

Aquí va la portada.

## **Universidad Nacional de Colombia**

**Rector:** Ignacio Mantilla Parada

**Vicerrector:** John Willian Branch

**Decano Facultad de Ciencias:** Arley David Zapata Zapata

**Director Revista Facultad de Ciencias:** Víctor Ignacio López Ríos

Evaluadores Volumen 5

Ruth Álvarez, Universidad de Carabobo, Venezuela

Carlos Alberto Cadavid Moreno, Universidad EAFIT, Colombia

Fernando Alveiro Alzate Guarín, Universidad de Antioquia, Colombia Juan José Arbeláez Toro, ITM, Colombia

Luis Castellanos, Universidad de Antioquia, Colombia

Alvaro Castro Caicedo, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Manuel Cruz López, Universidad de Guanajuato, México

Bernardo Dantas, Instituto de Radioprotección y Dosimetría, Brasil

Gloria Díaz Londoño, Universidad de la Frontera, Chile

Daniel Alexander Flórez Orrego, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Santiago Gallón, Universidad de Antioquia, Colombia

Carolina Giraldo, Universidad del Valle, Colombia

Karoll Gómez Portilla, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Hernán Javier Gómez Zambrano, Universidad de Nariño, Colombia

Graciela González Farias, Centro de Investigación en Matemáticas, CIMAT, México

Rubén Guevara González, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Fredy Hoyos Velasco, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Rodney Jaramillo Justinico, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jaime Jiménez, Colombia Carlos Marina Fernández, Instituto Nacional de Salud Pública, México

José Marulanda Bernal, Universidad EAFIT, Colombia

Claudia Medina, Instituto Alexander Von Humboldt, Colombia

Sandra Bibiana Muriel Ruiz, Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Colombia

Marcelo Luda, CITEDEF, Argentina

Julián Paul Martínez Galán, Universidad de Antioquia, Colombia

Fernando Medina, Universidad de Antioquia, Colombia

Mauro Montealegre Cárdenas, Universidad Surcolombiana, Colombia

Antonio Murillo Salas, Universidad de Guanajuato, México

Gerard Olivar Tost, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jairo Plaza Castillo, Universidad del Atlántico, Colombia

Gustavo Antonio Peñuela Mesa, Universidad de Antioquia, Colombia

Jaime Andrés Pérez Tabora, Instituto de Microelectrónica, Madrid, España

Andrés Ramírez Hassan, Universidad EAFIT, Colombia

Nathaly Reyes Garcés, Waterloo University, USA

Gabriel Rodríguez, Universidad Autónoma Chapingo, México

Allan H. Smith Pardo, U. S Department of Agriculture, USA

Leonardo Solanilla Chavarro, Universidad del Tolima, Colombia

Alba Marina Torres, Universidad del Valle, Colombia

José Vargas Navas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Marisol Valencia Cárdenas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Juan Diego Vélez, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Liliana Vera Londoño, Instituto de Microelectrónica, Madrid, España

**Diagramación en Latex:** Santiago Ríos, Estudiante de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Impreso y hecho en Medellín.

El material de esta revista puede ser reproducido citando la fuente.

# Contenido

EDITORIAL.....	9
ROBUSTIFICACIÓN DE LA CARTA DE CONTROL MULTIVARIADA $\sqrt{ S }$ EN LA FASE I DE CONTROL.....	12
EDWIN DUGARTE PEÑA, NELFI GERTRUDIS GONZÁLEZ ÁLVAREZ	
PRESENCIA DE <i>Wolbachia</i> y <i>Leishmania</i> EN UNA POBLACIÓN DE <i>Lutzomyia evansi</i> PRESENTE EN LA COSTA CARIBE DE COLOMBIA.....	38
RAFAEL J. VIVERO-GÓMEZ, MANUELA GUTIÉRREZ-GARCÍA, CLAUDIA XIMENA-HERRERA, GLORIA CADAVID-RESTREPO, SANDRA URIBE- SOTO	
MÉTODO DIDÁCTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE UN METAL SIN CONTACTO.....	55
BRAYAN PATIÑO JURADO, SIGIFREDO SOLANO GONZÁLEZ	
ANÁLISIS PALINOLÓGICO Y FÍSICOQUÍMICO DE MIEL DE ABEJAS ( <i>Apis mellifera l.</i> ) PROCEDENTE DE ALGUNOS MUNICIPIOS DEL ORIENTE Y SUROESTE DE ANTIOQUIA (COLOMBIA).....	65
CÉSAR A. VELÁSQUEZ, JESÚS H. GIL, JOHN F. URREGO, DIEGO DURANGO, IVONNE M. CASTAÑEDA	
PROGRAMA EN CÓDIGO ABIERTO PARA EL ANÁLISIS BIDIMENSIONAL DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR EL MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE.....	88
LUDGER O. SUÁREZ-BURGOA, EXNEYDER A. MONTOYA ARAQUE	
USO DE LA TÉCNICA DE ALAMBRE CALIENTE PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE INFUSIONES DE CAFÉ ORGÁNICO Y CONVENCIONAL.....	105
FERNANDO GORDILLO-DELGADO, DIEGO FERNANDO VALENCIA- GRISALES, JESÚS PLAZAS-SALDAÑA	
COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ENSAMBLAJE DE ESCARABAJOS COPRÓFAGOS ( <i>Scarabaeidae: Scarabaeinae</i> ) EN DOS FRAGMENTOS DE BOSQUE DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.....	114
ARGEMIRO VARGAS-PÉREZ, DIEGO ESTEBAN MARTÍNEZ-REVELO	

CONVERSATORIO CON EL PROFESOR DANIEL FRANCISCO JARAMILLO JARAMILLO..... 124

GRUPOS DE INVESTIGACIÓN FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MEDELLÍN ..... 137

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín  
Facultad de Ciencias

## COMITÉ EDITORIAL VOLUMEN 5 NÚMERO 2

**Director: Víctor Ignacio López Ríos.** Ph. D. en Ciencias con Orientación en Probabilidad y Estadística. Centro de Investigación en Matemáticas, CIMAT, México. Profesor Asociado Escuela de Estadística. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, email: [revistafc\\_med@unal.edu.co](mailto:revistafc_med@unal.edu.co)

### INTEGRANTES:

- **Juan Carlos Correa Morales.** Ph. D. en Estadística. University of Kentucky, Estados Unidos. Profesor Asociado Escuela de Estadística, email: [jccorrea@unal.edu.co](mailto:jccorrea@unal.edu.co)
- **Carlos Alberto Cadavid Moreno.** Ph. D. en Matemáticas, University Of Texas System. Profesor Titular Universidad EAFIT, email: [ccadavid@eafit.edu.co](mailto:ccadavid@eafit.edu.co)
- **Sandra Bibiana Muriel Ruiz.** Ph. D. en Ciencias-Biología, Universidad del Valle, Colombia. Profesora Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, email: [sbmuriel@elpoli.edu.co](mailto:sbmuriel@elpoli.edu.co)
- **Alberto Germán Lencina.** Ph. D. en Física, Universidade Federal da Paraíba, Brasil. Profesor Universidad Nacional de La Plata, Argentina, email: [agl@ciop.unlp.edu.ar](mailto:agl@ciop.unlp.edu.ar)
- **Elder Jesús Villamizar.** Ph. D. en Matemáticas, Universidade Estadual De Campinas, Brasil. Profesor Universidad Industrial de Santander, email: [jvillami@uis.edu.co](mailto:jvillami@uis.edu.co)
- **María Eugenia Aristizábal Giraldo.** Magíster en Comunicación Organizacional, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Secretaria Técnica Comité Editorial, email: [comunicafc\\_med@unal.edu.co](mailto:comunicafc_med@unal.edu.co)

## COMITÉ CIENTÍFICO

### INTEGRANTES:

- **Fernando Albericio**, España. Ph. D. en Ciencias Químicas, Universidad de Barcelona. Investigador principal del Instituto de Investigación Biomédica de Barcelona (IRB Barcelona) y catedrático de química orgánica de la Universitat de Barcelona (UB).
- **Alfonso Castro**, USA. Ph. D. in Mathematics University of Cincinnati. Professor of Mathematics, Department of Mathematics Harvey Mudd College.
- **Juan José Ibañez Marti**, España. Ph. D. en Ciencias Biológicas y Científico Titular del Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CSIC-Universidad de Valencia)
- **Zbigniew Jarozewicz**, Polonia. Ph. D. en Física, Institute of Physics of Warsaw University of Technology. Profesor Instituto de Óptica Aplicada de Varsovia.
- **Luis Raúl Pericchi Guerra**, Puerto Rico. Ph. D. University of London, Imperial College, Department of Mathematics (Mathematical Statistics). Director Center of Biostatistics and Bioinformatics.
- **Michael Seeger**, Chile. Ph. D. Instituto Gesellschaft für Biotechnologische Forschung en Braunschweig, Alemania. Profesor Titular de la Universidad Técnica Federico Santa María en Valparaíso.
- **Luciano Alberto Ángel Toro**, Colombia. Ph. D. Ciencias Exactas - Física, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Profesor Titular Universidad EAFIT.
- **Jairo Alberto Villegas Gutiérrez**, Colombia. Ph. D. Matemáticas, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor Asociado Universidad EAFIT.
- **Román Castañeda Sepúlveda**, Colombia. Ph. D. en Ciencias Naturales, Technische Universität Berlin. Profesor Titular Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

## CONSEJO FACULTAD DE CIENCIAS 2016

**Arley David Zapata Zapata**

Decano quien preside

**Mauricio Andrés Osorio Lema**

Vicedecano Académico

**Claudia Patricia García García**

Vicedecana de Investigación

**Jorge Alberto Correa Quiroz**

Director De Bienestar Universitario

**Román Eduardo Castañeda Sepúlveda**

Director Escuela De Física y

Representante de los Directores de Escuela

**John Bayron Baena Giraldo**

Director de la Escuela de Matemáticas y

Representante de los Directores de Escuela

**Mónica Reinartz Estrada**

Representante del Consejo Superior Universitario

**Martha Isabel Jiménez Piedrahita**

Representante Estudiantil de Posgrado

**Francisco Luis Montoya Herrera**

Secretario Facultad

**Jair de Jesús Gaviria Arango**

Representante de los profesores ante el Consejo de la

Facultad de ciencias



## EDITORIAL

VÍCTOR IGNACIO LÓPEZ RÍOS<sup>a</sup>

El comité Editorial de la revista de la Facultad de Ciencias presenta a la comunidad académica el segundo número de la revista correspondiente al año 2016. La revista conserva su indexación en la categoría C, como resultado de la convocatoria de la segunda actualización del Índice Bibliográfico Nacional – Publindex 2014. Los artículos de la revista pueden ser consultados en Publindex y en la plataforma OJS de la revista ubicada en el portal de revistas de la Universidad Nacional de Colombia, url: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/>. En este portal la comunidad académica de la Universidad Nacional de Colombia y de otras universidades nacionales e internacionales pueden someter sus trabajos siguiendo los lineamientos de la política editorial de la revista.

A partir de este número la revista de la facultad de Ciencias seguirá publicándose electrónicamente bajo el ISSN 2357-5749.

Este número consta de siete artículos, clasificados como artículos de investigación, todos arbitrados por investigadores nacionales e internacionales. También se incluye un resumen de los grupos de investigación adscritos a la Escuela de Estadística. Por último en la sección invitada denominada “Conversatorio con..”, se presenta la entrevista realizada al profesor Daniel Jaramillo Jaramillo, profesor de la Escuela de Geociencias de la Facultad de Ciencias.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los artículos de este número.

En el primer artículo, Dugarte y González estudian, entre otros aspectos, la robustificación de la carta basada en la raíz cuadrada de la varianza muestral generalizada para el control de la variabilidad de un proceso normal bivariado, en la etapa 1 de la Fase I de control, construida con observaciones sobre subgrupos racionales y utilizando los estimadores robustos MVE, MCD, estimador  $S$ .

En el segundo artículo, Vivero-Gómez y colaboradores, evalúan el ADN de tres especies del género *Lutzomyia* colectadas en el municipio de Ovejas (Departamento de Sucre) para detectar la infección

---

<sup>a</sup>Director Revista Facultad de Ciencias, Ph. D. Profesor Asociado Escuela de Estadística, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

natural por la bacteria *Wolbachia* y la presencia de parásitos del género *Leishmania*. Utilizan el ADN total de 176 individuos adultos y 34 inmaduros (larvas y pupas) de *Lu. evansi*, para evaluar la detección de *Wolbachia* mediante amplificación por PCR del gen WSP (Proteína Mayor de la Superficie de *Wolbachia*) y la infección por *Leishmania* mediante amplificación por PCR de segmentos de los genes HPSN70 (Proteína de Choque Térmico). Encuentran un grupo de machos infectado de forma natural por *Wolbachia* y nueve grupos de hembras con infección natural por *Leishmania*, todos pertenecientes a *Lutzomyia evansi*.

En el tercer artículo, Patiño y Solano, describen un método para caracterizar la conductividad eléctrica de tubos metálicos sin hacer contacto con ellos. Utilizan un circuito LC, a baja frecuencia, para detectar el cambio de inductancia debido a la presencia del conductor en el núcleo de la bobina. Así mismo, implementan un instrumento virtual en LabVIEW para medir los cambios del promedio de la potencia instantánea en la bobina a partir de las mediciones de corriente y voltaje cuando diferentes materiales conductores se disponen en su núcleo.

En el cuarto artículo, Velásquez y colaboradores, determinan la calidad de la miel de *Apis mellifera* subespecie *scutellata*, procedente de algunos municipios del Suroeste y Oriente Antioqueño (Colombia), producidas durante los años 2013 y 2015, a partir de un estudio fisicoquímico y palinológico de 18 muestras. Del análisis fisicoquímico concluyeron que todos los parámetros analizados estaban dentro de los valores establecidos por la normatividad Colombiana, con muy pocas excepciones. En general todas las mieles analizadas fueron de buena calidad y las variaciones en los parámetros analizados, fueron relacionadas con el origen botánico y geográfico de las mismas o errores en el proceso de manipulación. Desde el punto de vista palinológico observaron que la mayoría de las mieles del Suroeste fueron uniflorales y las del oriente multiflorales; la riqueza total de polen de las muestras fue muy variable en ambas regiones, oscilando desde muy pobres a muy ricas. En oriente el taxón más común fue Asteraceae, seguido de Fabaceae, Solanaceae, Myrtaceae (principalmente *Eucalyptus*), *Hypochaeris*, *Borreria* y *Hedyosmum* y en el Suroeste fueron *Coffea arabica* y *Cecropia agustifolia* seguidos de *Mimosa*, *Fabaceae*, *Cordia*, *Mangifera indica* y *Acalypha*.

En el quinto artículo, Suárez-Burgoa y Montoya, realizan una recopilación sobre los desarrollos pasados en la programación computacional referente al análisis de estabilidad de taludes aplicada a la geotecnia. Se presenta el programa desarrollado por los autores, que posibilita resolver problemas de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite mediante las soluciones de Fellenius y de Bishop usando PYTHON3. El programa consiste de 22 funciones procedimentales independientes, que como conjunto forman un sistema anidado que posibilita correr el programa completo; todo esto ayudado por una interfaz gráfica de usuario que se corre desde la terminal. Los resultados se presentan de forma gráfica.

En el sexto artículo, Gordillo-Delgado y colaboradores, implementan la técnica de alambre caliente (comúnmente llamada *hot-wire* por su traducción al inglés), método versátil, de bajo costo y de alta precisión para la medición de la conductividad térmica de fluidos a través del aumento en la temperatura de un alambre que se introduce dentro del fluido y al que se le aplica entre sus extremos, de manera abrupta, una diferencia de potencial. Los autores probaron y calibraron el sistema, utilizando líquidos de conductividad como: agua, etilenglicol y glicerina. Usaron este procedimiento para medir la conductividad térmica de muestras de infusión de café orgánico y convencional. El mismo grado de tostión de los granos, lo verificaron los autores con un colorímetro.

En el séptimo artículo, Vargas y Martínez-Revelo, describen los cambios en la diversidad de escarabajos coprófagos en dos fragmentos de bosque adyacentes de diferente tamaño ubicados en la zona circundante a la represa del río Porce a 200 metros de distancia entre sí. Los autores muestrearon escarabajos coprófagos durante dos días en abril de 2016, mediante el uso de trampas de caída cebadas con excremento humano, también colectaron en total 217 individuos pertenecientes a nueve géneros y 15 especies. Observaron que la riqueza fue similar entre los fragmentos y no encontraron diferencias significativas en términos de diversidad con base en el número efectivo de especies.

En el último artículo, se presenta el conversatorio que integrantes del comité hicieron al profesor de la Escuela de Geociencias, Daniel Jaramillo Jaramillo. Se presenta un recorrido desde la vida temprana e inicios, aficiones, hasta la vida universitaria y profesional del profesor Jaramillo.

