: (a) el valor del índice, (b) la probabilidad de cada nivel de estrés y (c) una alerta tipo semáforo cuando la probabilidad de estrés $\geq$ moderado supere un umbral optimizado. Esto permitirá actuar a tiempo y reducir pérdidas por calor, especialmente en granjas pequeñas y medianas. Como precaución, se controlará la deriva estacional o por cambios de manejo y se programará reentrenamiento periódico si fuese necesario

CONCLUSIÓN

Con el diseño del modelo estadístico y sensores de bajo costo validados, se espera una reducción significativa del tiempo de respuesta ante eventos de estrés térmico y una disminución de pérdidas productivas asociadas al calor (merma de ganancia de peso y conversión). En paralelo, la documentación técnica, las bases de datos estructuradas y la explicabilidad del modelo facilitarán la adopción por equipos de campo, mejorando la toma de decisiones en tiempo real y aportando sostenibilidad para pequeños y medianos productores en contextos de recursos limitados.

El proyecto establecerá como productos, manuales técnicos, protocolos de instalación y calibración, y bases de datos estructuradas para reentrenamiento y vigilancia de deriva, además de una arquitectura reproducible. Este acervo facilita la replicación multi-sitio (otras granjas/climas) y el avance hacia una plataforma para innovación en confort térmico aviar.

La combinación IoT + IA explicable aporta una ruta realista hacia la gestión térmica proactiva y el bienestar animal, con eficiencia energética y costos contenidos. A futuro, la metodología podrá ser transferible a otras especies y a programas de bienestar y salud animal basados en datos, reforzando la sostenibilidad y la competitividad del sector avícola.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por el entorno académico que ha hecho posible esta investigación, y a mis tutores y co-tutores por su guía metodológica y sus observaciones críticas.

REFERENCIAS

Afroz, R., Guo, X., Cheng, C.-W., Omar, S., Carney, V. L., Zuidhof, M. J., & Zhao, R. (2024). Assessments and application of low-cost sensors to study indoor air quality in layer facilities. Environmental Technology & Innovation, 36, 103773. https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103773

Oliveira Júnior, A. J. de, Sousa, G. dos S., Dal Pai, E., Pinheiro de Almeida, O. C., Mollo Neto, M., Plana Simões, R., & de Souza, S. R. L. (2021). System for assessing broilers thermal comfort. Smart Agricultural Technology, 1(5), 100007. https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100007

Montoya, A. P., Obando, F. A., Osorio, J. A., & Gonzalez, V. (2024). Integration of low-cost technologies for real-time monitoring of pigs in pre-fattening stage. Agronomy Research, 22(1), 85–98. https://doi.org/10.15159/AR.24.008 agronomy.emu.ee

Ojo, R. O., Akinola, A. O., Ayandiran, T. A., Ojo, O. A., Adeyemi, O. A., & Oluwatosin, O. O. (2022). Internet of Things and Machine Learning techniques in poultry health and welfare management: A systematic literature review. Computers and Electronics in Agriculture, 198, 107266. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107266 SciELO

de Oliveira Júnior, A. J., de Souza, S. R. L., da Cruz, V. F., Vicentin, T. A., & Glavina, A. S. G. (2018). Development of an android APP to calculate thermal comfort indexes on animals and people. Computers and Electronics in Agriculture, 151, 175–184. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.014 OUCIdblp.org

Pecoraro, C. A., Gonçalves, J. C., Nunes, E. H., Bumbieris Junior, V. H., Tavares Filho, J., & Miranda, K. O. da S. (2024). Enthalpy as a thermal comfort index in broiler poultry production. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 28(1), e270399. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n1e270399 Repositório da Produção USP

Ribeiro, B. P. V. B., Yanagi Junior, T., de Oliveira, D. D., de Lima, R. R., & Zangeronimo, M. G. (2020). Thermoneutral zone for laying hens based on environmental conditions, enthalpy and thermal comfort indexes. Journal of Thermal Biology, 93, 102678. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102678 PubMed

Sellier, N., Guettier, E., & Staub, C. (2014). A review of methods to measure animal body temperature in precision farming. American Journal of Agricultural Science and Technology, 2(2), 74–99. https://doi.org/10.7726/ajast.2014.1008 ResearchGate

Suriano, D., & Prato, M. (2023). An investigation on the possible application areas of low-cost PM sensors for air-quality monitoring. Sensors, 23(8), 3976. https://doi.org/10.3390/s23083976 MDPI

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimación no invasiva de la masa corporal de bovinos lecheros utilizando el área dorsal a partir de imágenes 3D

Non-invasive estimation of dairy cattle body mass using 3D analysis of the dorsal area

Franck Morais de Oliveira[1], Gabriel Araújo e Silva Ferraz[1], Ana Luíza Guimarães André[2], João Victor Aguiar[2], Jacqueline Cardoso Ferreira[1] and Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz[1]

Palabras clave:
Cría de animales de precisión
Ganadería digital
Ganadería lechera
Visión artificial

RESUMEN

La evaluación de la masa corporal (MC) es esencial para el manejo nutricional y productivo del ganado, pero métodos tradicionales como el pesaje en báscula son costosos y estresantes. Este estudio buscó estimar la MC de vacas lecheras de forma no invasiva a partir del área dorsal obtenida de imágenes 3D. Las imágenes fueron capturadas con una cámara Intel RealSense Viewer® D435i, posicionada a 2,8 m, y procesadas en los softwares CloudCompare® (segmentación) y MeshLab® (cálculo del área), seguido de análisis en RStudio. Se utilizaron 158 registros, divididos en 70% para entrenamiento y 30% para prueba. El área dorsal presentó una fuerte correlación con la MC (r = 0,80) y el modelo de regresión lineal simple obtuvo R^2 = 0,65 en entrenamiento y 0,60 en prueba, con un error medio absoluto de 44,66 kg y 44,09 kg, respectivamente. Estos resultados evidencian un desempeño moderado pero consistente, indicando el potencial del área dorsal como variable predictiva de la MC. Se concluye que esta estrategia representa una alternativa prometedora y no invasiva, alineada con las tendencias de la ganadería de precisión, con posibilidades de mejora mediante la integración de otras variables morfométricas y modelos más avanzados.

Keywords:
Precision animal science
Digital livestock farming
Dairy cattle
Computer vision

ABSTRACT

Body Mass (BM) assessment is essential for cattle nutritional and productive management; however, traditional methods such as scale weighing are costly and stressful. This study aimed to estimate dairy cows' BM non-invasively using dorsal area obtained from 3D images. Images were captured with an Intel RealSense Viewer® D435i camera positioned 2.8 m above the ground and processed in CloudCompare® (segmentation) and MeshLab® (area calculation), followed by analysis in RStudio. A total of 158 records were used, split into 70% for training and 30% for testing. The dorsal area showed a strong correlation with BM (r = 0.80), and the simple linear regression model achieved R^2 = 0.65 for training and 0.60 for testing, with mean absolute errors of 44.66 kg and 44.09 kg, respectively. These findings indicate moderate but consistent performance, highlighting the dorsal area's potential as a predictive variable for BM. This approach represents a promising, non-invasive alternative aligned with precision livestock farming trends, with room for improvement through integration of other morphometric variables and advanced predictive models.

[1]Departamento de Engenharia Agrícola, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Brasil. franck.oliveira1@estudante.ufla.br; gabriel.ferraz@ufla.br; jacardosof@gmail.com; patricia.ferraz@ufla.br

[2]Departamento de Zootecnia, Faculdade de Zootecnia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Lavras, Brasil. ana.andre@estudante.ufla.br; joao.aguiar@estudante.ufla.br

CC BY NC SA

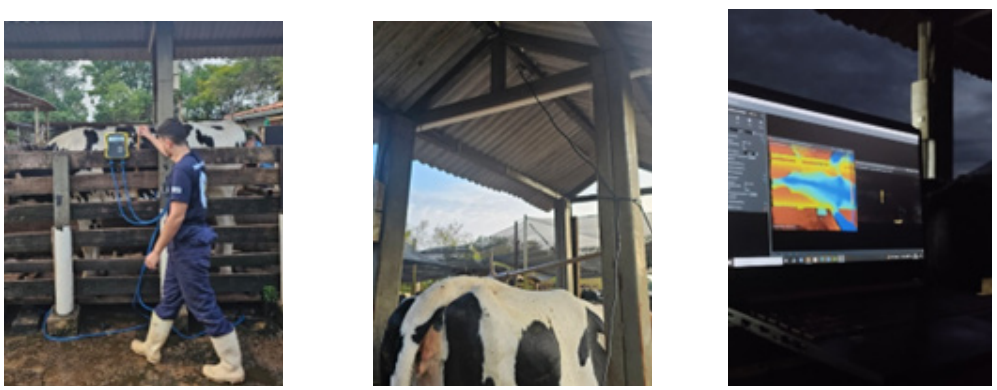
El monitoreo continuo de la Masa Corporal (MC) del ganado desempeña un papel fundamental en la gestión de la salud de los animales, en la intervención alimentaria oportuna y en la maximización de la eficiencia en la selección genética (Gjergji et al., 2020). Los cambios en la MC de las vacas o en su ganancia diaria media durante el crecimiento son esenciales para que los productores de ganado monitoreen las métricas de desempeño, realicen ajustes en el manejo nutricional y tomen decisiones generales de manejo para alcanzar metas específicas de producción (Xiong et al., 2023).