Por último, se continúa invitando a nuestros lectores a consultar libremente el contenido de todos los artículos editados por la revista de la Facultad de Ciencias visitando la página web de la revista <http://www.medellin.unal.edu.co/~revistafc/>

# ROBUSTIFICACIÓN DE LA CARTA DE CONTROL MULTIVARIADA $\sqrt{|\mathbf{S}|}$ EN LA FASE I DE CONTROL<sup>a</sup>

## ROBUSTIFICATION OF MULTIVARIATE CONTROL CHART $\sqrt{|\mathbf{S}|}$ IN CONTROL PHASE I

EDWIN DUGARTE PEÑA<sup>b</sup>,  
NELFI GERTRUDIS GONZÁLEZ ÁLVAREZ<sup>c</sup>

Recibido 15-05-2015, aceptado 02-09-2016, versión final 04-09-2016.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** En este artículo se estudia la robustificación de la carta basada en la raíz cuadrada de la varianza muestral generalizada  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  para el control de la variabilidad de un proceso normal bivariado, en la etapa 1 de la Fase I de control, construida con observaciones sobre subgrupos racionales y utilizando los estimadores robustos MVE, MCD, estimador S. Estas cartas se comparan con la carta usual basada en el estimador insesgado muestral  $\mathbf{S}$  de la matriz de covarianza  $\Sigma_0$ , en presencia de outliers provenientes de esquemas de perturbación del tipo contaminación con inflación de  $\Sigma_0$  y contaminación perturbando sólo la correlación. Como medida de desempeño se usa el error cuadrático medio en la estimación de  $\Sigma_0$  y el sesgo absoluto en la estimación de  $\sqrt{|\Sigma_0|}$ , sobre los estimadores insesgados para cada uno de estos parámetros, respectivamente, construidos con los subgrupos racionales que quedan después del proceso de depuración realizado en la Fase I y que se consideran como el conjunto de datos que representa el estado de variación estable del proceso.

**PALABRAS CLAVE:** Control estadístico multivariado, estimación robusta, fase I de control, matriz de covarianzas

**ABSTRACT:** This article, chart robustification based on the square root of the sample generalized variance  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$ , is studied to control the variability of a bivariate normal process in stage 1 of Phase I control, built with observations for rational subgroups, and using the robust estimators, MVE, MCD and estimator S. These charts, are being compared with the usual chart, based on unbiased sample estimator,  $\mathbf{S}$ , of the covariance matrix,  $\Sigma_0$ , in the presence of outliers from perturbation schemes such as,  $\Sigma_0$  inflation contamination, and contamination affecting only the correlation. We use as performance measure, the mean squared error in estimating  $\Sigma_0$ , and absolute bias in the estimate, used  $\sqrt{|\Sigma_0|}$ , about the unbiased estimators for each one of

---

<sup>a</sup>Dugarte Peña, E. & González Álvarez N. G. (2016). Robustificación de la carta de control multivariada  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  en la fase I de control *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 12–37. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n2.50666>

<sup>b</sup>Profesor Asociado, Escuela de Ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, edugar-  
tep@unal.edu.co.

<sup>c</sup>Profesor Asociado, Escuela de Estadística, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, ngonza-  
le@unal.edu.co.

the parameters respectively built with the rational subgroups that remain after the purification process undertaken in Phase 1 and are considered as the data group that represent the stage of the stable variation process.

**KEYWORDS:** Multivariate statistical control, robust estimation, phase I control, covariance matrix

## 1. INTRODUCCIÓN

Ocurre que en muchos procesos de control estadístico se supone que la dispersión del proceso es constante y es igual a la matriz de covarianzas,  $\Sigma$ . Este supuesto no es cierto en general y debe ser validado en la práctica. La variabilidad del proceso se resume en la matriz de covarianzas de dimensión  $p \times p$ , que contiene  $\frac{p \times (p + 1)}{2}$  parámetros. La variabilidad total de un conjunto de datos multivariados, se puede medir por una o más de las siguientes opciones: *i*) La Varianza Generalizada, que corresponde con el determinante de la matriz de covarianzas,  $|\Sigma|$ . Esta es proporcional a la superficie o el volumen generado por un conjunto de datos. *ii*) La raíz cuadrada de la varianza generalizada y *iii*) La traza de la matriz de covarianzas,  $tr(\Sigma)$ , que representa la varianza total o la suma de las varianzas de las variables.

El objetivo primordial del control estadístico de procesos es comprender y controlar la variación de una o varias características de calidad. Para el caso multivariado se han formulado varios esquemas para el monitoreo de la matriz de varianzas y covarianzas (Alt, 1985; Alt & Smith, 1988) y para las cuales a su vez también han sido propuestas algunas modificaciones que tratan de mejorar el desempeño de estos procedimientos en la Fase II de control (Alt, 1985; Alt & Smith, 1988; Djauhari *et al.*, 2008).

La implementación de un proceso de control multivariado requiere dos Fases: Una Fase I, que básicamente es una fase de estimación de los parámetros que describen el proceso en su estado de variación estable, y una Fase II de monitoreo en la que se chequea la continuidad del estado de control a lo largo del tiempo, bajo la operación del proceso.

En la Fase I de control, el principal objetivo es obtener una estimación de los parámetros del proceso (univariado o multivariado) que corresponda a su estado de variación estable. En particular, este trabajo se enfoca en la matriz de covarianzas  $\Sigma_0$ . La estimación está basada en un conjunto de datos históricos que se supone son representativos del estado de variación estable, es decir, sin la presencia de fuentes o causas asignables de variación, supuesto que puede no ser cierto en general y debe ser validado en la práctica.

Un tipo de datos anómalos, asociados a estados de fuera de control, son los conocidos como outliers u observaciones outliers. Dados los efectos adversos que tienen los subgrupos de outliers en la es-

timación de los parámetros, es necesario hacer uso de métodos que no sean fácilmente afectados por este tipo de observaciones. Estos métodos son denominados robustos, cuyos resultados siguen siendo confiables aún si cierta cantidad de datos están contaminados (Rousseeuw & Leroy, 1987).

Este trabajo pretende evaluar en un proceso normal bivariado, la carta de control para el monitoreo estadístico de la raíz cuadrada de la varianza generalizada,  $\sqrt{|\Sigma_0|}$  con observaciones agrupadas, y el desempeño de tales cartas en la depuración del conjunto de datos de Fase I, construidas usando los estimadores robustos MVE, MCD y S y el estimador insesgado muestral usual, en presencia de outliers provenientes de esquemas de perturbación de  $\Sigma_0$ , del tipo contaminación con inflación de esta matriz y contaminación perturbando sólo la correlación. Como medida de desempeño se usa el error cuadrático medio en la estimación de  $\Sigma_0$  y el sesgo absoluto en la estimación de  $\sqrt{|\Sigma_0|}$ , sobre los estimadores insesgados para cada uno de estos parámetros, respectivamente, construidos con los subgrupos racionales que quedan después del proceso de depuración realizado en la Fase I y que se consideran como el conjunto de datos que representa el estado de variación estable del proceso, bajo normalidad bivariada, con observaciones de subgrupos racionales, tomando como referencia la carta  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  (Alt & Smith, 1988).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Control estadístico multivariado

La variación en un proceso se ha caracterizado a partir de dos tipos de causas: comunes y asignables o especiales. En el primer tipo, se asume que la variabilidad observada es debida a la naturaleza propia del proceso y por tal razón, no puede ser alterada sin que el proceso en sí mismo cambie. En el segundo tipo, se consideran las situaciones inusuales o también las causas de lo que puede y debe ser eliminado del proceso.

Los datos que se utilizan en el monitoreo y en el análisis de control estadístico de procesos pueden ser el resultado de observaciones sobre unidades individuales o de observaciones sobre subgrupos racionales. Según Davis & Yen (1998), un subgrupo racional debe ser una muestra tomada de forma tal que se maximice la probabilidad de capturar la variabilidad debida a causas comunes y que cualquier variabilidad debida a causas especiales ocurra entre subgrupos.

Tal y como lo presenta Jensen *et al.* (2006), la Fase I del esquema de monitoreo consiste en determinar si los datos históricos indican o no un proceso estable; por lo tanto, se vuelve muy importante descubrir si hay puntos de datos inusuales tales como outliers antes de calcular los límites de control.

Un supuesto que no siempre se verifica apropiadamente es que los datos de la Fase I provienen de un proceso en control y en particular, la presencia de observaciones outliers dentro del conjunto de da-

tos históricos, recolectados en la Fase I, puede conducir a límites de control “inflados” y estimadores sesgados de los parámetros, que luego conducirán a una menor capacidad para detectar cambios en el proceso durante la Fase II. Según Barnett & Lewis (1998) un outlier es un conjunto de datos en una observación (o subconjunto de observaciones) que parece ser inconsistente (desviarse notablemente) con el resto del conjunto de datos. A partir de uno de los principios generales propuestos por Barnett (1979) para la detección de outliers, es posible inferir un concepto de outlier multivariado: “La observación más extrema es aquella  $\mathbf{X}_i \in \mathbb{R}^p$  cuya omisión en la muestra  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n$  produce el mayor aumento incremental en la verosimilitud maximizada bajo el modelo básico que se haya especificado para los datos restantes. Si este aumento es sorprendentemente grande, se declara que  $\mathbf{X}_i$  es un outlier”. Para el caso de subgrupos racionales y teniendo en cuenta la definición propuesta por Nelson (1988), se puede decir que un outlier es cualquier muestra o subgrupo racional cuyas unidades muestrales se ajustan total o parcialmente a una distribución diferente de la distribución subyacente.

De acuerdo con Jensen *et al.* (2006), los métodos robustos de estimación tienen una clara ventaja sobre los métodos clásicos en que no se ven indebidamente influenciados por los outliers. En consecuencia, son mucho más eficaces en la detección de outliers y en asegurar que los límites de control sean razonables.

## 2.2. Observaciones contaminantes

De acuerdo con Barnett & Lewis (1998), las observaciones contaminantes pueden ser interpretadas como observaciones que provienen de una distribución diferente de la distribución base a la que se ajustan las observaciones. Señalan que la naturaleza y origen de los outliers puede estar determinada por una forma aleatoria o no explicable y/o por una forma determinística y/o por alguna influencia externa que no guarda relación en lo específico con el proceso que se observa.

Dado lo anterior, si se asume que para una población multivariada más de la mitad de los datos son buenos, es decir, se ajustan a una distribución subyacente  $F_\theta$ , y por lo tanto una fracción menor del 50% de los datos no lo son (datos incorrectos o outliers), es decir, no se ajustan al patrón de la mayoría de los datos y provienen de una población diferente y si  $\varepsilon$  representa la fracción de observaciones que se consideran como outliers generados por una distribución diferente  $H$ , entonces según Barnett & Lewis (1998), se define la familia de contaminación a partir de

$$\mathcal{F}_\varepsilon = \{(1 - \varepsilon)F_\theta + \varepsilon H : \theta \in \Theta\} \quad (1)$$

donde  $\varepsilon$  representa la fracción de contaminación.

Para simular la presencia de observaciones contaminantes respecto de la distribución subyacente, se utiliza el concepto de perturbación. Una perturbación se puede interpretar como la suplantación de

información de la distribución subyacente por información de otra u otras distribuciones diferentes. Las perturbaciones han sido clasificadas como perturbaciones difusas y perturbaciones localizadas. Según Tatum (1997), una perturbación se clasifica como difusa si se verifica que las unidades contaminantes u outliers se extienden por todas las muestras o subgrupos racionales con la misma probabilidad de ocurrencia. Señala que la perturbación localizada es aquella en la que se produce un impacto en todas las unidades de una o varias muestras o subgrupos racionales.

### 2.3. Estimación robusta

Según Huber *et al.* (2008), la estimación robusta consiste en encontrar un ajuste “robusto”, que sea similar a la forma que se hubiera encontrado sin los outliers.

Para construir estimadores robustos de  $\Sigma_0$  combinando la información de  $m$  muestras independientes, se requiere sustituir los estimadores de máxima verosimilitud de la matriz de covarianzas por sus análogos robustos. En Todorov & Filzmore (2009) y Djauhari *et al.* (2008) se presentan algunas formas para resolver esta necesidad. En este artículo se optó por utilizar el promedio de las matrices sobre la muestra final de la Fase I.

De acuerdo con Jensen *et al.* (2006) los métodos de estimación robustos pueden ser utilizados con base en dos enfoques diferentes. El primer enfoque es el uso de los estimadores robustos en lugar de los estimadores clásicos. El segundo enfoque consiste en utilizar los estimadores robustos para identificar y eliminar los outliers y luego usar los estimadores clásicos de los restantes datos “buenos”. Aunque los estimadores robustos tienen menor eficiencia ya que sólo utilizan un poco más de la mitad de los puntos disponibles, esta no es tan crucial, ya que los estimadores robustos eventualmente serán reemplazados por estimadores clásicos.

Para esta investigación, los métodos de estimación robustos se utilizan bajo el segundo enfoque. La idea entonces es identificar y eliminar los subgrupos con datos anómalos a partir de la utilización de un estimador robusto y luego usar los estimadores clásicos de los restantes datos “buenos”.

### 2.4. Estimadores robustos multivariados

De acuerdo con Barnett & Lewis (1998), la esencia del concepto de robustez, en cuanto a la presencia de outliers y los métodos robustos, se centra en la necesidad que se tiene de proceder con seguridad a pesar de la presencia de ellos.

El tema de estimación robusta y/o detección de outliers ha sido investigado por muchos autores, entre otros Rousseeuw (1985), quien introdujo bajo normalidad multivariada el estimador del elipsoide de mínimo volumen (MVE) y el estimador de matriz de covarianzas de determinante mínimo



(MCD) propuesto inicialmente por Rousseeuw (1984) y posteriormente mejorado por Rousseeuw & Van Driessen (1999) para detección de outliers.

Según Jensen *et al.* (2006), en aplicaciones de control de calidad en Fase I, el MCD y el MVE se utilizan directamente para determinar outliers multivariados y por lo tanto se vuelve más importante que sean lo suficientemente precisos.

En la revisión realizada se encuentra que Chenouri *et al.* (2009) usaron versiones reponderadas del estimador MCD (RMCD) para hacer seguimiento a observaciones individuales multivariadas en la Fase II de control; Chenouri & Variyath (2010) realizaron estudios para evaluar el desempeño de las cartas T2 de Hotelling's para observaciones individuales con estimadores reponderados MCD, MVE y estimadores S en la Fase II de control y de igual manera, Variyath & Vattathoor (2013) usaron versiones reponderadas de los estimadores MCD y MVE (RMCD y RMVE) para monitorear observaciones multivariadas en la Fase I de control. Aunque probaron que las versiones reponderadas son más eficientes que las versiones MVE y MCD, estas pruebas se realizaron bajo el contexto de observaciones individuales.

A continuación se hace una presentación más detallada de cada uno de los estimadores robustos, incluyendo los estimadores S.

### 2.4.1. Estimadores S

Los estimadores S de  $\boldsymbol{\mu}$  y  $\boldsymbol{\Sigma}$  fueron introducidos por Davies (1987) y además estudiados por Lopuhaä (1989), Rousseeuw & Yohai (1984), citados por Rousseeuw & Leroy (1987) introdujeron en el campo de la regresión la clase de estimadores S. Lopuhaä & Rousseeuw (1991) presentan una generalización de estos estimadores para localización y covarianza multivariada como sigue:

**Definición** Sea  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$  con  $n \geq p + 1$ , un conjunto de  $n$  observaciones en  $\mathbb{R}^p$  y  $\rho: \mathbb{R} \rightarrow [0, \infty)$  que satisface las condiciones

- $\rho(\cdot)$  es simétrica, su derivada  $\psi(\cdot)$  es continua y  $\rho(0) = 0$
- Existe una constante finita  $c_0 > 0$  tal que  $\rho(\cdot)$  es estrictamente creciente en  $[0, c_0]$  y constante en  $[c_0, \infty)$ .

Un estimador S multivariado de localización y covarianza es la solución  $\boldsymbol{\theta}_n = (\mathbf{t}_n, \mathbf{C}_n)$  al problema de minimizar el determinante  $|\mathbf{C}|$  con  $\mathbf{t}_n \in \mathbb{R}^p$  y  $\mathbf{C}_n$  en el conjunto de todas las matrices simétricas definidas positiva de tamaño  $p$ ; es decir, dada una función  $\rho$ , el problema se centra en determinar:

$$(\mathbf{t}_n, \mathbf{C}_n) = \arg \min_{\mathbf{t}, \mathbf{C}} \det(\mathbf{C}), \quad \text{tal que} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho\left(\sqrt{(\mathbf{x}_i - \mathbf{t})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{t})}\right) = b_0 \quad (2)$$

La constante  $b_0$  que puede asumir valores  $0 < b_0 < \sup \rho$  puede ser elegida de acuerdo con una distribución supuesta. La relación anterior puede ser escrita también como

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho(d_i/c) = b_0, \quad \text{donde } d_i = \sqrt{(\mathbf{x}_i - \mathbf{t})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{t})} \quad (3)$$

Al estimador  $\mathbf{t}$  se le denomina un M-estimador de localización, mientras que  $\mathbf{C}$  es un M-estimador de dispersión multivariado. Si estos parámetros se estiman simultáneamente, ellos son llamados S-estimadores. Desde este último punto de vista, sólo se considera S-estimadores ya que son altamente resistentes a los outliers para una función  $\rho$  elegida apropiadamente. La calidad de los S-estimadores depende de la función  $\rho$ . Se recomienda utilizar la función  $\rho$  bponderada de Tukey, ya que ésta no varía con el cambio de dimensión.

Para el cálculo del estimador robusto S, se decidió entre los estimadores robustos S trabajar con el estimador robusto basado en el algoritmo S-FAST propuesto por Salibian-Barrera & Yohai (2006). Para su cálculo, Todorov & Filzmore (2009) y Todorov (2012) proporcionan en el paquete R, en la librería `rrcov` la función `CovSest()` que calcula estimaciones-S multivariadas de localización y escala usando ponderadores de la función bisquare de Tukey's y un algoritmo fast.

#### 2.4.2. Estimadores MVE (elipsoide de mínimo volumen)

La estimación busca encontrar el elipsoide de volumen mínimo que cubre un subconjunto de al menos  $h$  puntos de datos. Los subconjuntos de tamaño  $h$  son llamados conjuntos-medios porque  $h$  se elige a menudo para ser justo mayor o igual que la mitad de los  $n$  puntos de datos.