El método más aceptado para la determinación de la MC del animal es una balanza calibrada; sin embargo, no siempre está disponible en la granja (Weber et al., 2020). Además, el manejo tradicional que implica retirar a los animales de los potreros para pesarlos representa un proceso costoso y estresante (Cominotte et al., 2020), tanto para los animales como para los cuidadores, lo que hace necesaria la implementación de métodos alternativos para estimar MC. En este contexto, el uso de imágenes 3D se ha mostrado como una alternativa prometedora para la estimación no invasiva de la MC en bovinos, permitiendo la extracción de medidas morfométricas precisas, como el área dorsal, sin necesidad de manejo directo ni balanzas. El análisis del área dorsal puede proporcionar información relevante sobre la estructura corporal de los animales y servir como base para modelos predictivos de MC. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la predicción de la MC de vacas lecheras a partir del área dorsal obtenida mediante imágenes 3D, proponiendo un enfoque práctico y automatizado, alineado con las demandas de la ganadería de precisión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio siguió todos los protocolos experimentales aprobados por el Comité de Ética e Investigación Animal de la Universidad Federal de Lavras – Brasil/MG, conforme al protocolo CEUA nº 8093310125. El experimento se llevó a cabo en una granja de ganado lechero ubicada en el municipio de Ijaci, estado de Minas Gerais, Brasil, en las coordenadas 21°09'40.1"S 44°55'45.3"W. Los datos utilizados en este trabajo se recopilaron de vacas de la raza Holstein-Frísia en lactación, utilizándose un total de 158 registros para el análisis. Las vacas presentaron MC entre 465 kg y 855 kg, con un promedio de 627,5 kg, y fueron alojadas en instalaciones tipo *Tie-stall* con cama de arena.

Las vacas eran ordeñadas diariamente a partir de las 05:00 a.m., completándose el proceso alrededor de las 08:30 a.m. Inmediatamente después del ordeño, cada animal era conducido a un tronco de contención equipado con una balanza electrónica Tru-Test, modelo Ezi-Weigh5, con una resolución de 5 kg (Figura 1a). En esta estructura se instaló una cámara de profundidad Intel RealSense D435i, ubicada en la parte superior del tronco de contención, a aproximadamente 2,8 m de altura respecto al suelo, con el fin de capturar imágenes desde la perspectiva superior de los animales (Figura 1b). Durante el pesaje individual, además del registro de la MC, se realizó la adquisición de una secuencia de imágenes (Figura 1c).



(a) (b) (c)

Figura 1. a) Vaca contenida en la báscula para pesar; b) Cámara superior instalada; c) Captura de imágenes superiores.

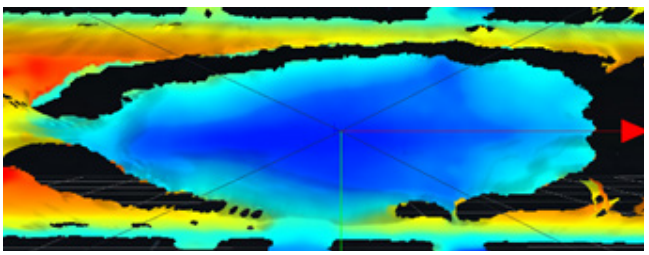


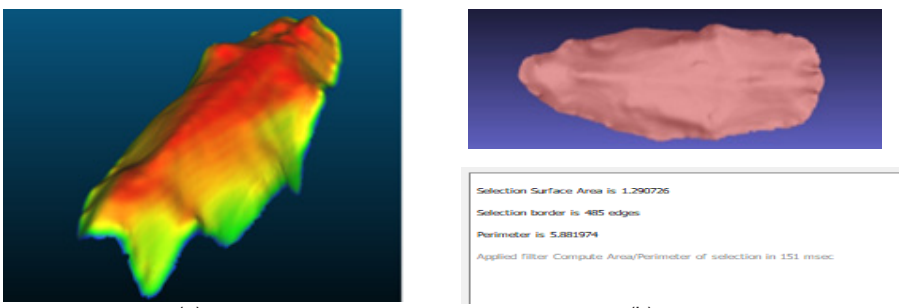
Figura 2. Ejemplo de imagen dorsal tridimensional de un bovino a escala.

Las imágenes de profundidad dorsal (Figura 2) fueron capturadas por el software Intel RealSense Viewer® (versión 2.56.2) y guardadas en formato ".ply", preservando la información detallada de profundidad y geometría de los objetos.

Las imágenes fueron procesadas en CloudCompare® (v.2.13.1) para segmentar el dorso y en MeshLab® (v.2023.12) para calcular el área superficial. Los valores obtenidos se organizaron en una hoja de cálculo e importaron a RStudio® (v.2025.05.1), donde se construyó un modelo de regresión lineal simple. Los datos (158 registros) se dividieron en 70% para entrenamiento y 30% para prueba, garantizando la validación del desempeño predictivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se puede observar una imagen resultado de la segmentación realizada en el software CloudCompare® y la captura del área dorsal realizada en el software MeshLab®.



(a) (b)

Figura 3. Imágenes resultantes: a) Segmentación realizada en CloudCompare®; b) medición de área en MeshLab®.

En la Tabla 1 se muestra el análisis descriptivo de las variables morfológicas y CM de los animales, incluyendo valores medios, mínimos y máximos, permitiendo una caracterización inicial del conjunto de datos.

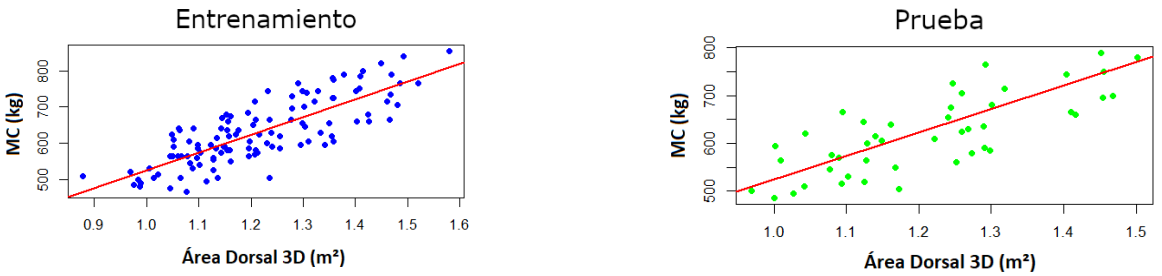
Table 1. Análisis descriptivo de variables.

Variables	Mínimo	Promedio	Máximo
Masa Corporal (kg)	465,0	627,5	855,0
Área Dorsal (m²)	0,88	1,21	1,58

El promedio del área dorsal 3D encontrado en este estudio (1,21 m²) está en concordancia con los valores reportados por Martins et al. (2020) para vacas Holandesas en lactación (1,24 m²). La proximidad entre los resultados sugiere que el enfoque utilizado para la segmentación y medición del área dorsal en este estudio es compatible con métodos previamente validados. Se encontró un valor de correlación por el método de Pearson de 0,80

entre el área dorsal y la MC. Según Mukaka (2012), las correlaciones entre 0,7 y 0,9 se clasifican como "alta correlación positiva", lo que indica una fuerte relación entre las variables. Por lo tanto, es posible considerar que, en general, cuando el área dorsal aumenta, la MC también aumenta de forma proporcional. Esto demuestra que el área dorsal puede utilizarse de manera confiable como un indicador de la MC.