El estimador MVE, de localización multivariado  $\mathbf{t}$  corresponde al centro del elipsoide de volumen mínimo que cubre al menos el 50% de los puntos; el estimador de covarianza  $\mathbf{C}$  corresponde al volumen de dicho elipsoide multiplicado por un factor de corrección para obtener consistencia (Rousseeuw & Leroy, 1987); luego el estimador MVE de localización y dispersión no corresponde con el vector de medias muestrales y la matriz de covarianzas muestral de un conjunto-medio particular.

Rousseeuw & van Zomeren (1990) presentan un estimador que tiene la propiedad de ser afín equivariante. Sea  $\mathbf{X}_n = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$  un conjunto de  $n$  datos con  $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^p$ , seleccionadas desde una distribución normal  $p$ -variada. El estimador MVE de localización y de la matriz de covarianzas, está definido como el par  $(\mathbf{t}, \mathbf{C})$ , donde  $\mathbf{t}$  es un vector de dimensión  $p$  y  $\mathbf{C}$  es una matriz simétrica definida positiva tal que el determinante de  $\mathbf{C}$  es minimizado sujeto a

$$\#\{i; (\mathbf{x}_i - \mathbf{t})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{t}) \leq a^2\} \geq \left\lceil \frac{n+p+1}{2} \right\rceil = h \quad (4)$$

Donde el símbolo  $\#$  corresponde con el número de puntos que satisfacen la condición y  $a^2$  es una constante que puede tomarse igual a  $\chi_{(0,5,p)}^2$  cuando se espera que la mayoría de los datos provengan

de una distribución normal.

El estimador MVE es afín equivariante debido a que la imagen de un elipsoide a través de una transformación afín no singular; es decir, de la forma  $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}$ , es también un elipsoide con volumen igual a  $|\mathbf{A}| \times \text{vol}$ , donde vol es el volumen original y dado que  $|\mathbf{A}|$  es una constante, el tamaño relativo del elipsoide no cambia bajo transformaciones afín (Rousseeuw & Leroy, 1987).

### 2.4.3. Estimador de la matriz de covarianzas de mínimo determinante (MCD)

Un procedimiento alternativo de estimación al MVE con alto punto de ruptura es el estimador basado en la covarianza de mínimo determinante (MCD), propuesto por primera vez por Rousseeuw (1984) y posteriormente mejorado por Rousseeuw & Van Driessen (1999).

Los estimadores MCD son intuitivamente atractivos ya que un valor pequeño del determinante corresponde con dependencias lineales de los datos en el espacio  $p$ -dimensional cercanas. Esto se debe a que un determinante pequeño corresponde con un valor propio pequeño que sugiere una dependencia casi lineal que a su vez sugiere que hay un grupo de puntos que son similares entre sí (Jensen *et al.*, 2006).

Suponga que se tiene una muestra  $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_1, \dots, \mathbf{Y}_n)'$  de  $n$  observaciones desde una población  $p$ -variada con media  $\boldsymbol{\mu}$  y matriz de dispersión  $\boldsymbol{\Sigma}$ . El estimador MCD se determina a partir de las  $h$  observaciones cuya matriz de covarianzas tenga el menor determinante, con  $n/2 \leq h < n$ . En cada caso, el estimador de localización es el promedio de estas  $h$  observaciones. Si  $y_{MCD} = \{i_1, \dots, i_h\}$  denota los índices de las  $h$  observaciones, entonces

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_{MCD} = \frac{1}{h} \sum_{i \in y_{MCD}} \mathbf{Y}_i \quad (5)$$

así entonces, el estimador resultante de localización es el vector de medias muestral de los puntos que se encuentran en el conjunto-medio (halfset).

El estimador de la matriz de covarianzas es la correspondiente matriz de covarianzas. La matriz de covarianzas obtenida en cada caso se multiplica por un factor de consistencia y otro factor de corrección de sesgo para muestras finitas, para que el estimador sea consistente con el modelo normal y sea insesgado para muestras pequeñas. Adicionalmente, se refina seleccionando aquellos puntos cuya distancia de Mahalanobis a la media inicial, usando la matriz de covarianzas obtenida, no sea demasiado grande, y recalculando la media y la matriz de covarianzas; se tiene que:

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{MCD} = \frac{c(h)s(h, n, p)}{h-1} \sum_{i \in y(MCD)} (\mathbf{Y}_i - \hat{\boldsymbol{\mu}}_{MCD})(\mathbf{Y}_i - \hat{\boldsymbol{\mu}}_{MCD})^T \quad (6)$$

donde  $c(h)$  es una constante de proporcionalidad que hace a  $\hat{\Sigma}_{MCD}$  consistente cuando la distribución de  $y$  sea elíptica simétrica y unimodal; es decir, consistente con el modelo normal multivariado, ver ?, referenciados en Todorov & Filzmore (2009).

Si  $y \sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$  entonces

$$c(h) = \frac{h/n}{P(\chi_{p+2}^2 < \chi_{p,1-h/n}^2)}$$

donde  $\chi_{(p,\alpha)}^2$  denota el  $\alpha\%$  punto de corte de la distribución  $\chi_p^2$ .

La segunda constante de proporcionalidad  $s(h, n, p)$  sirve como factor de corrección de sesgo para muestras finitas de  $\hat{\Sigma}_{MCD}$ . El valor real de este factor depende también de  $n$  y  $p$ ; fue obtenido por Pison *et al.* (2002) a través de una combinación de la simulación Monte Carlo y la interpolación paramétrica, bajo el supuesto de que  $s(h, n, p) \rightarrow 1$  cuando  $n \rightarrow \infty$  para  $p$  fijo. Cerioli *et al.* (2009).

Las ecuaciones (5) y (6) definen las estimaciones robustas MCD de localización y dispersión.

Para el cálculo de los estimadores MVE y MCD Todorov & Filzmore (2009) y Todorov (2012) proporcionan el paquete en R de métodos robustos en la librería **rrcov** en el que se hace una descripción de estimación robusta de localización y escala y análisis robusto multivariado con alto punto de ruptura usando los estimadores MVE y “FAST MCD” respectivamente. En este paquete se presenta la función **CovMve()** que calcula el estimador robusto multivariado de localización y escala utilizando para ello el algoritmo Fast MVE Todorov & Filzmore (2009) y la función **CovMcd()** que calcula el estimador robusto multivariado de localización y escala basado en el algoritmo Fast MCD (Rousseeuw & Van Driessen, 1999).

## 2.5. Precisión de los estimadores

La precisión de un estimador expresa la cercanía de las estimaciones respecto del parámetro de interés. Ante un escenario en el que se tenga que comparar la precisión de varios estimadores clásicos o robustos, se puede hacer uso del error cuadrático medio (ECM) y el sesgo absoluto. Para el caso multivariado, Köksoy (2006) citado por Gomes *et al.* (2012) propuso la aglutinación de las funciones de error cuadrático medio de cada componente del vector de parámetros de interés, que podrían ser o no ponderadas. A partir de este resultado y de acuerdo con Gomes *et al.* (2012) si se supone que  $\boldsymbol{\theta}$  es un vector  $p$ -dimensional y  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  es un estimador  $p$  variado de  $\boldsymbol{\theta}$ , entonces

$$ECM_T[\hat{\boldsymbol{\theta}}] = \sum_{j=1}^p \left[ E(\hat{\theta}_j - \theta_j)^2 \right] = E \left[ (\hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta})^T (\hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}) \right] \quad (7)$$

De otra parte, una propiedad interesante del ECM es que se puede descomponer como la suma de

la varianza del estimador más su sesgo al cuadrado, es decir

$$ECM_{\hat{\theta}, \theta_0} = Var(\hat{\theta}) + Sesgo^2(\hat{\theta})$$

ahora, si se llama  $B = Sesgo(\hat{\theta})$  entonces

$$B = E(\hat{\theta}) - \theta_0$$

y el sesgo absoluto es  $|B|$ , así entonces, por la ley de los grandes números se tendrá que:

$$\text{cuando } m \rightarrow \infty, \overline{E(\hat{\theta}_N)} \rightarrow E(\hat{\theta}) = \mu_{\hat{\theta}}$$

Por lo anterior, para  $N$  grande,

$$\overline{E(\hat{\theta}_N)} - \theta_0 \simeq B$$

y por lo tanto

$$|\overline{E(\hat{\theta}_N)} - \theta_0| \simeq |B|.$$

Para el caso tratado en este artículo,  $N$  representa el número de veces que se simula la Fase I, siendo  $\theta = \sqrt{|\Sigma_0|}$ .

Tal y como se presenta en Tatum (1997), Schoonhoven *et al.* (2011) y Schoonhoven & Does (2012), en esta investigación se tomó como medida de desempeño de la carta de control robustificada en Fase I el error cuadrático medio, así como también el sesgo absoluto. Lo anterior se sustenta en que el fin último del proceso abordado es tener una estimación de los parámetros del proceso que sea representativa del estado estable. Otras medidas como la proporción de outliers detectados o la probabilidad de falsa alarma son más relevantes cuando se trabaja sobre cartas de control para datos individuales, para esto ver por ejemplo Vargas (2003), Chenouri *et al.* (2009), Yañez *et al.* (2010), Variyath & Vattathoor (2013), Jones-Farmer *et al.* (2014).

### 3. CARTAS DE CONTROL

Se requiere determinar la estimación de  $\Sigma_0$  y los límites de control de la carta  $\sqrt{|\Sigma_0|}$  en Fase I, tanto en su forma no robusta como en su forma robusta. Dado que al reemplazar los estimadores insesgados por estimadores robustos no se conoce la distribución en muestras finitas, es necesario usar simulación para el cálculo de los límites de control.

#### 3.1. Carta $\sqrt{|\mathbf{S}|}$

La carta  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  se basa en la raíz cuadrada de la varianza generalizada de la muestra, donde  $\mathbf{S}$  es la matriz de covarianzas  $p \times p$  de la muestra, definida como  $\mathbf{S} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})(\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})^T$ . La

carta resultante puede ser considerada como un análogo multivariado de la carta univariada de la desviación estándar de la muestra, carta  $S$ .

En la Fase I se utilizan sólo los dos primeros momentos de  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  y la propiedad de que la mayor parte de la distribución de probabilidad de  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  se encuentra en el intervalo (por aproximación del Teorema de Límite Central),

$$E(|\mathbf{S}|^{1/2}) \pm 3\sqrt{V(|\mathbf{S}|^{1/2})} \quad (8)$$

A partir de lo que presenta Anderson (1984), se tiene que:

$$|\mathbf{S}|^r \sim |\boldsymbol{\Sigma}_0|^r (n-1)^{-pr} \left[ \prod_{k=1}^p \chi_{n-k}^2 \right]^r \quad (9)$$

así entonces,

$$E(|\mathbf{S}|^r) = |\boldsymbol{\Sigma}_0|^r (n-1)^{-pr} E \left\{ \left[ \prod_{k=1}^p \chi_{n-k}^2 \right]^r \right\} \quad (10)$$

que es equivalente a,

$$E(|\mathbf{S}|^r) = |\boldsymbol{\Sigma}_0|^r (n-1)^{-pr} 2^{pr} \prod_{k=1}^p \left[ \frac{\Gamma(\frac{n-k}{2} + r)}{\Gamma(\frac{n-k}{2})} \right] \quad (11)$$

Si se llama  $b_r = (n-1)^{-pr} 2^{pr} \prod_{k=1}^p \left[ \frac{\Gamma(\frac{n-k}{2} + r)}{\Gamma(\frac{n-k}{2})} \right]$ , entonces

$$E(|\mathbf{S}|^r) = |\boldsymbol{\Sigma}_0|^r b_r \quad (12)$$

de donde, un estimador insesgado de  $|\boldsymbol{\Sigma}_0|^r$  es

$$\widehat{|\boldsymbol{\Sigma}_0|^r} = \frac{|\mathbf{S}|^r}{b_r} \quad (13)$$

así entonces, con  $r = 1/2$ , de (7) y llamando  $b_3 = b_{1/2}$ , se tiene que

$$E(|\mathbf{S}|^{1/2}) = |\boldsymbol{\Sigma}_0|^{1/2} b_3 \quad (14)$$

Ahora, sabiendo que

$$V(|\mathbf{S}|^{1/2}) = E(|\mathbf{S}|) - [E(|\mathbf{S}|^{1/2})]^2$$

se llega al siguiente resultado:

$$V(|\mathbf{S}|^{1/2}) = |\boldsymbol{\Sigma}_0| (b_1 - b_3^2) \quad (15)$$

por lo tanto, si se reemplaza (9) y (10) en (3) se obtiene

$$|\Sigma_0|^{1/2} b_3 \pm 3\sqrt{|\Sigma_0|(b_1 - b_3^2)}$$

es decir

$$|\Sigma_0|^{1/2} \left( b_3 \pm 3\sqrt{b_1 - b_3^2} \right) \tag{16}$$

Para el cálculo de los límites de control de esta carta en Fase I, se requieren estimadores insesgados de  $|\Sigma_0|^{1/2}$ . Suponiendo que se tienen  $m$  muestras independientes de tamaño  $n$  procedentes de un proceso normal bivariado, sea  $\mathbf{S}_k$  la matriz de covarianzas muestral  $p \times p$  de la muestra  $k$ , para  $k = 1, 2, \dots, m$ , donde  $\mathbf{S}_k = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\mathbf{X}_{kj} - \bar{\mathbf{X}}_k)(\mathbf{X}_{kj} - \bar{\mathbf{X}}_k)^T$ .

Un estimador insesgado de  $|\Sigma_0|^{1/2}$  es  $\frac{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |\mathbf{S}_k|^{1/2}}{b_3}$ , por lo tanto si se llama

$$|\mathbf{S}_0|^{1/2} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |\mathbf{S}_k|^{1/2}, \tag{17}$$

se tiene que

$$\widehat{|\Sigma_0|^{1/2}} = \frac{|\mathbf{S}_0|^{1/2}}{b_3} \tag{18}$$

es un estimador insesgado de  $|\Sigma_0|^{1/2}$ . Luego, los límites estimados para la carta  $\sqrt{|\mathbf{S}|^{1/2}}$  están dados por

$$\frac{|\mathbf{S}_0|^{1/2}}{b_3} \left( b_3 \pm 3\sqrt{b_1 - b_3^2} \right) \tag{19}$$

de acuerdo con lo anterior, los límites de control  $3\sigma$  ( $\alpha/2 = 0,00135$ ) para la carta  $|\mathbf{S}|^{1/2}$  en Fase I se pueden determinar mediante:

$$UCL = \frac{|\mathbf{S}_0|^{1/2}}{b_3} \left( b_3 + 3\sqrt{b_1 - b_3^2} \right) \tag{20}$$

$$CL = |\mathbf{S}_0|^{1/2} \tag{21}$$

$$LCL = \max \left\{ 0, \frac{|\mathbf{S}_0|^{1/2}}{b_3} \left( b_3 - 3\sqrt{b_1 - b_3^2} \right) \right\} \tag{22}$$

Es importante tener en cuenta que si  $\mathbf{S}$  es definida positiva, entonces  $|\mathbf{S}|^{1/2} > 0$  y como no es significativo tener un límite de control inferior que sea negativo, en el caso que esto ocurra se ajustará el LCL a cero.

### 3.2. Versión robusta de la carta $\sqrt{|\mathbf{S}|}$

Sea  $\mathbf{S}_R$  el estimador robusto de  $\Sigma_0$ . Siguiendo a (12), se tiene que  $E(|\mathbf{S}_R|^{1/2}) = |\Sigma_0|^{1/2}b_{3R}$  y  $E(|\mathbf{S}_R|) = |\Sigma_0|b_{1R}$ , donde  $b_{1R}$  y  $b_{3R}$  corresponden a la versión robusta de las constantes  $b_1$  y  $b_3$ .

Una vez más, basados en  $m$  muestras independientes de tamaño  $n$  de un proceso normal bivariado, sea  $\mathbf{S}_{R,k}$  el estimador robusto de  $\Sigma_0$  en la  $k$ -ésima muestra,  $k = 1, \dots, m$ . Entonces, un estimador insesgado de  $|\Sigma_0|^{1/2}$  es

$$\widehat{|\Sigma_0|^{1/2}} = \frac{|\mathbf{S}_{0,R}|^{1/2}}{b_{3R}} \quad (23)$$

donde

$$|\mathbf{S}_{0,R}|^{1/2} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |\mathbf{S}_{R,k}|^{1/2}, \quad (24)$$

y similarmente, un estimador insesgado para  $|\Sigma_0|$  es

$$\widehat{|\Sigma_0|} = \frac{|\mathbf{S}_{0,R}|}{b_{1R}} \quad (25)$$

con

$$|\mathbf{S}_{0,R}| = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |\mathbf{S}_{R,k}|, \quad (26)$$

A partir de (19) los límites robustos para la carta  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  se determinan mediante

$$\frac{|\mathbf{S}_{0,R}|^{1/2}}{b_{3R}} \left( b_{3R} \pm 3\sqrt{b_{1R} - b_{3R}^2} \right), \quad (27)$$

donde  $b_{1R}$  y  $b_{3R}$  se determinan siguiendo a (12), es decir,

$$\frac{|\mathbf{S}_{0,R}|}{|\Sigma_0|} = \frac{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |\mathbf{S}_{R,k}|}{|\Sigma_0|} \cong b_{1R}, \quad \frac{|\mathbf{S}_{0,R}|^{1/2}}{|\Sigma_0|^{1/2}} = \frac{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |\mathbf{S}_{R,k}|^{1/2}}{|\Sigma_0|^{1/2}} \cong b_{3R}, \quad \text{cuando } m \rightarrow \infty, \quad (28)$$

Los valores de  $b_{1R}$  y  $b_{3R}$  para los diferentes estimadores tenidos en cuenta se pueden observar en la Tabla 1.