En algunas aplicaciones, el interés está en la predicción de una variable a partir de información extraída de las imágenes (Fernandes et al., 2020). De la misma manera, este estudio busca estimar la variable continua MC con base en las mediciones del área dorsal obtenidas a través de imágenes. Para ello, se realizó una regresión lineal utilizando el área dorsal 3D. Los resultados de este análisis pueden observarse en la Figura 4.



(a) (b)

Figura 4. Modelos de regresión: a) Modelo de entrenamiento 3D; b) Prueba del modelo 3D.

La ecuación de regresión lineal para el área dorsal 3D se obtuvo como se muestra en la ecuación [1]:

$$MC_{3D} = 32.63 + 492.35\ x\ A_{3D} \quad [1]$$

Donde MC_{3D} representa la masa corporal (kg) estimada a partir del área 3D y A_{3D} representa el área dorsal 3D (m^2). El coeficiente positivo indica que un aumento del área dorsal 3D se asocia con un aumento proporcional de la MC. El modelo mostró un ajuste significativo ($P < 0,001$), lo que refuerza la relación entre las variables. Para complementar el análisis de la ecuación de regresión, la Tabla 2 muestra las métricas de rendimiento de los modelos ajustados para predecir la MC a partir del área dorsal 3D.

Table 2. Métricas de rendimiento del modelo.

Variables	Entrenamiento		Prueba	
	R^2	MAE	R^2	MAE
3D Dorsal Area	0.65	44.66	0.60	44.09

Aunque el modelo de regresión lineal simple mostró un desempeño moderado (R^2 = 0,65 en entrenamiento y 0,60 en prueba; MAE de 44,66 kg y 44,09 kg), los resultados evidencian limitaciones en la predicción de la MC basándose solo en el área dorsal, posiblemente por el número reducido de muestras y la variabilidad morfológica. No obstante, los hallazgos destacan el potencial de esta variable como indicador no invasivo en la estimación de la MC. Según Gomes et al. (2016), medidas asociadas al tórax, como la anchura, presentan fuerte correlación con la MC, mientras que el área dorsal varía según la raza, lo que confirma la influencia de la morfología en la precisión de los modelos. Estos resultados refuerzan la importancia de enfoques integradores y el uso de técnicas más avanzadas, en línea con las tendencias de la ganadería de precisión.

CONCLUSIÓN

El área dorsal obtenida a partir de imágenes 3D demostró ser capaz de estimar la masa corporal de vacas lecheras con un desempeño moderado, evidenciando su viabilidad como una alternativa no invasiva para el monitoreo animal y reforzando el potencial de la visión por computadora en la ganadería de precisión. Estos

hallazgos contribuyen al avance de estrategias no invasivas y de menor costo para el monitoreo animal, destacando la importancia de la visión por computadora en la ganadería de precisión y señalando caminos para futuras investigaciones que integren múltiples variables y técnicas más robustas de modelado predictivo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la CAPES por la concesión de la beca de estudios. También agradecemos al CNPq por el apoyo financiero, a través de las Becas de Productividad en Investigación (Procesos nº 302584/2025-0 y nº 310186/2023-4) y del Proyecto de Investigación (Proceso nº 444384/2024-3). Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Federal de Lavras/Brasil y al Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola (PPGEA), perteneciente a la Escuela de Ingeniería de la Universidad Federal de Lavras (UFLA).

REFERENCIAS

Cominotte, A., Fernandes, A. F. A., Dorea, J. R. R., Rosa, G. J. M., Ladeira, M. M., Van Cleef, E. H. C. B., ... & Neto, O. M. (2020). Automated computer vision system to predict body weight and average daily gain in beef cattle during growing and finishing phases. Livestock Science, 232, 103904.

Fernandes, A. F. A., Dórea, J. R. R., & Rosa, G. J. D. M. (2020). Image analysis and computer vision applications in animal sciences: an overview. Frontiers in Veterinary Science, 7, 551269.

Gjergji, M., de Moraes Weber, V., Silva, L. O. C., da Costa Gomes, R., De Araújo, T. L. A. C., Pistori, H., & Alvarez, M. (2020, July). Deep learning techniques for beef cattle body weight prediction. In 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (pp. 1-8). IEEE.

Gomes, R. A., Monteiro, G. R., Assis, G. J. F., Busato, K. C., Ladeira, M. M., & Chizzotti, M. L. (2016). Estimating body weight and body composition of beef cattle trough digital image analysis. Journal of Animal Science, 94(12), 5414-5422.

Martins, B. M., Mendes, A. L. C., Silva, L. F., Moreira, T. R., Costa, J. H. C., Rotta, P. P., ... & Marcondes, M. I. (2020). Estimating body weight, body condition score, and type traits in dairy cows using three dimensional cameras and manual body measurements. *Livestock science*, *236*, 104054.

Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. Malawi medical journal, 24(3), 69-71.

Weber, V. A. D. M., Weber, F. D. L., Gomes, R. D. C., Oliveira, A. D. S., Menezes, G. V., Abreu, U. G. P. D., & Pistori, H. (2020). Prediction of Girolando cattle weight by means of body measurements extracted from images. Revista Brasileira de Zootecnia, 49, e20190110.

Xiong, Y., Condotta, I. C., Musgrave, J. A., Brown-Brandl, T. M., & Mulliniks, J. T. (2023). Estimating body weight and body condition score of mature beef cows using depth images. Translational Animal Science, 7(1), txad085.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Visión por computadora aplicada a la identificación de cerdos: Segmentación y clasificación

Computer vision applied to swine identification: Segmentation and classification

Franck Morais de Oliveira[1], Felipe Andrés Obando Vega[2], Gabriel Araújo e Silva Ferraz[1], Jairo Alexander Osorio Saraz[3], Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz[1] and Verónica González Cadavid[4]

Palabras clave:
Ganadería digital
Inteligencia artificial
Zootecnia de precisión

RESUMEN

La porcicultura requiere soluciones tecnológicas que reduzcan la subjetividad y el estrés de métodos manuales. Este estudio desarrolló un sistema automático de segmentación e identificación individual de cerdos con visión por computadora, utilizando YOLOv8. Se recopilaron imágenes en sistemas intensivos con múltiples animales y marcaciones dorsales numéricas, dividiendo el conjunto en entrenamiento (60%), validación (20%) y prueba (20%). El modelo alcanzó en prueba precisión de 0.832, recall de 0.913, mAP@0.50 de 0.914 y mAP@0.5:0.95 de 0.817. Los resultados muestran la simplicidad y robustez del enfoque, destacando su potencial para monitoreo automatizado, eficiente y compatible con el bienestar animal, confirmando la viabilidad de integrar segmentación moderna y redes neuronales en soluciones escalables para la porcicultura.

Keywords:
Digital livestock farming
Artificial intelligence
Precision livestock farming

ABSTRACT

Pig farming demands technological solutions that reduce subjectivity and stress from manual methods. This study developed an automatic system for pig segmentation and individual identification using computer vision with YOLOv8. Images were collected in intensive systems with multiple animals and dorsal numeric markings, and the dataset was split into training (60%), validation (20%), and testing (20%). On the test set, the model achieved precision of 0.832, recall of 0.913, mAP@0.50 of 0.914, and mAP@0.5:0.95 of 0.817. The results demonstrate the simplicity and robustness of the approach, highlighting its potential for automated, efficient, and welfare-oriented monitoring, confirming the feasibility of integrating modern segmentation and neural networks into scalable solutions for pig farming.

[1]Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil. franck.oliveira1@estudante.ufla.br; gabriel.ferraz@ufla.br; patricia.ponciano@ufla.br
[2]Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Institución Universitaria Digital de Antioquia, Medellín, Colombia. felipe.obando@iudigital.edu.co
[3]Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. aosorio@unal.edu.co
[4]Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Producción Animal, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. vgonzal@unal.edu.co

CC BY NC SA

La creciente preocupación por el comportamiento, la salud y el bienestar de los animales ha impulsado la búsqueda de sistemas automatizados de monitoreo, dado que la observación manual a lo largo del tiempo resulta laboriosa y poco eficiente (Huang et al., 2023). Con el desarrollo de la inteligencia artificial y la tecnología de automatización, el uso de cámaras de video para este tipo de monitoreo de cerdos se ha vuelto más relevante, especialmente en la industria porcina moderna (Tu, 2021).