## 4. ESTUDIO DE SIMULACIÓN

El objetivo central de este trabajo es proponer un procedimiento Fase I para el control multivariado de la matriz de covarianzas que sea robusto a outliers y que proporcione un subconjunto de datos históricos con los que se pueda estimar con el menor sesgo y la mejor precisión posible en los parámetros que definen la medida de dispersión multivariada  $\Sigma$ , y  $\sqrt{|\Sigma|}$ , considerando la carta de control de la raíz cuadrada de la varianza muestral generalizada.



Se asumió que  $\boldsymbol{\mu}_0$ ,  $\boldsymbol{\Sigma}_0$  son el vector de medias y matriz de covarianzas bajo la distribución subyacente<sup>d</sup>. y  $\boldsymbol{\mu}_1$ ,  $\boldsymbol{\Sigma}_1$  son las correspondientes a la distribución contaminante, donde, para el caso que nos interesa,  $\boldsymbol{\Sigma}_1$  estará definida como  $\Sigma_1 = \begin{pmatrix} \delta_x \sigma_{0,x}^2 & 0 \\ 0 & \delta_y \sigma_{0,y}^2 \end{pmatrix}$  siendo  $\delta_x$  y  $\delta_y$  el factor de inflación en las respectivas componentes de la matriz de covarianzas.

Las estimaciones de la matriz de covarianzas y los correspondientes límites de control se determinaron con base en 100000 simulaciones. El software utilizado fue el paquete R Core Team (2013).

Los factores de simulación que se sometieron a variación fueron los siguientes:

1. Número de subgrupos ( $m$ ): Este factor tiene como objetivo establecer el efecto del número de subgrupos en el proceso de estimación. Se tomaron valores de  $m = 20, 30$  y  $40$ .
2. Tamaño de los subgrupos ( $n$ ): Este factor tiene como objetivo establecer el efecto del tamaño del subgrupo en el proceso de estimación. Se tomaron valores de  $n = 10, 15$  y  $20$ .
3. Entornos de contaminación. Se manejaron dos entornos de contaminación: contaminación por perturbación localizada y contaminación por perturbación difusa.
4. Esquemas de contaminación. Se manejaron tres esquemas de contaminación:
  - La varianza de una de las características de calidad en  $k$  de los  $m$  subgrupos racionales crece de  $\sigma_{0,x}^2$  a  $\delta_x \sigma_{0,x}^2$  (o  $\sigma_{0,y}^2$  a  $\delta_y \sigma_{0,y}^2$ ) para  $\delta_x, \delta_y > 1$  si el otro permanece fijo.
  - La varianza de las dos características de calidad en  $k$  de los  $m$  subgrupos racionales crece de  $\sigma_{0,x}^2$  a  $\delta_x \sigma_{0,x}^2$  y de  $\sigma_{0,y}^2$  a  $\delta_y \sigma_{0,y}^2$  para  $\delta_x, \delta_y = 1.5$  y  $3$ .
  - Afectando la correlación entre las características de calidad.

De acuerdo con Maronna *et al.* (2006), con respecto a la caracterización real de procesos correlacionados, la decisión de considerar un proceso bivariado no correlacionado se sustenta en el hecho que los estadísticos usados para las estimaciones de la dispersión ( $MCD$ ,  $MVE$  y  $S$ ) en la carta considerada, son afín equivariantes, lo que significa que se comportan adecuadamente bajo transformaciones afines de los datos, es decir, cambiar la escala de medición o localización no debe afectar las propiedades del estimador.

Para el caso del estimador usual bajo los diferentes formatos de contaminación se utilizaron los valores exactos bajo normalidad para las constantes  $b_1$  y  $b_3$ . Tal y como lo presenta Tatum

<sup>d</sup>A partir del supuesto  $\boldsymbol{\Sigma}_0 = I_2$  se tendrá que las variables en el proceso son independientes; no están correlacionadas. una propuesta que también se podría tener en cuenta es la presentada en Vargas & Lagos (2007) en la que toman  $\boldsymbol{\Sigma}_0 = \begin{pmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{pmatrix}$ . En esta propuesta Vargas and Lagos asumen  $\rho = 0.5$

(1997), para proporcionar estimadores insesgados de la  $|S|$  para el caso iid Normal, los valores proporcionados por cada uno de los tres estimadores robustos deben ser divididos por una constante de normalización, en este caso, las constantes  $b_{1R}$  y  $b_{3R}$ . Tales constantes se obtuvieron a partir de un millón de simulaciones. (Ver Tabla 1)

Tabla 1: Constantes  $b_1$  y  $b_3$  para la carta  $\sqrt{|S|}$

$n = 10$				
	Usual	MCD	MVE	S-FAST
$b_1$	0.8894720	1.1236391	0.7015406	0.5538867
$b_3$	0.8891952	0.9466571	0.7618410	0.6751277
$n = 15$				
$b_1$	0.9293023	1.0450593	0.8195529	0.7150831
$b_3$	0.9288599	0.9650706	0.8564492	0.7998158
$n = 20$				
$b_1$	0.947328	1.0388239	0.8714618	0.7910446
$b_3$	0.947327	0.9779878	0.8953765	0.8554401

#### 4.1. Resultados y análisis de resultados

Precisión y sesgo de los estimadores Usual, MCD, MVE y S-FAST, con la carta de control  $\sqrt{|S|}$  sobre la muestra final de la Fase I, asumiendo contaminación localizada. (ver Figuras 1 y 2):

- Bajo condiciones de factor de inflación  $\delta_x$  y/o  $\delta_y=1.5$ , cuando el número de subgrupos contaminantes es bajo,  $k \leq 2$ , tamaño de muestra pequeño,  $n=10$ , y el número de subgrupos  $m=20$ , el procedimiento Fase I diferencia claramente al estimador MCD con alguna ventaja frente a los demás estimadores robustos y el estimador usual, al compararse en cuanto al  $ECM(\hat{\Sigma})$ , ventaja que desaparece o disminuye al incrementar el tamaño de muestra, el número de subgrupos y/o el número de subgrupos contaminados. Llama la atención que con este estimador se presenta la peor condición en cuanto al sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$  en todos los escenarios observados.
- Bajo condiciones de factor de inflación  $\delta_x$  y/o  $\delta_y=1.5$ , con respecto al estimador S-FAST se encontró que su desempeño en cuanto a  $ECM(\hat{\Sigma})$  y sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$  mejora a medida que  $n > 10$  y  $m > 20$ , sin embargo, al ser comparado con los demás estimadores, la ventaja que inicialmente alcanza desaparece en la medida que  $n$  y  $m$  se hacen cada vez más grandes y/o crece el número de subgrupos contaminados.
- Para el estimador MVE su  $ECM(\hat{\Sigma})$  y sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$  no presentan algún mejor desempeño dado que en la generalidad de los resultados, estos se muestran entre los de los demás estimadores.

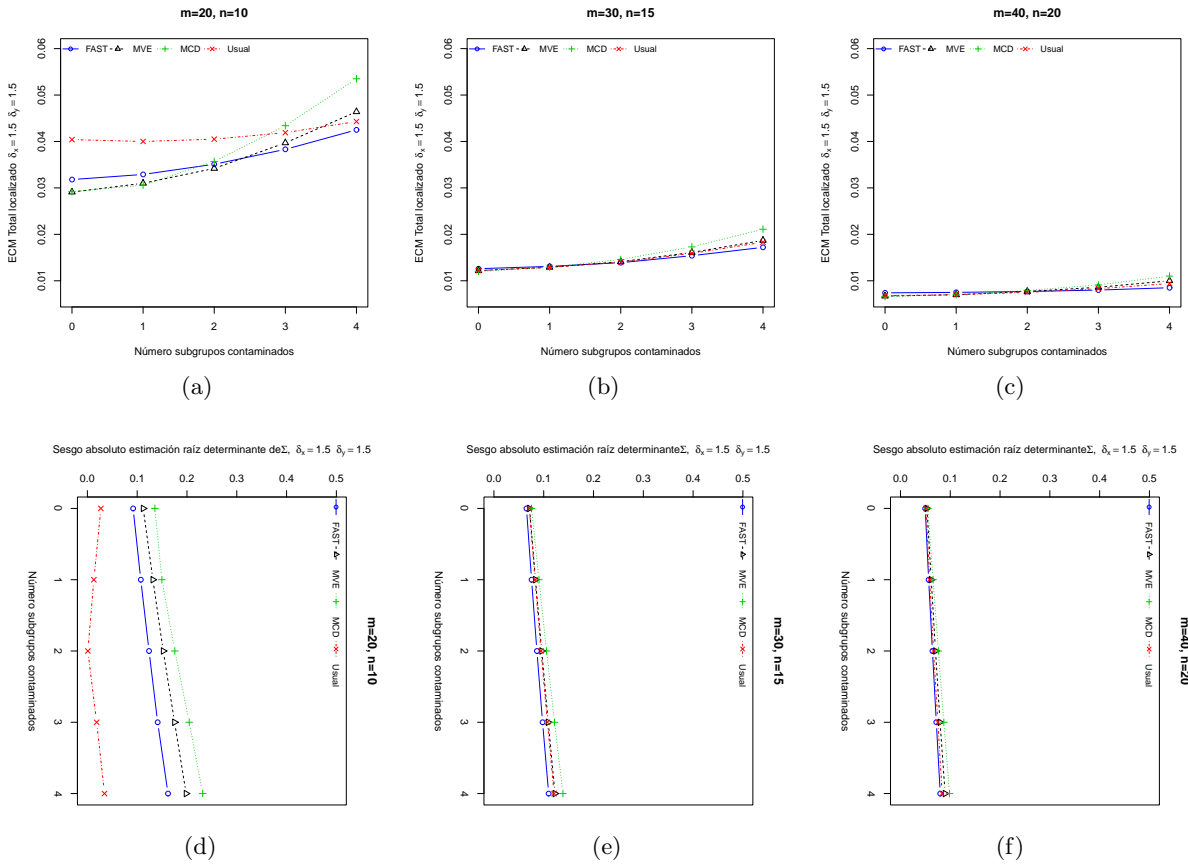


Figura 1: Resultados bajo contaminación localizada con  $\delta_x = \delta_y = 1.5$

- Cuando el factor de inflación de la varianza se elevó a  $\delta_x$  y/o  $\delta_y=3$ , bajo contaminación localizada, en todos los escenarios se presentó peor el estimador MCD tanto en  $ECM(\hat{\Sigma})$  como en el sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$ .
- Bajo condiciones de factor de inflación  $\delta_x$  y/o  $\delta_y=3$ , el procedimiento Fase I usando el estimador S-FAST muestra alguna ventaja bien diferenciada frente a los demás estimadores tanto en  $ECM(\hat{\Sigma})$  como en el sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$ , cuando  $n > 10$  y  $m > 20$ , sin embargo, la ventaja que inicialmente alcanza desaparece en la medida que  $n$  y  $m$  se hacen cada vez más grandes y/o crece el número de subgrupos contaminados.
- Cabe resaltar que en la medida que crece el número de subgrupos, el tamaño de la muestra y el número de subgrupos contaminados, bajo contaminación localizada afectando sólo parámetros de varianza, el  $ECM(\hat{\Sigma})$  de los diferentes estimadores robustos tiende a ser muy similar entre sí y con el estimador Usual, razón por la que se puede asumir que bajo estos términos no se presentan resultados positivos para los casos robustos comparados con el procedimiento

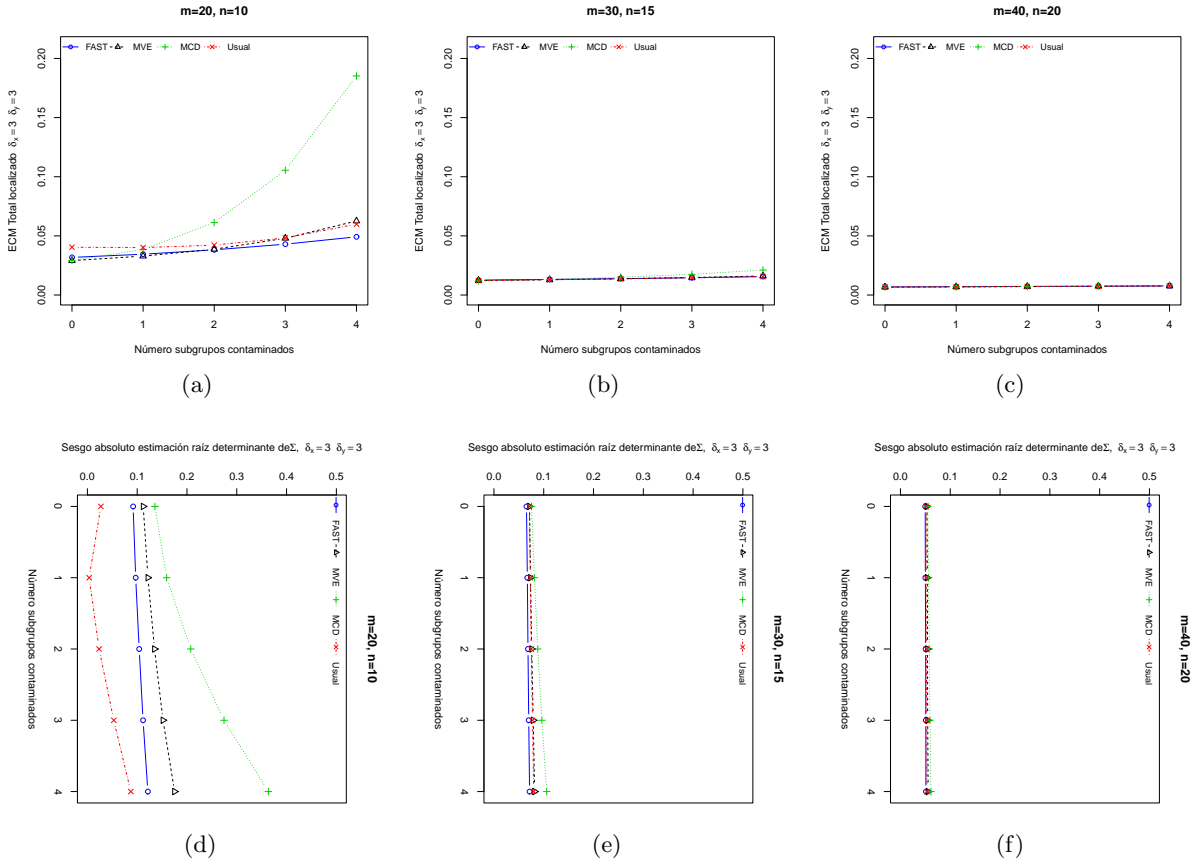


Figura 2: Resultados bajo contaminación localizada con  $\delta_x = 3, \delta_y = 3$

basado en el estimador Usual.

Al evaluar el  $ECM(\widehat{\Sigma})$  y el sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$  con los estimadores Usual, MCD, MVE y S-FAST, con la carta de control  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  sobre la muestra final de la Fase I, y asumiendo contaminación difusa, se hace evidente a partir de las Figuras 3 y 4, cada una de las siguientes observaciones:

- Se observó que el procedimiento Fase I usando el estimador Usual, para muestras pequeñas,  $n=10$ , en todos los escenarios, presenta la peor condición en cuanto al  $ECM(\widehat{\Sigma})$ , pero a su vez, este estimador en tales condiciones presenta la mejor respuesta en cuanto al sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$ .
- Bajo factores de inflación  $\delta_x$  y/o  $\delta_y=1.5$ , se percibe que el procedimiento Fase I usando el estimador MCD presenta alguna ventaja frente a los demás estimadores en  $ECM(\widehat{\Sigma})$ , cuando la probabilidad de contaminación es nula o moderada, ( $\epsilon=0, 0.05$ ), sin embargo, la ventaja que inicialmente alcanza desaparece en la medida que  $n$  y  $m$  se hacen cada vez más grandes

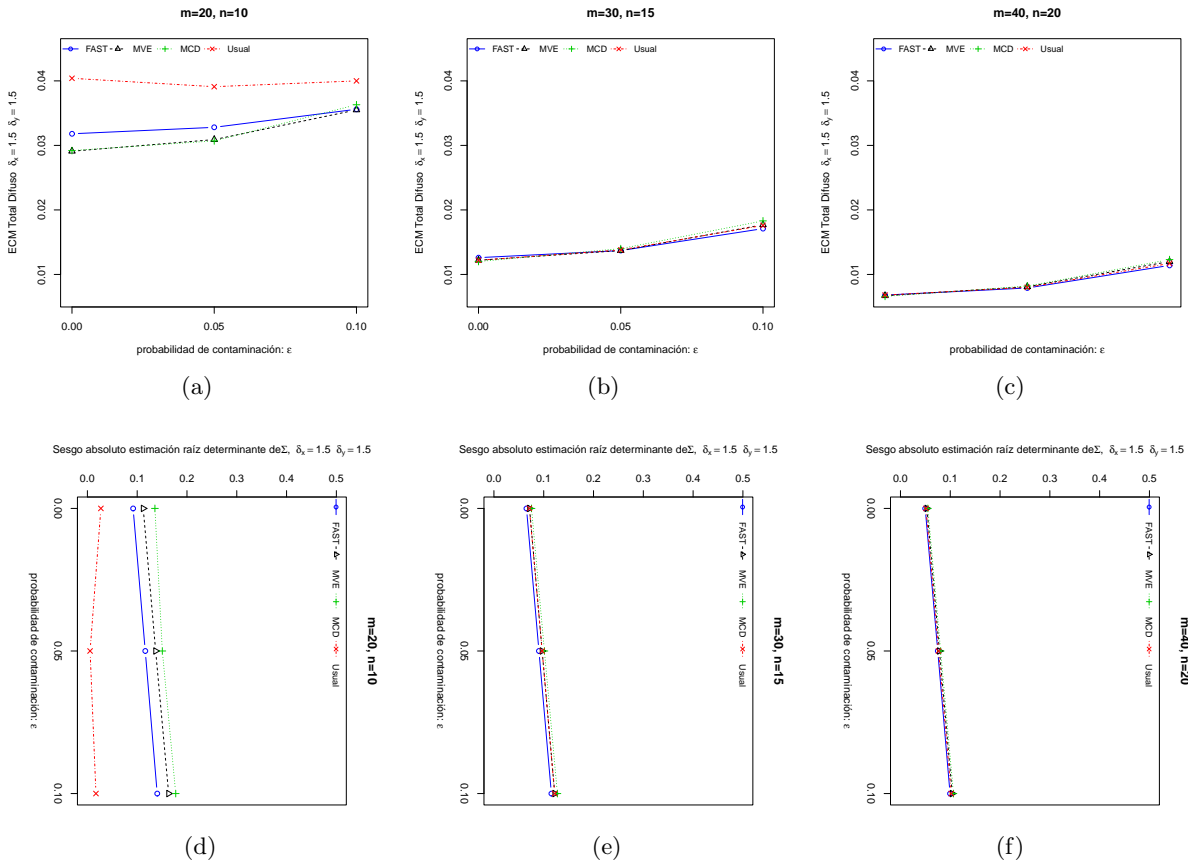


Figura 3: Resultados bajo contaminación difusa con  $\delta_x = \delta_y = 1.5$

y/o crece la probabilidad de contaminación. Con respecto al sesgo absoluto en la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$ , la respuesta de este estimador es peor comparada con la de los demás estimadores en todos los escenarios.

- Bajo condiciones de factor de inflación  $\delta_x$  y/o  $\delta_y=1.5$ , para el estimador S-FAST, se encontró que su desempeño en cuanto a  $ECM(\widehat{\Sigma})$  y al sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$  mejora a medida que  $n > 10$  y  $m > 20$ , sin embargo, la ventaja que inicialmente alcanza desaparece en la medida que  $n$  y  $m$  se hacen cada vez más grandes y/o crece la probabilidad de contaminación.
- Cuando el factor de inflación de la varianza se elevó a  $\delta_x$  y/o  $\delta_y=3$ , bajo contaminación difusa en todos los escenarios se presenta peor el estimador MCD tanto en  $ECM(\widehat{\Sigma})$  como en el sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$ . Por el contrario se percibe que usando el estimador S-FAST, muestra alguna ventaja bien diferenciada frente a los demás estimadores tanto en el  $ECM(\widehat{\Sigma})$  como en el sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$ , cuando  $n > 10$  y  $m > 20$ , ventaja que se mantiene en la medida que estos valores crecen y/o crece el número de

subgrupos contaminados.

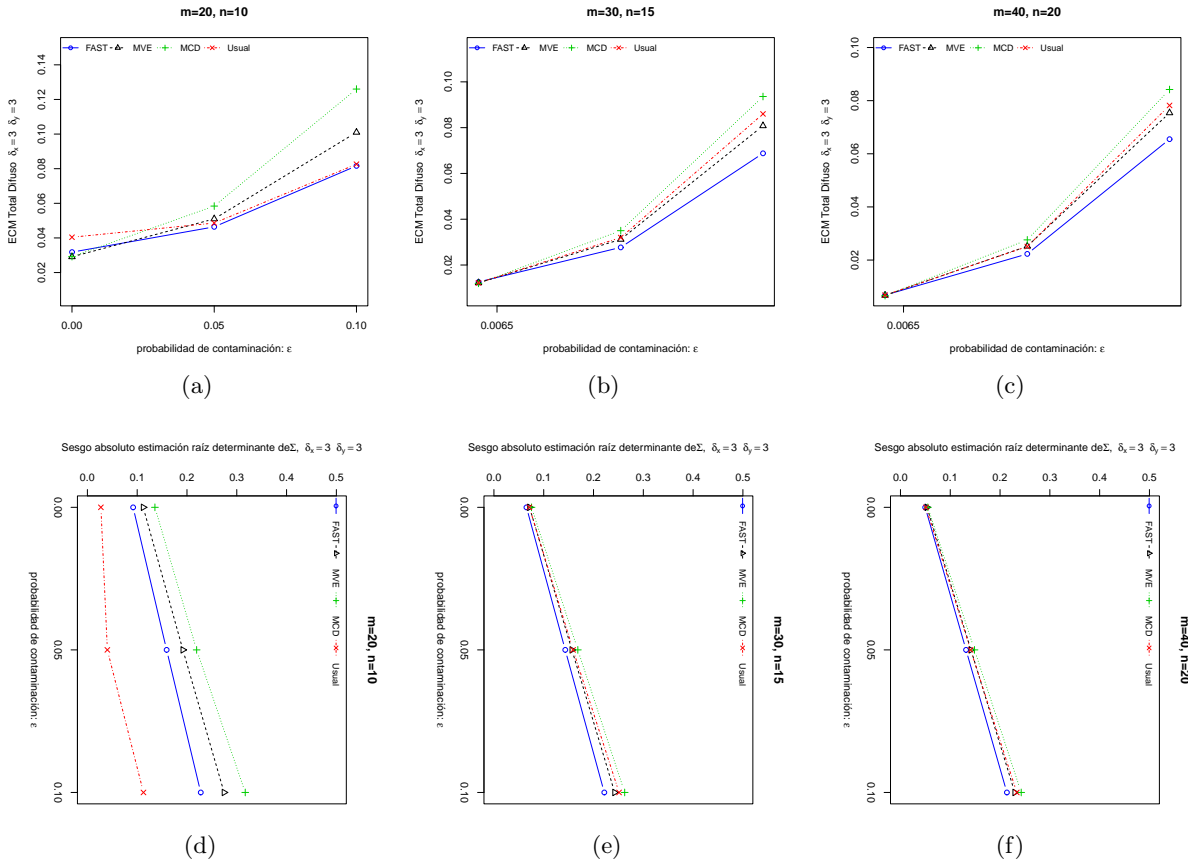


Figura 4: Resultados bajo contaminación difusa con  $\delta_x = \delta_y = 3$

- De acuerdo con los resultados obtenidos, Se podría asumir que a mayor probabilidad de contaminación, mayor tamaño de muestra y mayor número de subgrupos, en el caso de contaminación del tipo difuso, se presenta con mejor  $ECM(\widehat{\Sigma})$  y sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$  el estimador S-FAST y en niveles bajos de todos estos parámetros es mejor en  $ECM(\widehat{\Sigma})$  el estimador robusto MCD, sin embargo, se aprecia que la ventaja de los procedimientos basados en los estimadores robustos MVE y MCD respecto del estimador Usual no es muy alta y que para algunos escenarios se registró mejor el  $ECM(\widehat{\Sigma})$  bajo este último.
- En particular bajo condiciones de factor de inflación  $\delta_x = \delta_y = 3$  la respuesta favorece más al estimador S-FAST tanto en  $ECM(\widehat{\Sigma})$  como en el sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$ .

Al evaluar el  $ECM(\widehat{\Sigma})$  y el sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$  de los estimadores Usual, MCD, MVE y S-FAST, con la carta de control  $\sqrt{|\mathbf{S}|}$  sobre la muestra final de la Fase I y asumiendo

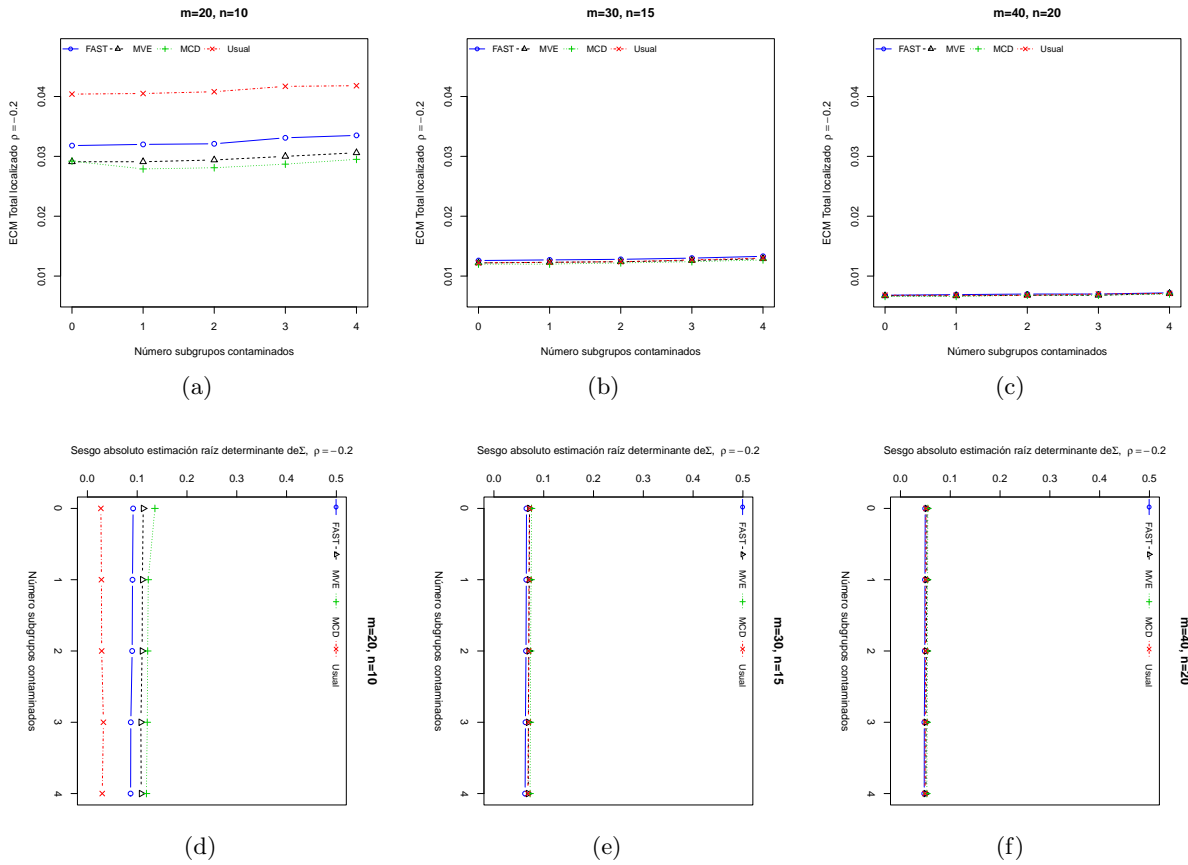


Figura 5: Resultados bajo contaminación localizada con  $\rho = -0.2$

contaminación localizada afectando la correlación, se presentaron los siguientes hallazgos, (ver Figura 5 y 6)

- Se pudo establecer que a partir de los diferentes escenarios contemplados con el procedimiento Fase I al comparar los procesos con los diferentes estimadores utilizados, los mejores resultados en cuanto al  $ECM(\hat{\Sigma})$  de la carta de control se presentan bajo el estimador MCD en todos los escenarios, sin embargo, la ganancia disminuye o se pierde a medida que el tamaño de muestra y el número de subgrupos crecen. Para tamaños de muestra pequeños  $n = 10$ , en todos los escenarios se presentó peor y muy bien diferenciado el estimador usual, pero al incrementar el tamaño de la muestra  $n = 15$  y  $20$ , en primer lugar, el peor desempeño en cuanto al  $ECM(\hat{\Sigma})$  de la carta se encontró con el estimador S-FAST y en segundo lugar, el  $ECM(\hat{\Sigma})$  con el estimador Usual se hizo más próximo al que se logró con los estimadores MVE y MCD.
- Con respecto al sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\hat{\Sigma}|}$ , la situación es contraria, pues para

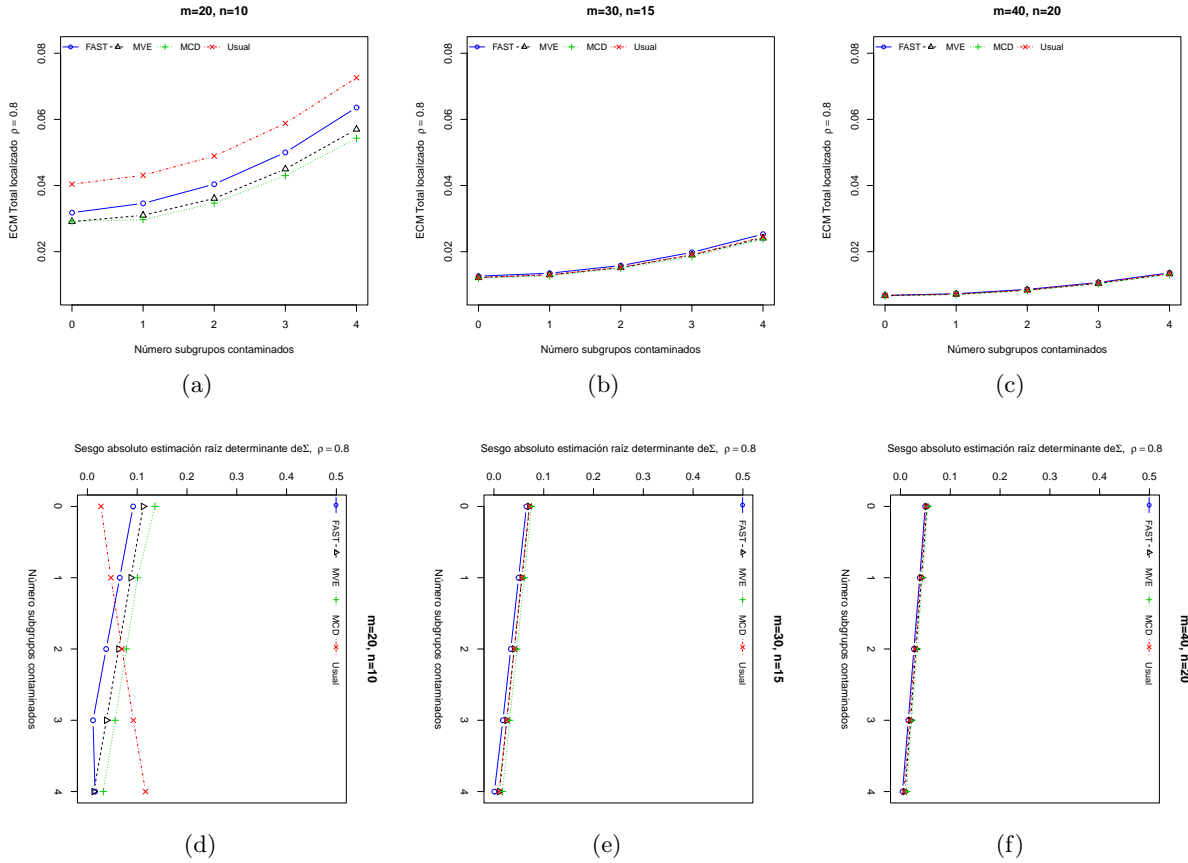


Figura 6: Resultados bajo contaminación localizada con  $\rho = 0.8$

el estimador MCD se registra los peores resultados mientras que para el estimador S-FAST el sesgo absoluto en todos los casos es mejor.

## 5. CONCLUSIONES

- En todos los escenarios de contaminación considerados, con  $n=10$ , el procedimiento Fase I usando el estimador Usual, se presenta la peor condición en cuanto al  $ECM(\widehat{\Sigma})$ , pero a su vez, este estimador en tales condiciones presenta la mejor respuesta en cuanto al sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\Sigma|}$ .
- En general, con base en los resultados que aportan los procesos de simulación y asumiendo contaminación localizada, en los que se implementó factor de inflación moderado ( $\delta_x$  y/o  $\delta_y=1.5$ ) y alto, ( $\delta_x$  y/o  $\delta_y=3$ ), El procedimiento Fase I diferencia claramente al estimador MCD con alguna ventaja frente a los demás estimadores robustos y el estimador Usual, al compararse en cuanto al  $ECM(\widehat{\Sigma})$ , cuando el número de subgrupos contaminantes es bajo,



$k \leq 2$ , tamaño de muestra pequeño,  $n = 10$ , y el número de subgrupos  $m = 20$ ; ventaja que disminuye o desaparece al incrementar el tamaño de muestra, el número de subgrupos y/o el número de subgrupos contaminados, sin embargo, en cuanto al sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\mathbf{\Sigma}|}$ , presenta la peor condición en todos los escenarios observados.