Las imágenes capturadas en sistemas de monitoreo animal contienen una gran cantidad de información útil que puede aprovecharse con el avance de nuevos enfoques y herramientas (Oliveira, 2021), lo que se enmarca en el crecimiento de la ganadería digital apoyada por algoritmos de inteligencia artificial para comprender mejor el comportamiento y las necesidades de los animales (de Oliveira, 2024). En este contexto, la detección individual mediante imágenes o videos es un paso clave, y puede realizarse con técnicas como bounding boxes, keypoints o segmentación de instancias, siendo esta última especialmente prometedora al permitir una identificación precisa de cada animal y su separación incluso en escenarios complejos y con superposición (Brünger et al., 2020; Huang et al., 2023).

El método manual de medición corporal en porcicultura presenta limitaciones como alto costo, subjetividad y riesgo de estrés animal (Mao et al., 2024). Como alternativa, la segmentación de instancias ofrece una representación más precisa de la morfología, especialmente en sistemas intensivos donde la identificación individual es clave para el monitoreo y la gestión. Este estudio busca desarrollar un sistema que segmente automáticamente el dorso de cerdos y los clasifica individualmente por marcas dorsales numéricas, posibilitando identificación automatizada y escalable. Se parte de la hipótesis de que esta etapa es fundamental para análisis zootécnicos posteriores, como la predicción del peso corporal, y para establecer bases de sistemas de monitoreo más completos. Por lo tanto, esta primera parte resulta esencial para consolidar las bases de sistemas de monitoreo automatizado más completos en el futuro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo de acuerdo con las directrices éticas establecidas por el Comité de Ética en el Uso de Animales (CICUA-057-20) de la Universidad Nacional de Colombia de la sede Medellín.

Las imágenes se obtuvieron en una granja experimental de la Universidad Nacional de Colombia (Rionegro, Antioquia), donde 10 cerdos fueron alojados en corrales equipados con báscula para registrar su peso. Se utilizaron dos cámaras ArduCam OV5647 NoIR instaladas en vista superior, grabando videos continuamente durante dos meses (diciembre de 2021 y enero de 2022). A partir de estos videos, un algoritmo en Python permitió extraer fotogramas representativos, conformando una base de datos de 2401 imágenes RGB.

La base de datos se dividió en 60 % para entrenamiento (1524 imágenes), 20 % para validación (438) y 20 % para prueba (439). Las anotaciones se realizaron en MakeSense con la herramienta Polygon para segmentar el dorso de los cerdos. Solo se incluyeron imágenes con vista dorsal completa, excluyendo aquellas con animales acostados, superpuestos o parcialmente fuera del encuadre.

Las anotaciones realizadas en las imágenes siguieron directrices inspiradas en trabajos de referencia, como los de Wang et al. (2008) y Wongsriworaphon et al. (2015), los cuales indican la exclusión de la cabeza y la cola de los cerdos como una estrategia eficaz para representar con mayor precisión el área dorsal. Este enfoque tiene como objetivo estandarizar la segmentación y evitar variabilidades indeseadas causadas por partes del cuerpo con mayor movilidad o formas menos regulares. Cada cerdo fue identificado visualmente mediante un número marcado en su dorso y asociado a una clase individual, totalizando 10 clases distintas (del 1 al 10). Las anotaciones se exportaron en formato “Single File in COCO JSON format”, compatible con el modelo YOLOv8. Ejemplos representativos de los criterios utilizados en las anotaciones se presentan en la Figura 1.



(a) (b) (c)

Figura 1. a) Cerdos en postura adecuada, sin superposición y posicionados de forma centralizada en el campo de visión de la cámara, considerados aptos para anotación; b) Clases anotadas en la Figura 1-a en el software MakeSense; c) Cerdos acostados o ubicados en los extremos de la imagen, donde el área dorsal no es completamente visible o presenta distorsión, siendo descartados del proceso de anotación

El modelo se entrenó en Google Colab con GPU T4, usando la arquitectura YOLOv8-Large preentrenada (yolov8l-seg.pt) para segmentación de instancias. El proceso incluyó 200 épocas, imágenes de 640×640 píxeles, batch size de 16 y técnicas de data augmentation (ajustes de color, rotación, traslación, escalado y espejado) para evitar sobreajuste. Los mejores pesos y resultados se almacenaron en Google Drive.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desempeño del modelo se evaluó mediante métricas estándar en segmentación de instancias, como mAP@0.50 y mAP@0.50:0.95, ampliamente consolidadas en el área a partir de iniciativas como el PASCAL VOC (He et al., 2019). Estas métricas reflejan la superposición entre máscaras predichas y reales. Asimismo, se consideraron métricas de clasificación como precision y recall, asociadas a cada instancia segmentada. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.

A diferencia del método de Kashiha et al. (2013), por ejemplo, que requiere etapas complejas como ajuste de elipses y extracción manual de patrones, el modelo desarrollado ofrece un enfoque más simple y automatizado. Con YOLOv8 se logró segmentar y clasificar cerdos simultáneamente a partir de marcas dorsales numéricas, eliminando intervenciones manuales. En prueba alcanzó precisión de 0.832, recall de 0.913, mAP@0.50 de 0.914 y mAP@0.50:0.95 de 0.817, confirmando su buena generalización. Ejemplos de segmentación y clasificación se muestran en la Figura 2.

Table 1. Métricas de Desempeño del Modelo YOLOv8 para Segmentación.

	Precision	Recall	mAP@0.50	mAP@0.50-0.95
Entrenamiento	0.942	0.961	0.986	0.881
Prueba	0.832	0.913	0.914	0.817

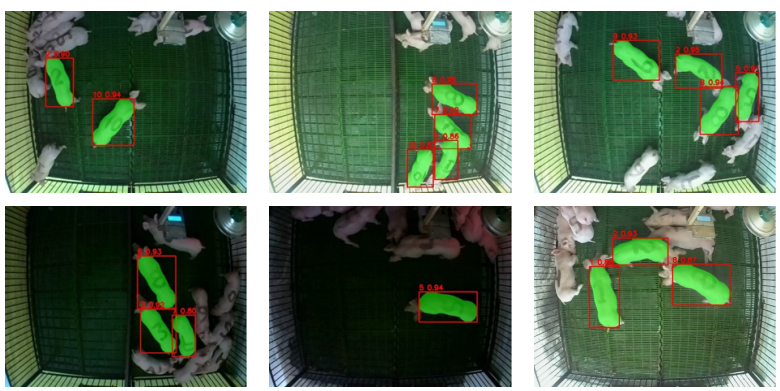


Figura 2. Ejemplos de los resultados de segmentación y clasificación automática obtenidos con el modelo YOLOv8. Las áreas en verde corresponden a la región dorsal segmentada, mientras que las etiquetas en rojo indican la clase asignada a cada cerdo junto con la probabilidad de clasificación. Las seis imágenes dispuestas ilustran diferentes escenarios de agrupamiento, mostrando la capacidad del modelo para reconocer correctamente múltiples individuos en una misma escena.

Los resultados obtenidos con la arquitectura YOLOv8, que realiza segmentación de instancias y clasificación de manera simultánea, evidencian su eficacia incluso con una estructura menos compleja. En el estudio de Xie et al. (2024), el uso aislado de la arquitectura Mask R-CNN con backbone ResNet50 —sin las mejoras propuestas— resultó en algunas métricas inferiores a las obtenidas en este trabajo, con precisión de 82,63%, recall de 84,31% y mAP igual a 86,34%. Sin embargo, los autores mencionados exploran avances estructurales, como la incorporación de módulos de atención (SAM y CAM), que elevan considerablemente el rendimiento de la segmentación. Esto evidencia cómo los ajustes arquitectónicos pueden mejorar los resultados, mientras que el modelo propuesto en este estudio se destaca por ofrecer una solución eficiente y simplificada, con potencial directo para su aplicación práctica en sistemas automatizados de monitoreo y medición en instalaciones de porcicultura.

Aunque el modelo YOLOv8 mostró alta precisión en la segmentación e identificación de los cerdos, es importante reconocer ciertas limitaciones. La dependencia de marcas dorsales visibles puede afectar el desempeño cuando estas están parcial o totalmente cubiertas, y variaciones en las condiciones de iluminación o el uso de cámaras de menor resolución podrían reducir la exactitud. Estudios previos, como el de Jun et al. (2018), también destacan la dificultad de mantener un desempeño consistente en escenarios comerciales, donde el mayor número de animales y la posible ausencia o deterioro de marcas representan desafíos adicionales que deben ser considerados.