- En los mismos términos de la conclusión anterior, con respecto al estimador S-FAST se encontró que su desempeño en cuanto al  $ECM(\hat{\mathbf{\Sigma}})$  y sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\mathbf{\Sigma}|}$ , mejora a medida que  $n > 10$  y  $m > 20$ , sin embargo, al ser comparado con los demás estimadores, la ventaja que inicialmente alcanza desaparece en la medida que  $n$  y  $m$  se hacen cada vez más grandes y/o crece el número de subgrupos contaminados.
- Bajo contaminación difusa perturbando solo varianzas, de acuerdo con los resultados obtenidos, se podría asumir que a mayor probabilidad de contaminación, mayor tamaño de muestra y mayor número de subgrupos, se presenta con mejor ventaja en cuanto al  $ECM(\hat{\mathbf{\Sigma}})$  y sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\mathbf{\Sigma}|}$ , el estimador S-FAST y en niveles bajos de todos estos parámetros es mejor en precisión el estimador robusto MCD, sin embargo, se aprecia que la ventaja de los procedimientos basados en el estimador robusto MCD respecto de los estimadores MVE y Usual no es muy alta y que para algunos escenarios se registró mejor el  $ECM(\hat{\mathbf{\Sigma}})$  bajo el estimador Usual, razón por la que se podría concluir que bajo estos términos, no se obtienen resultados positivos en cuanto al  $ECM(\hat{\mathbf{\Sigma}})$  de los estimadores para los casos robustos MCD y MVE comparados con el procedimiento basado en el estimador Usual.
- Bajo contaminación localizada afectando la correlación se pudo establecer que a partir de los diferentes escenarios tenidos en cuenta con el procedimiento Fase I, al comparar los procesos con los diferentes estimadores utilizados, los mejores resultados en cuanto al  $ECM(\hat{\mathbf{\Sigma}})$  de la carta de control se presentan bajo el estimador MCD en todos los escenarios, sin embargo, la ganancia disminuye o se pierde a medida que el tamaño de muestra y el número de subgrupos crecen. Con respecto al sesgo absoluto de la estimación de  $\sqrt{|\mathbf{\Sigma}|}$ , la situación es contraria, pues para el estimador MCD se registra los peores resultados mientras que para el estimador S-FAST en todos los casos es el mejor.
- Teniendo en cuenta que los estimadores robustos presentan mejores condiciones en cuanto a  $ECM(\hat{\mathbf{\Sigma}})$  que los estimadores clásicos, llama la atención que se produzcan respuestas en las que la estimación con base en el estimador clásico se muestre mejor en el  $ECM(\hat{\mathbf{\Sigma}})$  que con los estimadores robustos; solo se logra una leve mejoría en algunos casos. Queda la pregunta, ¿será posible que para el proceso resulte muy crítica cualquier desviación de la matriz de covarianzas?
- Es importante señalar el hecho que todos los resultados obtenidos están en dependencia con

la forma en que han sido implementados los estimadores en R, es decir, el tratamiento dado en el proceso de construcción de estimadores robustos de  $\Sigma_0$  combinando la información de  $m$  muestras independientes. En esta investigación, se optó por utilizar el promedio de las matrices de los  $m$  subgrupos de muestras independientes de tamaño  $n$ ; sin embargo, se podría utilizar alternativamente el método propuesto por He & Fung (2000) para estimadores S, que fue adaptado más tarde por Hubert y Van Driessen (2004) para estimadores MCD. Bajo este método en lugar de agrupar las matrices de covarianzas de los subgrupos, se agrupan las observaciones y se obtiene una única muestra y sobre esa gran muestra finalmente se aplica la estimación robusta para obtener el estimador robusto de la matriz de covarianzas.

## Referencias

- Alt, F. B. (1985 ). Multivariate quality control. The Encyclopedia of Statistical Sciences, Kotz S, Johnson NL, Read CR (eds.), Wiley: New York, 110–122.
- Alt, F. B. & Smith, N. D. (1988 ). Multivariate process control. Handbook of Statistics, Elsevier: Amsterdam. 333–351.
- Anderson, T. W. (1984). An introduction to multivariate statistical analysis. Second edition, John Wiley and Sons, Inc., New York. 264.
- Barnett, V. (1979). Some outlier test for multivariate samples, *South African Statistical Journal*, 13, 29–52.
- Barnett, V. & Lewis, T (1998). Outliers in statistical data. Third ed. John Wiley & Sons, Inc: New York.
- Butler R. W., Davies, P. L. & Jhun M. (1993). Asymptotic for the minimum covariance determinant estimator. *The Annals of Statistics*, 21, 1385–1401.
- Ceroli, A., Riani, M. C. & Atkinson, A. (2009). Controlling the size of multivariate outlier tests with the MCD estimator of scatter, *Stat Comput.* 19, 341–353.
- Chenouri, S. E., Variyath, A. M. & Steiner. S. H. (2009). A multivariate robust control chart for individual observations, *Journal of Quality Technology*, 41(3), 259–271.
- Croux, C. & Haesbroeck, G. (1999). Influence function and efficiency of the minimum covariance determinant scatter matrix estimator. *Journal of Multivariate Analysis*, 71, 161–190.
- Chenouri, S. & Variyath, A. M. (2010). A comparative study of Phase II robust multivariate control charts for individual observations, *QREI*, 27, 857–865.

- Davies, P. L. (1987). Asymptotic behavior of S-estimators of multivariate location parameters and dispersion matrices. *The Annals of Statistics*, 15, 1269–1292.
- Davis, W. S. & Yen, D. C. (1998). Handbook. The information Systems: analysis and design. Disponible en: [<http://www.hit.ac.il/staff/leonidm/information-systems/ewtoc.html>.]
- Djauhari, M. A., Mashuri, M. & Herwindiati, D. E. (2008). Multivariate process variability monitoring. *Communication in Statistics - Theory and Methods*, 37, 1742–1754.
- Gomes, J. H. F., Paiva, A. P., Costa, S. C., Balestrassi, P. P. & Paiva, E. J. (2012). Weighted multivariate mean square error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings. *European Journal of Operational Research*, 226(2013), 522–535.
- He, X. & Fung W. K. (2000). High breakdown estimation for multiple populations with applications to discriminant analysis. *Journal of Multivariate Analysis*, 72, 151–162.
- Hubert, M., Rousseeuw, P. J. & van Aelst, S. (2008). High-breakdown robust multivariate methods. *Statistical Science. Institute of Mathematical Statistics*, 23(1), 92–119.
- Jensen, W. A., Birch, J. B. & Woodall W. H. (2006). High breakdown estimation methods for phase I multivariate control charts. Technical Report 05-6. Disponible en: [[http://www.web-e.stat.vt.edu/dept/web-e/tech\\_reports/TechReport05-6.pdf](http://www.web-e.stat.vt.edu/dept/web-e/tech_reports/TechReport05-6.pdf)].
- Jones-Farmer, L. A., Woodall, W. H., Steiner, S. H. & Champ, C. W. (2014). An overview of phase I analysis for process improvement and monitoring. *Journal of Quality Technology*, 46(3), 265.
- Köksoy, O. (2006). Multiresponse robust design: Mean square error (MSE) criterion. *Applied Mathematics and Computation*, 175, 1716–1729.
- Lopuhaä, H. P. (1989). On the relation between S-estimators and M-estimators of multivariate location and covariance. *The Annals of Statistics*, 17, 1662–1683.
- Lopuhaä, H. P. & Rousseeuw, P. J. (1991). Breakdown points of affine equivariant estimators of multivariate location and covariance matrices. *The Annals of Statistics*, 19 (1991), 229–248.
- Maronna, R. A., Martin, D. & Yohai, V. (2006). Robust statistic, ISBN: 978-0-470-01092-1, Wiley Series.
- Montgomery, D. (2005). Control estadístico de la calidad, Tercera edición, México: Limusa Wiley.
- Nelson, L. S. (1988). Control Charts: Rational Subgroups and Effective Applications. *Journal of Quality Technology*, 20(1), 73–75.

- Pison, G., Van Aelst, S. & Willems, G. (2002). Small Sample Corrections for LTS and MCD. *Metrika*, 55, 111–123.
- R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/>.
- Rocke, D. M. & Woodruff, D. L. (1996). Identification of outliers in multivariate data. *Journal of the American Statistical Association*, 89, 888–896.
- Rousseeuw, P. J. & Leroy A. M. (1987). Robust regression and outlier detection. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Rousseeuw, P. J. & Van Driessen, K. (1999). A fast algorithm for the minimum covariance determinant estimator. *Technometrics*, 41, 212–223.
- Rousseeuw, P. J. & Van Zomeren, B. C. (1990). Unmasking multivariate outliers and leverage points. *Journal of the American Statistical Association*, 85, 633–639.
- Rousseeuw, P. J. & Yohai, V. J. (1984). Robust regression by means of S-estimators. *Robust and Nonlinear Time Series (Lecture, Notes in Statistics No 26)*, eds, J. Frankc, W, Härdle, and R.D. Martin, New York: Springer-Verlag, 256–272.
- Salibian-Barrera, M. & Yohai, V. (2006). A fast algorithm for S-regression estimates. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 15, 414–427.
- Schoonhoven, M., Nazir, H. Z., Riaz, M. & Does, R. J. M. M.(2011). Robust location estimaters for the  $\bar{X}$  control chart. *Journal of Quality Technology*, 43(4), 363–379.
- Schoonhoven, M. & Does, Ronald J. M. M. (2012). A robust standard deviation control chart. *Technometrics*, 54(1), 73–82.
- Tatum, L. G. (1997). Robust estimation of the process standard deviation for control charts. *Technometrics*, 39(2), 127–141.
- Todorov, V. (2008). A note on the MCD consistency and small sample correction factors. Unpublished manuscript, in preparation.
- Todorov, V. & Filzmore, P. (2009). An object oriented framework for robust multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 32(3).
- Todorov, V. (2012). Scalable robust estimators with high breakdown point. Disponible en <http://cran.r-project.org/web/packages/rrcov/rrcov.pdf>. Consultado 15-03-2013.
- Vargas, J. A. (2003). Robust estimation in multivariate control charts for individual observations. *Journal of Quality Technology*, 35, 367–376.

- Vargas, J. A. & Lagos, J. (2007). Comparison of multivariate control charts for process dispersion. *Quality Engineering*, 19, 191–196.
- Variyath, A. M. & Vattathoor, J. (2013). Robust control charts for monitoring process variability in Phase I multivariate individual observations. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, 30 (6), 795–812.
- Woodall, W. H. (2000). Controversies and contradictions in statistical process control. *Journal of Quality Technology*, 32(4), 341–350.
- Yañez, S., González, N. & Vargas, J. A. (2010). Hotelling's T<sup>2</sup> control charts based on robust estimators. *Dyna*, 163, 239–247.

# PRESENCIA DE *Wolbachia* y *Leishmania* EN UNA POBLACIÓN DE *Lutzomyia evansi* DE LA COSTA CARIBE DE COLOMBIA<sup>a</sup>

## PRESENCE OF *Wolbachia* AND *Leishmania* IN A POPULATION OF *Lutzomyia evansi* FROM THE CARIBBEAN COAST OF COLOMBIA.

RAFAEL J. VIVERO-GÓMEZ<sup>b c</sup>, MANUELA GUTIÉRREZ-GARCÍA<sup>b</sup>, CLAUDIA X. HERRERA<sup>d</sup>, GLORIA CADAVID-RESTREPO<sup>c</sup>, SANDRA URIBE-SOTO<sup>b</sup>

Recibido 31-03-2016, aceptado 01-08-2016, versión final 06-09-2016.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** *Lutzomyia evansi* es importante en salud pública por su participación en la transmisión de la leishmaniasis visceral y cutánea en la costa caribe de Colombia. Diversos estudios se han desarrollado sobre las poblaciones naturales de *Lutzomyia evansi*, sin embargo, pocos estudios han explorado en profundidad la detección de microorganismos simbióticos (ej. *Wolbachia*) y de manera simultánea la presencia de *Leishmania sp.*. El endosimbionte *Wolbachia* ha sido propuesto en la actualidad como control biológico de insectos vectores de diversas enfermedades tropicales. En el presente estudio el ADN de tres especies del género *Lutzomyia* colectadas en el municipio de Ovejas (Departamento de Sucre) fue evaluado para detectar la infección natural por la bacteria *Wolbachia* y la presencia de parásitos del género *Leishmania*. El ADN total de 176 individuos adultos y 34 inmaduros (larvas y pupas) de *Lu. evansi*, fue utilizado para evaluar la detección de *Wolbachia* mediante amplificación por PCR del gen WSP (Proteína Mayor de la Superficie de *Wolbachia*) y la infección por *Leishmania* mediante amplificación por PCR de un segmento del gen HPSN70 (Proteína de Choque Térmico). Se encontró un grupo de machos infectado de forma natural por *Wolbachia* y nueve grupos de hembras con infección natural por *Leishmania*, todos pertenecientes a *Lutzomyia evansi*. El análisis filogenético de la secuencia del gen WSP de *Wolbachia* indica la ubicación de la cepa detectada dentro del supergrupo B (haplogrupo wLeva) y su relación con haplotipos previamente reportados de *Lutzomyia evansi* y *Lutzomyia dubitans*. Una región de 418 pb del gen HSP-70N fue secuenciada y mostró similitud con secuencias de *Leishmania* luego de realizar el análisis en BlastN. Se confirma la presencia de

<sup>a</sup>Vivero-Gómez R. J., Gutiérrez-García M., Herrera C. X., Cadavid-Restrepo G., Uribe-Soto S. (2016). Presencia de *Wolbachia* y *Leishmania* en una población de *Lutzomyia evansi* presente en la costa caribe de Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 38-54. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n2.56684>

<sup>b</sup>Grupo de investigación en Sistemática Molecular, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. [magutierrezga@unal.edu.co](mailto:magutierrezga@unal.edu.co), [rjviverog@unal.edu.co](mailto:rjviverog@unal.edu.co), [siuribesoto@gmail.com](mailto:siuribesoto@gmail.com)

<sup>c</sup>PECET (Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales), Universidad de Antioquia.

<sup>d</sup>Grupo de Microbiodiversidad y Microprospección, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. [cxmoreno@unal.edu.co](mailto:cxmoreno@unal.edu.co), [gecadavi@unal.edu.co](mailto:gecadavi@unal.edu.co)

*Wolbachia* en poblaciones silvestres de machos de *L. evansi* y la infección natural por *Leishmania spp.* en hembras de la misma especie cuya infección por *Wolbachia* resulto negativa.

**PALABRAS CLAVE:** ADN, *Lutzomyia evansi*, infección natural, *Wolbachia*, *Leishmania*.

**ABSTRACT:** *Lutzomyia evansi* is important in public health for its role in the transmission of visceral leishmaniasis on the Caribbean coast of Colombia. Various studies have been developed on the natural populations of *Lutzomyia evansi*, however few studies have explored in depth the detection of symbiotic microorganisms (eg. *Wolbachia*) and simultaneously the presence of *Leishmania sp.* The endosymbiont *Wolbachia* has been proposed actually as biological control of insect vectors of various tropical diseases. In the present study the DNA of three species of sandflies collected in the municipality of Ovejas (Sucre Department) was evaluated for natural infection by *Wolbachia* and the presence of parasites of the *Leishmania* genus. The total DNA of 176 adult individuals of different species and 34 immature (larvae and pupae) of *Lutzomyia evansi*, was used to evaluate the detection by PCR amplification WSP gene (Major Surface Protein *Wolbachia*) and *Leishmania* infection by PCR amplification of a segments of HPSN70 gene (Heat Shock Protein). A group of males naturally infected by *Wolbachia* and nine groups of females naturally infected with *Leishmania* were found, all associated with *Lutzomyia evansi*. Phylogenetic analysis of the sequence of WSP gene of *Wolbachia* indicates the location of the strain detected within the supergroup B (haplogroup wLeva) and its relation to previously reported haplotypes of *Lutzomyia evansi* and *Lutzomyia dubitans*. A region of 418 bp of HSP-70N gene was sequenced and showed similarity with sequences of *Leishmania* after performing the analysis BlastN. The presence of *Wolbachia* in wild populations of *Lutzomyia evansi* and the natural infection with *Leishmania spp.* is confirmed.

**KEYWORDS:** Colombia, *Lutzomyia evansi*, natural infection, *Wolbachia*, *Leishmania*.

## 1. INTRODUCCIÓN

La leishmaniasis conforma un grupo de enfermedades infecciosas que afecta la piel, la mucosa y las vísceras (Zambrano, 2014). Estas afecciones son causadas por protozoarios del género *Leishmania* (*Kinetoplastida: Trypanosomatidae*) que infecta a humanos y animales mediante la picadura de hembras del género *Lutzomyia* en América (González *et al.*, 2006; Zambrano, 2014). Los ciclos de transmisión de la leishmaniasis perduran por efecto de la contaminación, cambios ambientales como la deforestación, expansión de la frontera agrícola, la construcción de presas y la urbanización, entre otros (Sánchez *et al.*, 2015; Gómez *et al.*, 2016).

En Colombia se registra la presencia de 164 especies de la subfamilia *Phlebotominae*, siendo uno de los países con mayor diversidad a nivel mundial, con alto número de especies ( $n = 13$ ) incriminadas como vectores (Vivenes *et al.*, 2005; Bejarano, 2006; Cortés & Fernández, 2008; Contreras *et al.*, 2012; Vivero *et al.*, 2013; Bejarano *et al.*, 2015). Dentro de estas especies, *Lutzomyia evansi* es un reconocido vector primario de *Leishmania infantum*, patógeno que genera la leishmaniasis visceral en la Costa Caribe de Colombia y otras regiones de Latinoamérica, y también es conside-

rado importante porque algunas de sus poblaciones naturales han sido encontradas infectadas por parásitos causantes de leishmaniasis cutánea (Cortés & Fernández, 2008), relacionados filogenéticamente y por su patrón de desarrollo intestinal con especies del subgénero *Viannia* (Cazorla *et al.*, 2010; Montoya-Lerma *et al.*, 1996; Pérez-Doria *et al.*, 2011).