CONCLUSIÓN

Los resultados evidencian que las técnicas de visión por computadora pueden aplicarse con alta precisión y robustez, reduciendo la necesidad de procesos manuales y el estrés animal, desafíos recurrentes en la porcicultura moderna. La propuesta presentada representa un paso importante hacia la implementación de sistemas automatizados de monitoreo, aportando soluciones más eficientes y alineadas con la zootecnia digital y la ganadería de precisión. Como perspectiva futura, se plantea avanzar hacia enfoques no invasivos que eliminen la dependencia de marcas físicas, así como explorar modelos tridimensionales capaces de capturar con mayor detalle la morfología de los animales y ampliar la validación del sistema en condiciones comerciales reales.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a la CAPES por la concesión de la beca de estudios. Agradecemos al CNPq por el apoyo financiero, a través de las Becas de Productividad en Investigación (Procesos nº 302584/2025-0 y nº 310186/2023-4) y del Proyecto de Investigación (Proceso nº 444384/2024-3). Agradecemos a la Universidade Federal de Lavras/Brasil y al Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola (PPGEA), perteneciente a la Escuela de Ingeniería de la Universidade Federal de Lavras (UFLA). Por último, agradecemos a la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), sede Medellín, por el apoyo institucional y por posibilitar la realización de este experimento en colaboración con su equipo.

REFERENCIAS

Brünger, J., Gentz, M., Traulsen, I., & Koch, R. (2020). Panoptic segmentation of individual pigs for posture recognition. *Sensors*, *20*(13), 3710.

de Oliveira, F. M., Ferraz, G. A. E. S., André, A. L. G., Santana, L. S., Norton, T., & Ferraz, P. F. P. (2024). Digital and Precision Technologies in Dairy Cattle Farming: A Bibliometric Analysis. *Animals*, *14*(12), 1832.

He, Y., Zhu, C., Wang, J., Savvides, M., & Zhang, X. (2019). Bounding box regression with uncertainty for accurate object detection. In Proceedings of the ieee/cvf conference on computer vision and pattern recognition (pp. 2888-2897).

Huang, E., Mao, A., Hou, J., Wu, Y., Xu, W., Ceballos, M. C., ... & Liu, K. (2023). Occlusion-Resistant instance segmentation of piglets in farrowing pens using center clustering network. *Computers and Electronics in Agriculture*, *210*, 107950.

Jun, K., Kim, S. J., & Ji, H. W. (2018). Estimating pig weights from images without constraint on posture and illumination. *Computers and Electronics in Agriculture*, *153*, 169-176.

Kashiha, M., Bahr, C., Ott, S., Moons, C. P., Niewold, T. A., Ödberg, F. O., & Berckmans, D. (2013). Automatic identification of marked pigs in a pen using image pattern recognition. *Computers and electronics in agriculture*, *93*, 111-120.

Mao, Y., Zhao, Y., & Zhao, Q. (2024, October). An Automatic Measurement Method of Animal Body Size Based on Contour Segmentation. In *2024 IEEE 17th International Conference on Signal Processing (ICSP)* (pp. 370-373). IEEE.

Oliveira, D. A. B., Pereira, L. G. R., Bresolin, T., Ferreira, R. E. P., & Dorea, J. R. R. (2021). A review of deep learning algorithms for computer vision systems in livestock. *Livestock Science*, *253*, 104700.

Tu, S., Yuan, W., Liang, Y., Wang, F., & Wan, H. (2021). Automatic detection and segmentation for group-housed pigs based on PigMS R-CNN. *Sensors*, *21*(9), 3251.

Wang, Y., Yang, W., Winter, P., & Walker, L. (2008). Walk-through weighing of pigs using machine vision and an artificial neural network. Biosystems engineering, 100(1), 117-125.

Wongsriworaphon, A., Arnonkijpanich, B., & Pathumnakul, S. (2015). An approach based on digital image analysis to estimate the live weights of pigs in farm environments. Computers and Electronics in Agriculture, 115, 26-33.

Xie, C., Cang, Y., Lou, X., Xiao, H., Xu, X., Li, X., & Zhou, W. (2024). A novel approach based on a modified mask R-CNN for the weight prediction of live pigs. Artificial Intelligence in Agriculture, 12, 19-28.

Zhou, H., Dong, J., Han, S., Chung, S., Ali, H., & Kim, S. (2025). Weakly supervised learning through box annotations for pig instance segmentation. *Scientific Reports*, *15*(1), 1-15.

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Técnicas de Deep Learning para la clasificación de la *Monilia roreri* en frutos de cacao

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Deep Learning techniques for the classification of *Monilia roreri* in cocoa pods

Joan Alvarado[1]*, Juan Felipe Restrepo-Arias[1], David Velásquez[1] and Juan David Martinez-Vargas[1]

Palabras clave:
Cocoa disease
Computer vision
Deep learning
Monilia

RESUMEN

Este trabajo propone el uso de técnicas de *Deep Learning*, particularmente redes neuronales convolucionales, para la clasificación automática de los diferentes estadios de la enfermedad en frutos de cacao. Se evaluaron dos arquitecturas, MobileNetV2 y Xception, utilizando imágenes capturadas en campo. Los resultados evidencian que MobileNetV2 alcanzó un desempeño superior con una precisión 0.94 y un F1-score macro promedio de 0.93, consolidándose como una herramienta eficiente para aplicaciones en agricultura de precisión

Keywords:
Cocoa disease
Computer vision
Deep learning
Monilia

ABSTRACT

This work applies convolutional neural networks for automatic classification of disease stages in cocoa fruits. Two architectures, MobileNetV2 and Xception, were evaluated using images captured in the field. The results show that MobileNetV2 outperformed Xception, achieving an accuracy of 0.94 and an average macro F1-score of 0.93. This demonstrates MobileNetV2's effectiveness for classifying disease stages in cocoa fruits within precision agriculture applications.

[1]Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5611-3553; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9689-1017; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9949-8915; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7037-6925
*Corresponding author: jfalvaradm@eafit.edu.co

CC BY NC SA

El cacao (*Theobroma cacao* .) representa un cultivo de importancia económica y social, especialmente en América Latina, donde países como Colombia, Ecuador y Perú concentran gran parte de la producción (Moraes et al., 2019). No obstante, la incidencia de enfermedades como la moniliasis limita la expansión de las plantaciones y compromete la calidad del producto. La moniliasis se desarrolla en cuatro etapas visibles en las mazorcas: (1) protuberancias (humps), (2) manchas aceitosas (oily spots), (3) manchas marrones (brown spots), y (4) esporulación (white powder) (Cubillos et al., 2019). La mayoría de los estudios previos sobre visión por computadora en la agricultura se enfocan en hojas como punto de análisis (Joseph et al., 2023), (Srivastava et al., 2024); sin embargo, en el caso del cacao, es indispensable evaluar directamente las mazorcas (Rodríguez et al., 2021). Los enfoques recientes basados en Machine Learning han permitido diferenciar entre frutos sanos y enfermos, pero aún existen limitaciones para identificar la enfermedad en una etapa temprana. Este estudio aborda dicha necesidad mediante el entrenamiento y la validación de modelos Deep Learning con imágenes de campo para la clasificación temprana de moniliasis en la mazorca de cacao. Además, se implementa Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) para validar los resultados, resaltando la información espacial en las imágenes de cacao y haciendo que las inferencias del modelo fueran visualmente interpretables (Toda et al., 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Dataset. Se recopilaron imágenes RGB de mazorcas en dos fincas de Antioquia y Santander (Colombia), utilizando cámaras de teléfonos inteligentes. El conjunto de datos se categorizó en: **h0**: frutos sanos, **m1**: etapa de protuberancias (humps), **m2**: manchas aceitosas y marrones, **m3**: esporulación. Los ejemplos de las categorías se ilustran en la Figura 1.