Los antecedentes expuestos y la presencia de *Lutzomyia evansi* en áreas urbanas, periurbanas y rurales (Pérez-Doria *et al.*, 2011; Paternina, 2012; Bejarano *et al.*, 2015), hacen necesario el diseño y la aplicación de medidas de intervención, diferentes a las de tratamiento químico con insecticidas (Bejarano *et al.*, 2003; Bejarano, 2006; Cochero *et al.*, 2007; González *et al.*, 2006; Paternina-Gómez *et al.*, 2011). Dentro de las medidas alternativas se encuentra el empleo de bacterias endosimbiontes como control biológico y genético para disminuir la población de vectores (Hoffmann *et al.*, 2015; Finney *et al.*, 2015).

*Wolbachia* es una bacteria simbiote intracelular obligada perteneciente a las  $\alpha$ -proteobacterias (*Rickettsia*), de transmisión vertical y se encuentra en glándulas salivales, intestino y tejido reproductivo de insectos (Werren *et al.*, 1997; Werren *et al.*, 2008). Algunos fenotipos de *Wolbachia* generan alteraciones reproductivas y fisiológicas en sus hospedadores dentro de las cuales se encuentran la feminización, inducción a partenogénesis, muerte a machos, incompatibilidad citoplasmática, fecundidad, actividad locomotora y supervivencia (Florez Molina, *et al.*, 2006; Fabio *et al.*, 2007; Werren *et al.*, 2008). Las cepas de *Wolbachia* que infectan principalmente hospederos artrópodos se encuentran en los supergrupos A y B (Zhou *et al.*, 1998; González & Martínez, 2010; Hoffmann *et al.*, 2011; Walker *et al.*, 2011).

Es necesario indicar que los estudios que incluyen la aplicación de *Wolbachia* para el biocontrol de insectos transmisores de enfermedades infecciosas, debe vincular en primera instancia el estatus de infección y diferenciación de las cepas de *Wolbachia*, como también incluir el análisis del efecto de *Wolbachia* sobre especies no blanco por una potencial transmisión horizontal que afecte la dinámica de las poblaciones naturales de otros artrópodos (Dedeine *et al.*, 2005; Florez Molina, *et al.*, 2006; González & Martínez, 2010; Hoffmann *et al.*, 2011; Walker *et al.*, 2011).

En este estudio se planteó como objetivo inicial detectar la bacteria *Wolbachia* y el parásito *Leishmania* en especies del género *Lutzomyia* colectadas en el ambiente urbano del municipio de Ovejas (departamento de Sucre, Costa Caribe de Colombia).



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Colecta, procesamiento e identificación taxonómica de flebotomíneos

Los insectos del género *Lutzomyia* fueron colectados en ambientes urbanos del municipio de Ovejas (7513'O;931'N;277msnm), ubicado en el departamento de Sucre. Se realizó una exploración entomológica por dos días en noviembre de 2013, época de alta precipitación. Los muestreos entomológicos estuvieron enmarcados dentro del proyecto “Estrategia Integral para el control de la leishmaniasis en Colombia”, en actividades asociadas a la descripción de los sitios de cría naturales de *Lutzomyia evansi*, motivo por el cual el mayor esfuerzo de colecta estuvo centrado sobre este tópico y no sobre la colecta de estados adultos. Sin embargo, se indica que el mes de noviembre corresponde al periodo de lluvias en donde la abundancia de las especies de *Lutzomyia* incrementa de manera significativa, lo que garantizó contar con una alta proporción de ejemplares para la detección del endosimbionte *Wolbachia*. Esta localidad es catalogada como un ecosistema de bosque seco tropical (Hernández *et al.*, 1992; Holdrige, 1967) ubicada en la costa norte del Caribe de Colombia. Se utilizaron trampas de luz blanca tipo mini CDC ubicadas en el intradomicilio y peridomicilio de las viviendas para colectar los flebotomíneos adultos.

Los insectos adultos colectados se transportaron y almacenaron en seco usando viales de 1,5mL, conservándolos en el laboratorio a  $-20C$  y se procesaron de la siguiente forma: 1) La cabeza y los tres últimos segmentos abdominales fueron fragmentados para la identificación de especie con claves taxonómicas (Young & Duncan, 1994), 2) el tórax, alas y el resto de segmentos abdominales se almacenaron a  $-20C$  hasta el proceso de extracción de ADN para posterior detección y caracterización de *Wolbachia* y *Leishmania*.

Adicionalmente inmaduros de *Lu. evansi*, fueron recuperados en sitios de cría naturales del ambiente urbano del municipio de Ovejas mediante extracción de sustratos y examen directo bajo estereomicroscopio (Vivero *et al.*, 2015). Estos inmaduros también fueron contemplados para la detección de *Wolbachia*, utilizando el mismo protocolo de extracción de ADN de adultos.

### 2.2. Extracción de ADN total de adultos e inmaduros

Posterior al reconocimiento taxonómico de especies del género *Lutzomyia*, los machos y las hembras se organizaron y agruparon por especies en tubos Eppendorf de 1,5ml. Los inmaduros fueron analizados de forma individual. El ADN se extrajo según el protocolo de altas concentraciones de sales descrito por Collins *et al.* (1987). La calidad y concentración del ADN se evaluaron mediante electroforesis en gel de Agarosa al 1%. Se cuantificó en un Nanodrop (Thermo Scientific) y adicionalmente se amplificó por PCR un fragmento del gen COI para evaluar la calidad del ADN y ausencia de inhibidores de la PCR (Figura 1a). El fragmento amplificado sirvió luego para

confirmar la identidad taxonómica de grupos de adultos que resultaron de interés por la infección de *Wolbachia* o *Leishmania*, como también para verificar la identidad de inmaduros por la ausencia de claves morfológicas (Vivero *et al.*, 2015).

### 2.3. PCR y secuenciación parcial del gen WSP de *Wolbachia*

Se utilizaron oligonucleótidos previamente descritos por Braig *et al.* (1998) (wsp81F-5' TGGTC-CAATAAGTGATGAAGAAAC -3'; wsp691R-5'AAAAATTAAACGCTA CTCCA-3'), que amplifican un fragmento parcial (590pb - 632pb) del gen codificante de la principal proteína de superficie de *Wolbachia* (WSP). La mezcla de reacción usada para la detección de *Wolbachia* incluyó 2µl de ADN muestra, en un volumen final de 20µl según las condiciones descritas por Zhou *et al.* (1998) y el perfil térmico registrado en el estudio de Werren *et al.* (1995). Se incluyó como control positivo de la PCR el ADN obtenido de 10 larvas (L4) de *Aedes aegypti* infectadas con una cepa de referencia de *Wolbachia* (Grupo A, cepa wMel) bajo condiciones de laboratorio en el insectario (PECET) (Figura 1b-1c), que sirvió adicionalmente para la estandarización de la amplificación por PCR del gen WSP. Los productos parciales de WSP fueron clonados y secuenciados empleando el servicio de la Compañía Macrogen Inc. en Corea.

### 2.4. Identidad de cepas de *Wolbachia* con base en secuencias reportadas y sus relaciones de filogenia

Los cromatogramas obtenidos a partir de los productos del gen WSP de *Wolbachia* fueron verificados y editados con Bioedit v7.2.5 (Hall, 1999), para obtener las secuencias consenso relacionadas con cada *Lutzomyia*. Las secuencias editadas se contrastaron inicialmente con genes de WSP de cepas de *Wolbachia* relacionadas principalmente con artrópodos, usando BLAST-N (Altschul *et al.*, 1997), para confirmar la identidad del fragmento obtenido. Se contempló el marco de lectura del alineamiento nucleotídico reportado por Scott O'Neill (<ftp://ftp.ebi.ac.uk/pub/databases/embl/align/> Número de acceso DS42468) (Ono *et al.*, 2001).

Los algoritmos Clustal W (Higgins *et al.*, 1992) y Muscle (Robert, 2004) incorporados en MEGA 6 (Tamura *et al.*, 2007), fueron empleados para la obtención final del alineamiento de las secuencias del gen WSP obtenidas en *Lutzomyia* y reportada en GenBank de artrópodos. Los patrones de divergencia genética y las distancias genéticas K2P fueron evaluadas utilizando Bioedit v7.2.5 (Hall, 1999) y el software DNAsp 5.0 (Librado & Rosas, 2009). Se realizó una verificación y/o validación de eventos de recombinación y presencia de quimeras con el software RDP4 (Martin *et al.*, 2005) para las secuencias obtenidas, con la finalidad de garantizar la veracidad de la variabilidad nucleotídica con respecto a las secuencias previamente reportadas en GenBank.

Para evaluar la identidad y ubicación en posibles haplogrupos con base en relaciones filogenéticas

a partir de las secuencias del gen WSP se realizó un dendograma de Neighbor Joining construido con todas las secuencias reportadas, en el programa MEGA 6 (Figura 2). La única secuencia del fragmento parcial del gen WSP de *Wolbachia* de este estudio está depositada en el GenBank (National Center for Biotechnology Information - NCBI) con el número de acceso KM594548.

## 2.5. Amplificación por PCR del gen HSP-70N de *Leishmania* en grupos de hembras

Previo a la PCR para la detección de *Wolbachia* se realizó PCR para la detección de infección por *Leishmania*, con las condiciones térmicas y los oligonucleótidos descritos por Fraga *et al.* (2010) (HSP70-F25 -5' GGACGCCGGCACGATTKCT -3'; HSP70-R617 5'- CGAAGAAGTCCGATA CGAGGGA -3') que amplifican un fragmento parcial de 593pb del gen HSP-70N (gen que codifica para la Proteína Citoplasmática de Choque Térmico 70) (Figura 1d). Se incluyó como control positivo el ADN de las especies *Leishmania nsis* (Cepa referente UA 2903), provisto por la Unidad de Biología Molecular del PECET. Los productos parciales obtenidos de *Leishmania* fueron secuenciados en ambos sentidos de la doble cadena de ADN, empleando el servicio de la Compañía Macrogen Inc. en Corea.

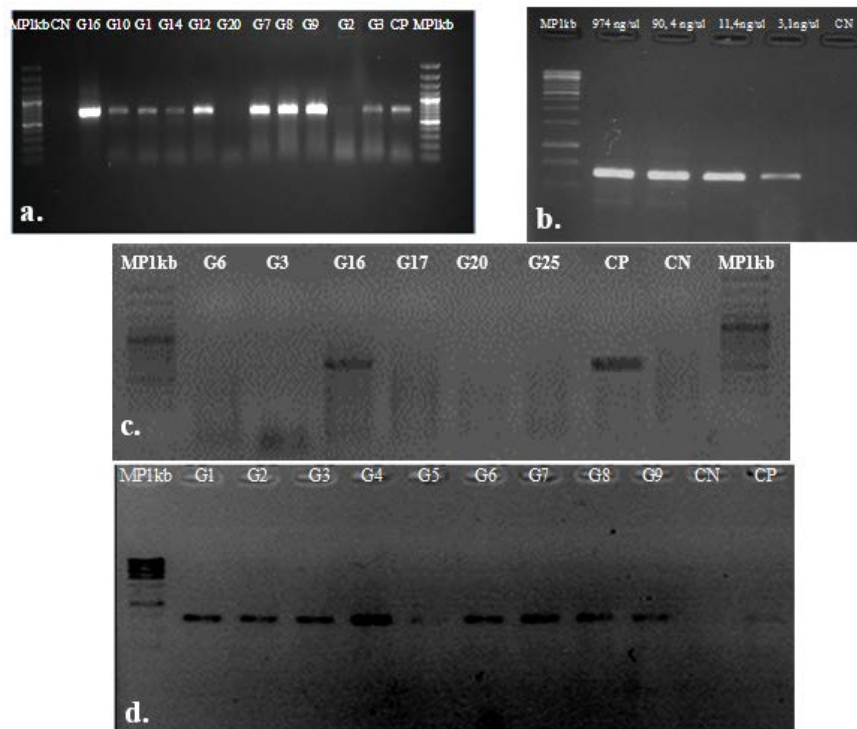


Figura 1: Geles de Electroforesis al 2% (a) PCR del gen COI (b) Estandarización de la amplificación del gen WSP de *Wolbachia* en insectos. (c) Identificación molecular mediante PCR del gen WSP de la infección natural por *Wolbachia* en pools de *Lutzomyia* de Ovejas. (d) Identificación molecular de infección por *Leishmania* en *Lu. evansi*. CN control negativo; CP: Control positivo MP1kb: Marcador de peso molecular.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Identificación de ejemplares del género *Lutzomyia*

Un total de 176 adultos colectados y 34 inmaduros recuperados en sitios de cría naturales, fueron obtenidos alrededor de la zona urbana del municipio de Ovejas. El empleo de claves morfológicas y el análisis complementario de las secuencias del gen COI, permitió confirmar la identificación taxonómica de adultos e inmaduros (resultados no mostrados) incluidos en el estudio. Se determinaron las especies *Lu. evansi* (número de individuos adultos = 160; inmaduros = 34), *Lu. panamensis* (número de individuos adultos = 11) y *Lu. gomezi* (número de individuos adultos = 5) (Tabla 1). La asignación taxonómica de especie y del sexo de los flebotomíneos permitió conformar 53 grupos para la detección molecular de *Wolbachia* y *Leishmania* mediante PCR.

#### 3.2. Detección de la infección por *Wolbachia* en *Lu. evansi*.

Tabla 1

Estado	Especie de flebotomíneo	Número de grupos analizado	Número total de ejemplares		Grupos infectados con <i>Wolbachia</i> (número de individuos)	Grupos infectados con <i>Leishmania</i> (número de individuos)
			Hembra	Macho		
Adultos	<i>Lu. evansi</i>	16	143	17	1(10)	9(90)
	<i>Lu. panamensis</i>	2	7	4	-	-
	<i>Lu. gomezi</i>	1	5	-	-	-
Inmaduros	<i>Lu. evansi</i>	34	-	-	-	-
<b>Total</b>	3	53	155	21	1(10)	9(90)

Se detectó la infección natural por *Wolbachia* en un grupo de machos de *Lu. evansi* (número individuos = 10) catalogado como grupo 16 (G16) (Figura 1c; Tabla 1). Se denotó una correcta amplificación del producto esperado de 600pb. El producto amplificado (Tamaño de 600pb) fue óptimo para la secuenciación de gen WSP de *Wolbachia* detectado en *Lu. evansi* (Número de acceso GenBank KM594548) El análisis preliminar con BLAST confirmó la presencia de *Wolbachia* y la identidad del gen WSP con porcentajes de similaridad del 96%. El dendrograma Neighbor Joining, generado con secuencias parciales del gen WSP de *Wolbachia* de otros insectos reportados en Genbank (Figura 2), ilustra la ubicación del haplotipo *WbLevaov16* detectado en machos de *Lu. evansi*, ubicado en el supergrupo B y en el haplogrupo *wLeva* previamente reportado en el municipio de Ovejas en flebotomíneos colectados durante la época seca (Vivero *et al.* en prensa, 2016). Se aprecia mayor relación con los haplotipos de *Wolbachia* *WbLevov75* y *WbLdubov43* reportados para *Lu. evansi* y *Lu. dubitans*. El haplotipo *WbLevaov16* (KM594548) presenta una relación cercana con el grupo Con y otros grupos como Dei, Crag, Unif y Prn, los cuales en su mayoría tienen cepas de *Wolbachia* aisladas de Mosquitos (Figura 2).

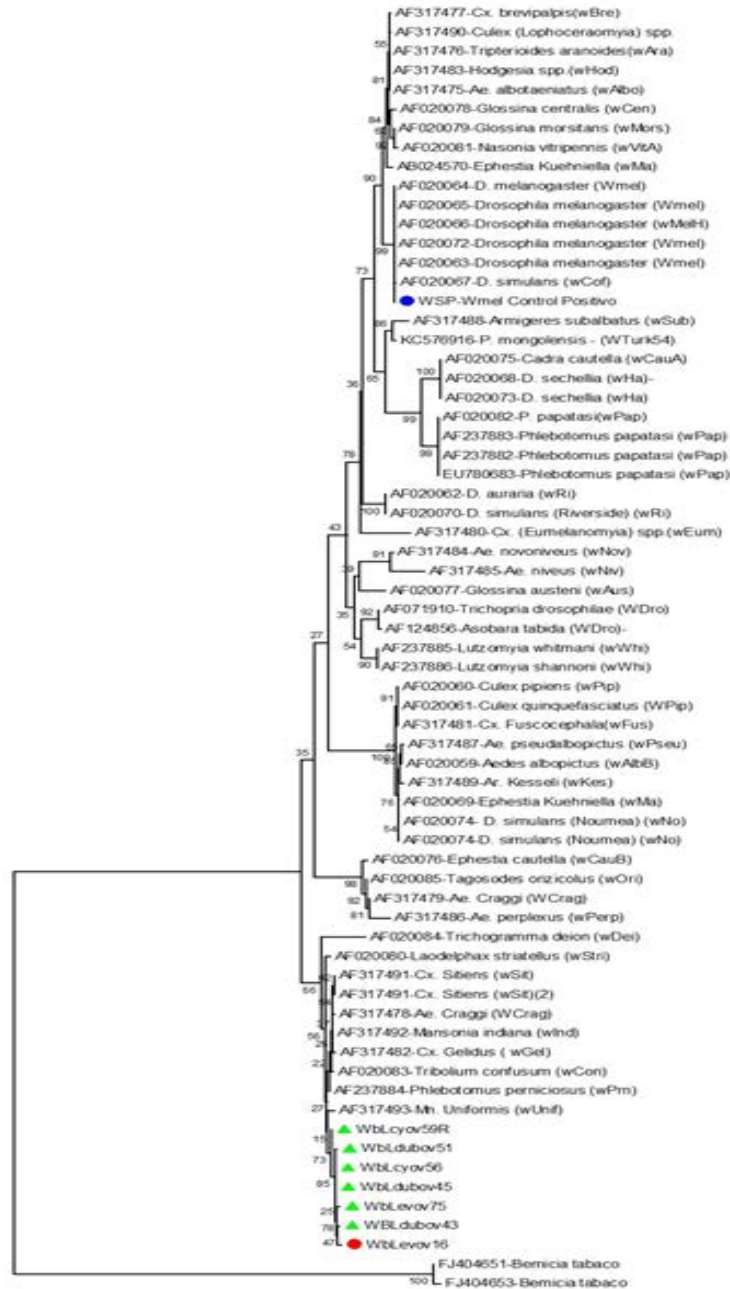


Figura 2: Dendrograma de Neighbor Joining de secuencias parciales del gen WSP, que ilustra en el círculo rojo la ubicación de la cepa de *Wolbachia* encontrada en *Lu. evansi* y en los triángulos verdes cepas de *Wolbachia* previamente reportadas. En círculo azul control positivo de la cepa *wMel*

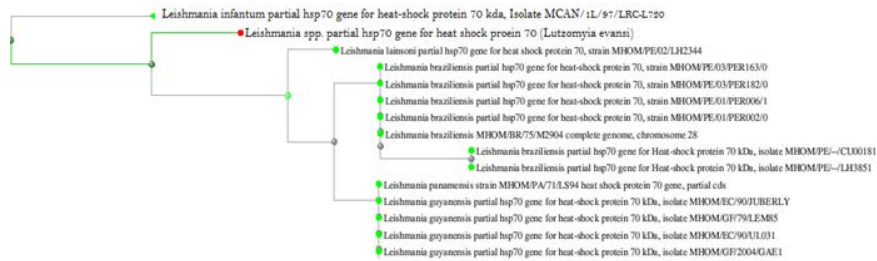


Figura 3: Dendrograma de Neighbor Joining de secuencias parciales del gen HSPN-70 realizado en BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) con secuencias disponibles en GenBank, que ilustra en el círculo rojo la ubicación del asilamiento de *Leishmania spp.*, encontrada en poblaciones naturales de *Lu. evansi*.