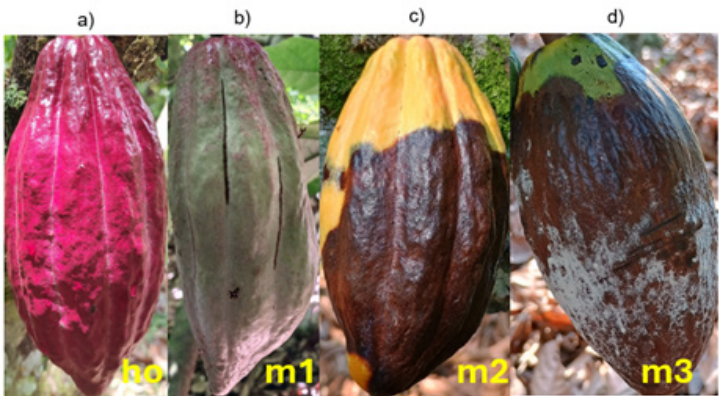


Figura 1. Ejemplo de instancias del dataset. a) mazorca sana, b) etapa 1: protuberancias o gibas, c) etapas 2 y 3: mancha aceitosa y/o cafe, d) esporulación.

Como se observa en la Figura 2, el dataset incluyó aproximadamente 350 imágenes de frutos sanos, 150 de m1, 200 de m2 y 250 de m3. Las imágenes fueron anotadas manualmente con la herramienta CVAT AI y posteriormente divididas en entrenamiento (70%), validación (15%) y prueba (15%). Todas se redimensionaron a 224x224 píxeles.

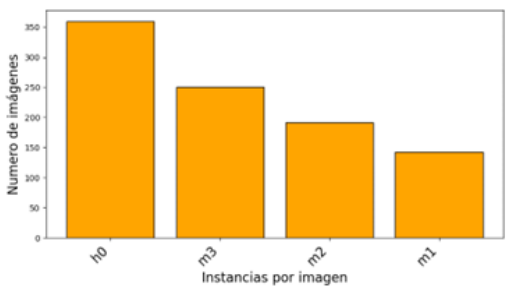


Figura 2. Distribución del dataset de imágenes.

Modelos y configuración de Hiperparámetros

Se implementaron dos arquitecturas de redes neuronales convolucionales pre-entrenadas en ImageNet: **MobileNetV2** y **Xception**. Los modelos se entrenaron durante 20 épocas con un *batch size* de 32, tasa de aprendizaje de 0.001 y optimizador Adam. La función de pérdida utilizada fue *categorical cross-entropy*, dado el carácter multiclase del problema.

RESULTADOS

Evaluación de MobileNetV2

El modelo alcanzó una precisión 0.961 en la etapa de prueba, con una pérdida aproximadamente de 0.3. La curva de entrenamiento mostró una convergencia estable sin indicios de sobreajuste (Ver Figura 3).

Evaluación de Xception.

La arquitectura Xception presentó un rendimiento inferior, con una precisión en prueba de 0.845 y un F1-score promedio menor. Esto confirmó la mayor eficiencia de MobileNetV2 como modelo ligero y eficaz para la tarea propuesta. La Tabla 1 presenta las métricas de los modelos.

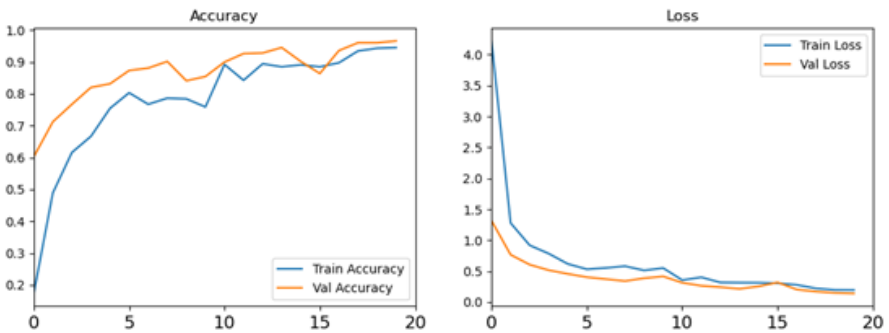


Figura 3. Curvas de entrenamiento y validación de MobilenetV2.

Tabla 1. Resultados de validación de los modelos.

Arquitectura	Precisión en entrenamiento	Error (loss) en entrenamiento	Precisión en prueba	Error (loss) en prueba
MobileNetV2	0.963	0.133	0.961	0.133
XceptionImNet	0.858	0.465	0.848	0.495

Evaluación conjunto de datos a partir de MobileNetV2. La matriz de confusión evidencia un desempeño aceptable del modelo en la clasificación de las clases h0, m1, m2 y m3. La clase h0 alcanzó 194 predicciones correctas, mientras que m1, m2 y m3 lograron 73, 95 y 134 respectivamente. Los errores se presentan en baja proporción y se concentran principalmente entre h0 y m1, así como entre m2 y m3. Además, El reporte de clasificación indicó: h0: F1 = 0.97; m1: F1 = 0.94; m2: F1 = 0.95; m3: F1 = 0.98. Debido a que el conjunto de datos no se encuentra balanceado, F1-Score toma relevancia al proporcionar una métrica equilibrada que combina la precisión y el recall, lo que garantiza que el modelo no beneficie solamente a las clases mayoritarias.

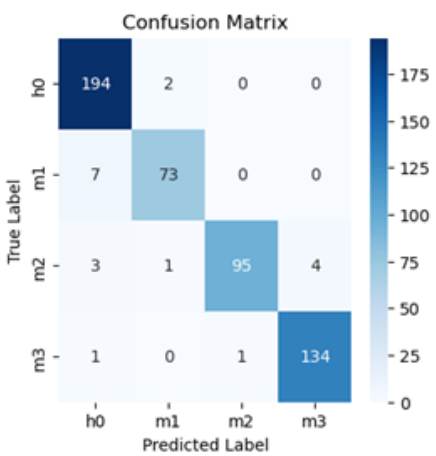


Figura 4. Matriz de confusión.

Interpretación mediante Grad-CAM. Las visualizaciones confirmaron que MobileNetV2 centra su atención en las regiones patológicas de las mazorcas, particularmente en las áreas con irregularidades y manchas. Este resultado aporta interpretabilidad al modelo, aumentando su confiabilidad para aplicaciones en campo. La Figura 3 evidencia como la intepretabilidad del modelo se centra en la giba de la mazorca. En esta Figura, la imagen a) corresponde a la mazorca de cacao en la primerta etapa de la enfermedad observando protuberancias o gibas; mientras que la imagen b) muestra la salida obtenida al aplicar Grad-CAM con la arquitectura MobileNetV2.

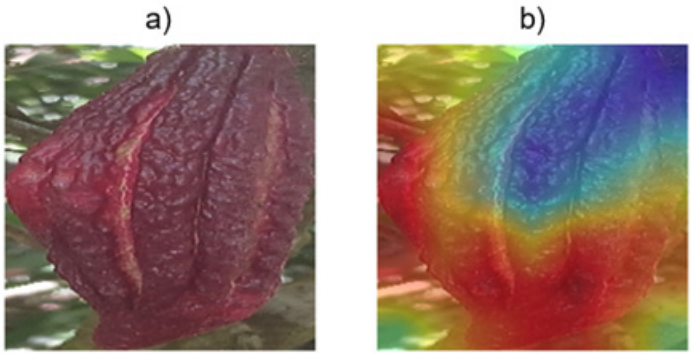


Figura 5. Análisis de interpretabilidad aplicando Grad-CAM
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIÓN

El presente estudio evaluó y comparó las arquitecturas MobileNetV2 y Xception para la clasificación de mazorcas de cacao afectadas por moniliasis. Los resultados evidencian que MobileNetV2 obtuvo el mejor desempeño con 0.94 de precisión y 0.93 de F1-score macro promedio, superando a Xception. La herramienta Grad-CAM aportó interpretabilidad al identificar regiones críticas para la clasificación, lo que refuerza la confianza en el modelo. Finalmente, los resultados indican que modelos ligeros como MobileNetV2 son adecuados para aplicaciones móviles y de campo, brindando una alternativa viable para pequeños agricultores. Como trabajo futuro, se plantea la ampliación del conjunto de datos para mejorar las métricas de las arquitecturas evaluadas, así como la exploración de nuevas arquitecturas basadas en detección de objetos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad EAFIT por el apoyo académico en el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

Chaustre, R., & Castillo, P. (2018). La importancia de la exportación del cacao en Colombia y los países en América Latina. Revista Investigación & Gestión, 1, 20–29.

Moraes, W., Jesus Júnior, W., Peixoto, L., Moraes, W., Furtado, E., Silva, L., Cecílio, R., & Alves, F. (2012). An analysis of the risk of cocoa moniliasis occurrence in Brazil as the result of climate change. Summa Phytopathologica, 38, 30–35.

Cubillos, G. (2019). La moniliasis del cacao: daños, síntomas, epidemiología y manejo. Compañía Nacional de Chocolates.

Rodríguez, C., Alfaro, O., Paredes, P., Esenarro, D., & Hilario, F. (2021). Machine learning techniques in the detection of cocoa (Theobroma cacao L.) diseases. Annals of the Romanian Society for Cell Biology, 25, 7732–7741.

Joseph, D., Pawar, P., & Pramanik, R. (2023). Intelligent plant disease diagnosis using convolutional neural network: A review. Multimedia Tools and Applications, 82, 21415–21481.

Srivastava, M., & Meena, J. (2024). Plant leaf disease detection and classification using modified transfer learning models. Multimedia Tools and Applications, 83, 38411–38441.

Kumi, S., Kelly, D., Woodstuff, J., Lomotey, R., Orji, R., & Deters, R. (2022). Cocoa companion: Deep learning-based smartphone application for cocoa disease detection. Procedia Computer Science, 203, 87–94.

Toda, Y., & Okura, F. (2019). How convolutional neural networks diagnose plant disease. Plant Phenomics. https://doi.org/10.34133/2019/9237136

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/refame

Revista Facultad Nacional de Agronomía

Correlación entre NDRE y la altura de la planta de café obtenida por RPA y LIDAR para la evaluación del vigor del cultivo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Correlation between NDRE and coffee plant height obtained by RPA and LIDAR for crop vigor assessment

Rosalra Maria Alves de Morais[1], Gabriel Araújo e Silva Ferraz[1], Augusto Ávila de Castro[1], Mirian de Lourdes Oliveira[1], Rafael de Oliveira Faria[1] and Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz[1]

RESUMEN

Palabras clave:
Agricultura de precisión
Cultivo de café
Drones
Métodos multisensoriales

Estudios relacionados con la agricultura de precisión demuestran la necesidad de mejorar las tecnologías existentes para el cultivo de café. El uso de sensores a bordo y cámaras multiespectrales en aeronaves pilotadas remotamente para el mapeo de cultivos ha ganado no solo reconocimiento científico, sino que también se ha aplicado a propiedades rurales como las fincas de café. El objetivo de este estudio es evaluar el vigor de la vegetación midiendo NDRE en comparación con la altura de la planta. El estudio se llevó a cabo en una propiedad rural en el municipio de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, Brasil, cubriendo un área correspondiente a 1,3 hectáreas. Se realizaron dos evaluaciones utilizando diferentes equipos fotogramétricos: una con una cámara multiespectral y la otra con un sensor LiDAR. Después de procesar los datos, se marcaron 31 puntos en el área experimental para obtener material para el análisis estadístico, que se sometió a correlación de Pearson y ANOVA. Los resultados mostraron una correlación moderada y una significancia estadística del 5%. Si bien presenta un valor bajo de NDRE, el estudio no presenta el vigor medido por NDRE versus la altura de la planta, variables que son esenciales para monitorear el vigor del café.

ABSTRACT

Keywords:
Precision agriculture
Coffee growing
Drones
Multisensory methods

Studies related to precision coffee farming highlight the need to improve existing technologies for coffee production. The use of onboard sensors and multispectral cameras on remotely piloted aircraft for crop mapping has gained prominence in the scientific community and is being applied on rural properties where coffee is the main crop. The objective of this study is to evaluate vegetation vigor by measuring NDRE in comparison with plant height. The study was conducted on a rural property in the municipality of Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, Brazil, covering an area corresponding to 1.3 hectares. Two flights were conducted with different photogrammetric equipment, one with a multispectral camera and the other with a LiDAR sensor. After processing the data, 31 points were marked in the experimental area to obtain material for statistical analysis, which were subjected to Pearson's correlation and ANOVA. The data showed a moderate correlation and positive statistical significance. Even with a low NDRE value, the crop under study appeared healthy, and the comparison between the vegetation index and plant height is essential for monitoring coffee tree vigor.

[1] Universidad Federal de Lavras, Brasil. ORCID: 0000-0002-0867-120X; ORCID 0000-0001-6403-2210; ORCID: 0009-0005-0759-6710; ORCID: 0000-0001-8165-5284; ORCID: 0000-0003-0488-0204; ORCID: 0000-0002-9708-0259
*Corresponding author: rosalra.morais2@estudante.ufla.br

CC BY NC SA

El estado de Minas Gerais es el mayor productor de café de Brasil. Las principales mesorregiones productoras de café son el Sur/Suroeste de Minas Gerais y el Triángulo Minero/Alto Paranaíba (IBGE, 2024). En este contexto, la Agricultura de Precisión en esta región ha sido una herramienta importante para el sistema de producción agrícola, que abarca tres elementos principales: recopilación de información, aplicación de tecnología y gestión (Wakulicz, 2016).

Los sensores más utilizados han sido los dispositivos de imagen debido a su facilidad de uso, funcionalidad y rápida respuesta. Por lo tanto, esta integración de sistemas electrónicos embebidos con software especializado permite la supervisión y automatización en tiempo real de maquinaria e implementos agrícolas, capaces de monitorizar y adquirir información a través de sensores, así como de realizar cálculos estadísticos predictivos (Souza; Lopes & Inamasu, 2014). Esta tecnología se basa en el principio básico de extraer información generada por sensores instalados en plataformas terrestres, aéreas u orbitales, basándose en el comportamiento de la reflectancia espectral de diferentes objetos en la superficie terrestre, en diferentes regiones del espectro electromagnético (Lillesand; Kiefer & Chipman, 2015; Formaggio & Sanches, 2017).

Estos sensores producen el índice de vegetación de Borde Rojo de Diferencia Normalizada (NDRE), uno de los índices espectrales más utilizados en el cultivo del café. Se ha utilizado para evaluar aspectos específicos de la fisiología vegetal, como el contenido de clorofila, el estrés hídrico y la presencia de pigmentos fotosintéticos (Marin et al., 2022).

Para obtener información sobre topografía y cobertura vegetal, el uso del LiDAR (Light Detection and Ranging) ha demostrado una excelente capacidad para adquirir una gran cantidad de información en un corto período de tiempo, y fue inicialmente pensado para su uso en la recolección de datos para la elaboración de Modelos Digitales de Elevación (DEM), donde los métodos tradicionales no eran suficientes, especialmente en zonas de difícil acceso (Giongo et al., 2010).

El objetivo de este estudio es evaluar el vigor de una planta de café midiendo el NDRE en comparación con la altura de las plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en un área de 1,3 hectáreas destinadas al cultivo de cafeto (*Coffea arabica* L.) del cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, ubicado en la Fazenda Bom Jardim, ubicada en el municipio de Santo Antônio do Amparo, estado de Minas Gerais, Brasil. Esta área se trasplantó en diciembre de 2020 mediante piloto automático, y el 4 de octubre de 2024 se realizaron dos vuelos sobre ella. Un vuelo se realizó con un RPA (Remotely Piloted Aircraft) a bordo equipado con una cámara multiespectral Parrot Sequoia de 16 megapíxeles para fotos RGB (Figura 1A), y para fotos monocromáticas, una cámara de 1,2 megapíxeles recopila datos en bandas espectrales discretas. El otro vuelo se realizó con un RPA a bordo equipado con un sensor LIDAR Zenmuse L2 (Figura 1B), que integra un sistema de navegación inercial (IMU) de alta precisión y una cámara RGB de 20 MP con un sensor CMOS 4/3 y obturador mecánico y electrónico, acoplado a un cardán con estabilidad de 3 ejes. Ambos vuelos se realizaron con el DJI Matrice 350 RPA (Figura 1C).



Figura 1. A: Cámara multiespectral Parrot Sequoia; B: Sensor LIDAR Zenmuse L2; C: DJI Matrice 350

Tras completar los procedimientos de vuelo, las imágenes se procesaron con el software Pix4D para imágenes multiespectrales y Agisoft Metashape Professional para imágenes LiDAR. El procesamiento multiespectral generó las bandas NIR y REDGE, que se utilizaron para calcular el NDRE. Para calcular el NDRE, se calculó el cociente entre la diferencia entre NIR y REDGE y la suma de ambos (Buschmann y Nagel, 1993), según la Ecuación 1.

$$NDRE=\frac{NIR-REDGE}{NIR+REDGE} \quad [1]$$

Donde: NIR: Infrarrojo cercano, REDGE: Borde rojo

Para obtener la altura de las plantas presentes en el área, se utilizó la diferencia entre el Modelo Digital del Terreno (DTS) y el Modelo Digital del Terreno (DTS) en la calculadora ráster Qgis 3.40, según la Ecuación 2.

$$Altura = DSM - DTS \quad [2]$$

Donde: DSM: Modelo Digital de Superficie, DTM: Modelo Digital de Terreno

Tras obtener información sobre el área mediante las ecuaciones mencionadas, se demarcaron 31 puntos en toda el área de estudio para la extracción de datos. Se utilizaron zonas de influencia en QGIS para igualar el tamaño de los puntos demarcados. Para los datos de NDRE, se extrajo la media aritmética de la zona de influencia de 80 cm demarcada, y para los datos de altura, se extrajo la altura máxima presente en la demarcación. Los datos se sometieron a pruebas de normalidad, correlación de Pearson y ANOVA con Microsoft Excel para explicar estadísticamente su comportamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Table 1 presenta los resultados promedio del NDRE y la altura de las plantas en los puntos de recolección de datos. La altura promedio de las plantas fue de 1,21 metros y el NDRE promedio fue de 0,20.

Table 1. Estadísticas descriptivas del estudio.

	Promedio	Varianza	Mínimo	Máximo
Altura(m)	1,21	$1,319x10^{-2}$	0	1,39
NDRE	0,20	$1,89x10^{-4}$	-0,08	0,41

Por lo tanto, se calculó una correlación de Pearson con un valor de 0,4169, lo que indica una correlación moderada, significativa al 5%, entre la NDRE y la altura de la planta. Para una mejor comprensión, se realizó un ANOVA para corroborar la correlación previamente establecida. Se obtuvo un valor p de 0,01965, lo que significa que $p < 0,05$ representa un modelo estadísticamente significativo al 5%, lo que indica que la altura de la planta de café influyó en los valores de la NDRE.

Debido a la baja altura de la planta, el NDRE mostró bajos niveles de respuesta espectral. Esto pudo haber sido influenciado por los períodos de sequía de 2023 y 2024 a los que estuvo sometida esta zona. Según DaMatta, Maestri y Barros (1997), el cultivar en cuestión es más sensible a la sequía. La fotosíntesis es uno de los principales sumideros de electrones en los cloroplastos, y las reducciones en este proceso en condiciones de déficit hídrico pueden generar una condición potencialmente perjudicial para el metabolismo celular (Taiz; Zeiger, 2013).

En estas situaciones, las plantas tienden a absorber más energía de la que pueden utilizar, generando un desequilibrio energético que es uno de los principales factores responsables del aumento de la producción de especies reactivas de oxígeno, lo que puede provocar daño celular (Tatagiba et al., 2016). Según de Melo et al., 2006, la altura promedio de la variedad Catuaí Vermelho IAC 144 es de 1,90 m a aproximadamente 4 años de edad. En este caso, cuando se realizaron los vuelos con la cámara multiespectral y el sensor LiDAR, el área de estudio también tenía aproximadamente 4 años de edad, pero con una altura promedio menor que la citada por el autor. Esto indica que el estrés hídrico provocó una reducción de la clorofila, que se asoció con disminuciones en la conductancia estomática al vapor de agua, menor

uso de energía fotoquímica y aumentos en la disipación de energía en forma de calor y fluorescencia, según (Peloso et al., 2017).

Esta relación entre la NDRE y la altura de la planta puede ayudar a mapear la variabilidad del cultivo, delimitando zonas de manejo específicas dentro del campo. Esto permite diagnosticar no solo las comorbilidades descritas anteriormente, sino también la compactación del suelo y los ataques de plagas. Una forma de combatir estos eventos es mediante acciones específicas en las zonas más afectadas, lo que permite planificar la fertilización y la corrección del suelo mediante mapas de aplicación de dosis variables, especialmente de nitrógeno, que está directamente relacionado con la clorofila capturada por la NDRE. Otra alternativa es monitorear los cultivos durante períodos de sequía e incluso con lluvias intensas para verificar que el crecimiento del cultivo se ajuste a las expectativas.

CONCLUSIONES

Según los datos obtenidos en este estudio, los cultivos en el área de estudio no mostraron vigor, medido por NDRE versus altura de la planta, debido al estrés hídrico causado por los períodos de sequía de los últimos años. Sin embargo, estos resultados pueden orientar a los productores en el manejo de áreas con bajos índices de NDRE y altura, lo que permite implementar acciones localizadas en lugar de un manejo uniforme para mitigar los daños causados por la deficiencia de clorofila, reducir los costos operativos y generar una mayor producción a futuro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CNPq (Procesos n° 310186/2023-4; 302584/2025-0; 175359/2023-7 e 444384/2024), a la FAPEMIG (Proceso nº APQ-00661-22), a la CAPES por el apoyo en forma de becas, así como al Programa de Postgrado en Ingeniería Agrícola (PPGEA) y a la Universidad Federal de Lavras (UFLA) por el apoyo institucional.

REFERENCIAS

Buschmann, C. & Nagel, E. 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. Int. J. Remote Sens. 1993, 14, 711–722. Remote Sens. 14, 711–722.

DAMATTA, F. M.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Photosynthetic performance of two coffee species under drougt. Photosynthetic, Prague, v. 34, n. 2, p. 257-264, Jan. 1997.

De Melo, B.; Velini Marcuzzo, K.; Franco Teodoro & Reges Eduardo. 2006. Avaliação de linhagens de cafeeiro, cultivar catuaí em Uberlândia – MG Revista Ceres, vol. 53, núm. 310, noviembre-diciembre, pp. 614-618 Universidade Federal de Viçosa Vicosa, Brasil.

Formaggio, A. R. & Sanches, I. D. 2017. Sensoriamento Remoto em agricultura. São Paulo: Oficina de textos, 288 p.

Giongo, M.; Koehler, H. S.; Machado, S. do A.; Kirchner, F. F.; Marchetti, M. 2010.. LiDAR: princípios e aplicações florestais. Pesquisa Florestal Brasileira, [S. l.], v. 30, n. 63, p. 231. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.63.231. Disponível em: https://pfb.sede.embrapa.br/pfb/article/view/148. Acesso em: 11 ago. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2024. Produção Agrícola Municipal. Rio de Janeiro.

Lillesand T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J. W. 2015. Remote Sensing and Image Interpretation. 7. ed. USA: Wiley, 736 p.

Marin, D.B, GA e. S. Ferraz , M. Barbari , G. Rossi e L. Conti . 2023. " Detectando nitrogênio em folhas de café com índices de vegetação baseados em UAV e aprendizado de máquina ." Em AIIA 2022: Engenharia de biossistemas em direção ao Green Deal , editado por V. Ferro , G. Giordano , S. Orlando , M. Vallone , G. Cascone e SMC Porto , 1057–1064 . Cham : Springer International Publishing.WAKULICZ, G. J. Sistemas de Informações Gerenciais. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Rede e-Tec Brasil, Santa Maria: RS, 2016.88p. Disponível em:<https://central3.to.gov.br/arquivo/453437/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

Peloso, A. F. et al. 2017. Limitações fotossintéticos em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídríco. Coffee Science, Lavras, v. 12, n. 3, p. 389-399, jul./set. 2017

Sousa, R. V. de, Lopes, W. C., & Inamasu, R. Y. (2014). Automação de máquinas e implementos agrícolas: eletrônica embarcada, robótica e sistema de gestão de informação. In S. M. F. S. Massruhá, M. A. de A. Leite, A. Luchiari Júnior, & L. A. S. Romani (Eds.), Tecnologias da informação e comunicação e suas relações com a agricultura (pp. 215–232). Brasília, DF: Embrapa.

Taiz, L. & Zeiger, E. 2013. Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre: Artmed. 954 p.

Tatagiba, S. D. et al. 2016.Changes in gas exchange and antioxidant metabolism on rice leaves infected by Monographella albescens. Tropical Plant Pathology, Viçosa, v. 41, n. 1, p. 33-41, fev.

Wakulicz, G. J. (2016). Sistemas de informações gerenciais. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Rede e-Tec Brasil.