El análisis de la variabilidad nucleotídica de la secuencia de *Wolbachia* detectada revela entre 3 y 6 sitios variables, con respecto a los haplotipos reportados del haplogrupo *wLeva*. Los valores más bajos de distancias genéticas pareadas de Kimura de *WbLevaov16* estuvieron entre 0,007 al compararse con *WbLcyov56*, *WbLdubov43*, *WbLdubov45*; 0,012 con *WbLevov75*, *WbLdubov51* y 0,014 con el haplotipo *WbLcyov59* que corresponde a otra cepa de *Wolbachia* detectada en *Lu. cayennensis*. Las distancias genéticas del haplotipo *WbLevaov16* con respecto a cepas de *Wolbachia* identificadas en especies de la subfamilia *Phlebotominae* y ubicadas en el supergrupo A, fueron de 0,251 (*wPap-Phlebotomus papatasi*), 0,027 (*wPrn Phlebotomus perniciosus*) y 0,171 (*wWhi - Lutzomyia whitmani*, *Lutzomyia shannoni*). Las distancias genéticas con respecto al control positivo de *Wolbachia* (Cepa *wMel*) ubicado en el supergrupo A fueron de 0,214.

### 3.3. Detección de la infección con *Leishmania* por PCR del gen HSP-70N

De los 53 grupos de flebotomíneos fueron seleccionados 13 grupos conformados por hembras de la especie *Lu. evansi*, *Lu. gomezi* y *Lu. panamensis* para la detección natural de *Leishmania*. Nueve grupos de *Lu. evansi* resultaron positivos con el fragmento esperado de 590pb del gen HSP-70N (Figura 1d). Sin embargo solo una secuencia editada de 418pb del gen HSP-70N del grupo 6 de *Lu. evansi*, fue obtenida de forma legible y mostró mayor similitud con secuencias de *Leishmania* del subgénero *Viannia* luego de realizar el análisis en BlastN. Los mayores porcentajes de similitud (93%) se presentaron con secuencias del gen HSP-70N *Leishmania panamensis* (*XM010702330,1*, *CP009397,1*), sin embargo el análisis de la secuencia obtenida sólo permite definir su relación con el subgénero *Viannia* y su separación de secuencias del gen HSP-70N pertenecientes a *Leishmania infantum* (Figura 3).

## 4. DISCUSIÓN

La detección de la infección natural de *Wolbachia* por la presencia de su ADN en poblaciones silvestres de insectos vectores presentes en áreas donde se reportan enfermedades infecciosas, es

importante porque este endosimbionte puede ser usado como control biológico para disminuir las tasas de infección al bloquear la actividad patogénica de diversos microorganismos (virus y parásitos) (Ono *et al.*, 2001; Azpurua *et al.*, 2010; Rodriguero & Marcela, 2013; Wallace, 2013). Este estudio reporta y confirma la presencia de *Wolbachia* en un grupo de machos de *Lu. evansi*, especie de gran interés por ser el vector principal de la leishmaniasis visceral en la costa caribe de Colombia y algunos países de Centroamérica (González *et al.*, 2006).

El hallazgo de *Wolbachia* sugiere revisar en futuras investigaciones la variabilidad genética de *Lu. evansi*, por la capacidad de este endosimbionte para recombinarse con los genomas mitocondriales y nucleares de los hospederos (Baldo *et al.*, 2006; Ellegaard *et al.*, 2013). Algunos estudios han sugerido que *Wolbachia* puede promover la especiación rápida causando incompatibilidad reproductiva entre las poblaciones (Kittayaponga *et al.*, 2000; Sinkins *et al.*, 2005; Azpurua *et al.*, 2010). Esta apreciación coincide con la sugerencia de Azpurua *et al.* (2010), sobre la necesidad de explorar los patrones de transmisión de *Leishmania* en diferentes haplotipos de *Lutzomyia trapidoi*, los cuales resultaron ser positivos para *Wolbachia*, presentaron alta variabilidad intra-específica del marcador mitocondrial COI y mostraron tasas diferenciales de infección por *Leishmania*. Lo expuesto anteriormente resultaría de gran interés epidemiológico asociado a nuestro estudio, porque variantes genéticas (haplotipos) de *Lu. evansi* pueden reflejar diferencias en la competencia vectorial y la dinámica de transmisión de la leishmaniasis en diferentes áreas de influencia del parásito y de reservorios de la enfermedad.

Las cepas de *Wolbachia* varían en forma considerable según sus hospederos (González & Martínez, 2010; Rodriguero & Marcela, 2013) y en cuanto a su dinámica de fijación o efectos generados en el insecto como la incompatibilidad citoplasmática. Por tal motivo existe la posibilidad en el panorama del control biológico, de que la cepas de *Wolbachia* transfectadas en un nuevo hospedero (insecto vector de interés) puede verse alterada por las cepas ya existentes de la población silvestre de insectos (Rodriguero & Marcela, 2013), (Hoffmann *et al.*, 2015). En este contexto la detección molecular de la cepa de *Wolbachia* en *Lu. evansi*, es importante porque permite conocer su genotipo, relación con otros insectos hospederos y estimar posibles efectos que puede tener la cepa *Wolbachia*, como el de transmisión horizontal al estar presente en otras especies de *Lutzomyia* de la región.

El análisis de secuencias del gen WSP de nuestro estudio indica que la cepa de *Wolbachia* encontrada en machos de *Lu. evansi* se sitúa en el supergrupo B, uno de los primeros en ser estudiados y se corresponden con las cepas responsables de la incompatibilidad citoplasmática, partenogénesis en huevos y feminización en los artrópodos (Werren *et al.*, 1997). Dentro de este sistema de clasificación de supergrupos, se ha propuesto subdividirlos en otros más pequeños (“grupos”, linajes o cepas) basándose en la secuencia del gen WSP. La cepa detectada en machos de *Lu. evansi* tiene relación con cepas de los grupos Con, Unif, Dei, Prn y Gel que en su mayoría han sido detectadas

en dípteros, indicando que estas cepas tienen gran capacidad de adaptación por sus hospederos y de infectividad por diferentes órganos (Zhou *et al.*, 1998; Ruang–Areerate *et al.*, 2003). Los hospederos de las cepas Con, Unif, Dei, Prn relacionados corresponden con los dípteros *Phlebotomus perniciosus*, *Mansonia uniformis*, *Mansonia indiana*, *Culex sitiens*, *Trichogramma deion*, *Culex gelidus* y al escarabajo *Tribolium confusum* principalmente (Ono *et al.*, 2001; Azpurua *et al.*, 2010).

Resulta necesario indicar que la cepa de *Wolbachia* encontrada en *Lu. evansi*, tiene lejana relación con las cepas encontradas en *Lu. shannoni* y *Lu. whitmani* (Ono *et al.*, 2001). Esto indica que diferentes especies de flebotomíneos han sido infectadas con diferentes cepas de *Wolbachia* en distintas ocasiones (Ono *et al.*, 2001).

El desarrollo de estudios sobre la detección de la infección por *Leishmania* y *Wolbachia* en hembras de poblaciones del género *Lutzomyia* aporta información preliminar para el diseño potencial de estrategias de control biológico de estos insectos vectores. Dentro del grupo de especies encontradas en este estudio, *Lu. gomezi* presenta antecedentes epidemiológicos por ser un vector reconocido de leishmaniasis cutánea en la Costa Caribe y otras regiones del país tanto en zonas rurales como en zonas urbanas (Cochero *et al.*, 2007; Azpurua *et al.*, 2010; Paternina–Gómez *et al.*, 2011; Paternina, 2012).

Esta especie también ha sido encontrada infectada naturalmente con diferentes especies de *Leishmania* en distintos países de Suramérica (González *et al.*, 2006; Paternina–Gómez *et al.*, 2011; Azpurua *et al.*, 2010). Sin embargo, en nuestro estudio, no se detectó la infección natural con *Leishmania* ni con *Wolbachia* en esta especie. El grupo de individuos de *Lu. panamensis* también resultó negativo a la infección natural por *Wolbachia* y *Leishmania*, la presencia de sus ejemplares en el área de estudio es un hallazgo de interés ecoepidemiológico, porque esta especie es un vector reconocido de *Leishmania* (*Viannia*) panamensis en Panamá (Christensen *et al.*, 1972) y fue encontrada infectada naturalmente con *Leishmania* (*Viannia*) braziliensis en Venezuela (Rodríguez *et al.*, 1999).

Es necesario precisar que la ausencia de *Wolbachia* y *Leishmania* en estas dos especies (*Lutzomyia panamensis* y *Lutzomyia gomezi*) puede estar influenciada por el esquema de muestreo, la reducida escala geográfica al considerarse como una exploración puntual y la baja abundancia encontrada, que reduce la posibilidad de acceder a su ADN.

A diferencia, varios grupos de hembras de *Lutzomyia evansi* fueron encontrados positivos a la infección por *Leishmania* (*Viannia*) spp en el estudio. Estos resultados son congruentes con el reporte preliminar realizado por Bejarano *et al.* (2012). Sin embargo es necesario precisar que el ADN de los mismos grupos resultó negativo para *Wolbachia*. En contraste Azpurua *et al.* (2010), reportó co-infección por *Wolbachia* y *Leishmania* en otras especies del género *Lutzomyia*. *Lu. evansi* es el



PRESENCIA DE *Wolbachia* y *Leishmania* EN UNA POBLACIÓN DE *Lutzomyia evansi* PRESENTE EN LA COSTA CARIBE DE COLOMBIA vector principal de la leishmaniasis visceral en la costa caribe de Colombia (Sucre, Bolívar, Córdoba) y vector secundario en ausencia de *Lutzomyia longipalpis* en algunas regiones de Colombia y determinados países de Centroamérica (González *et al.*, 2006).

## 5. CONCLUSIONES

Se confirma la infección natural por el endosimbionte *Wolbachia* en machos de *Lu. evansi* y la detección del parásito *Leishmania* en un grupo de hembras que carecía de la infección de *Wolbachia*. Se sugiere realizar más estudios en otras localidades de la región Caribe y de Colombia para aportar a la filogenia y distribución de *Wolbachia* en estos insectos vectores y relacionarlos a los niveles de infección simultáneos de *Wolbachia* y *Leishmania*.

## Referencias

- Altschul, S., Madden, T., Schaffer, A., Zhang, J., Zhang, Z., Miller, W. & Lipman, D. (1997). Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Research*, 25(17), 3389–3402.
- Azpuruá, J., De La Cruz, D., Valderama, A. & Windsor, D. (2010). *Lutzomyia* Sand Fly Diversity and Rates of Infection by *Wolbachia* and an Exotic *Leishmania* Species on Barro Colorado Island, Panama. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 4(3), e627.
- Baldo, J., Hotopp, D., Jolley, K., Bordenstein, S., Biber, S., Choudhury, S., Hayashi, C., *et al.* (2006). Multilocus Sequence Typing System for the Endosymbiont *Wolbachia pipientis*. *Applied and Environmental Microbiology*, 72 (11), 7098–7110.
- Blanco-Tuirán, P., Maingon, R., Hommel, M. & Alcalá, J. (1993). A focus of visceral and cutaneous leishmaniasis on the northern coast of Colombia. *Archives de l'Institut Pasteur de Tunis*, 70, 481–8.
- Bejarano, E., Sierra, D. & Vélez, I. (2003). Novedades en la distribución geográfica del grupo *verrucarum* (Diptera: Psychodidae) en Colombia. *Biomédica*, 23(3), 341–350.
- Bejarano, E. (2006). Lista actualizada de los psicódidos (Diptera: Psychodidae) de Colombia. *Folia Entomológica Mexicana*, 45(1) 47–56.
- Braig, R., Zhou, W., Dobson, L. & O'Neill, S. (1998). Cloning and characterization of a gene encoding the major Surface protein of the bacterial endosymbiont *Wolbachia pipientis*. *Journal of Bacteriology*, 180(9), 2373–2378.

- Bejarano, E., Uribe, S., Pérez, A., Egurrola, J., Dib, J. & Porter, C. (2015). Nuevos hallazgos de flebotómicos (Diptera: Psychodidae) en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Acta biol. Colomb.* doi.org/10.15446/abc.v20n1.45176.
- Bejarano, E., Pérez-Doria, A., Paternina, E., Paternina-Gómez, M. & Martínez, L. (2012). Natural infection of *Lutzomyia evansi* (Diptera: Psychodidae) with *Leishmania (Viannia)* spp. in northern Colombia. *Am J Trop Med Hyg.* 87, 173.
- Camacho, M., Caraballo, L., Barrios, H., Correa, I. & Figueroa, N. (1977). Kala-azar: un foco en el departamento de Sucre. *Tribuna Médica*, 56, 33–4.
- Cazorla, D., Oviedo, M. & Vivenes, M. (2010). Redescrición de la quetotaxia del cuarto estadio larval de *Lutzomyia evansi* (Diptera: Psychodidae, Phlebotominae). *Revista Colombiana de Entomología*, 36(1), 76–81.
- Christensen, H., Herrero, A. & Telford, S. (1972). Enzootic cutaneous leishmaniasis in eastern Panama. II. Entomological investigations. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 66, 55–66.
- Contreras, A., Vivero, R., Bejarano, E., Carrillo, L. & Vélez, I. (2012). Nuevos registros de flebotómicos (Diptera: Psychodidae) en el área de influencia del río Amoyá en Chaparral, Tolima. *Biomédica*, 32(2), 263–268.
- Cochero, S., Anaya, Y., Días, Y., Paternina, M., Luna, A., Paternina, L. & Bejarano, E. (2007). Infección natural de *Lutzomyia cayennensis cayennensis* con parásitos tripanosomátidos (Kinetoplastida: Trypanosomatidae) en los Montes de María, Colombia. *Revista Cubana de Medicina Tropical*, 61(3) 59–66.
- Collins, F., Mendez, M., Rasmussen, M., Mehaffey, P., Besansky, N. & Finnerty, V. (1987). A ribosomal RNA gene probe differentiates member species of the *Anopheles gambiae* complex. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 37(1), 37–41.
- Cortés, L., Fernández, J. (2008). Especies de *Lutzomyia* en un foco urbano de leishmaniasis visceral y cutánea en El Carmen de Bolívar, Bolívar, Colombia. *Biomédica*, 28, 433–40
- Dedine, F., Ahrens, M., Calcaterra, L. & Shoemaker, D. (2005). Social parasitism in fire ants (*Solenopsis* spp): a potential mechanism for interspecific transfer of *Wolbachia*. *Molecular Entomology*, 14, 1543–1548.
- Ellegaard, M., Klasson, L., Naslund, K., Bourtzis, K. & Andersson, S. (2013). Comparative genomics of *Wolbachia* and the bacterial species concept. *PLoS Genet.* 9(4), e1003381. doi:10.1371/journal.pgen.1003381.

- Floate, K., Kyei-Poku, G. & Coghlin, P. (2006). Overview and relevance of *Wolbachia* bacteria in biocontrol research. *Biocontrol Science Technology*, 16(8), 767–788.
- Favia, G., Ricci, I., Damiani, C., Raddadi, N., Crotti, E., Marzorati, M., *et al.* (2007). Bacteria of the genus *Asaia* stably associate with *Anopheles stephensi*, an Asian malarial mosquito vector. *Proc Natl Acad Sci USA*. 104, 9047–9051.
- Finney, C., Kamhawi, S. & Wasmuth, J. (2015). Does the Arthropod Microbiota Impact the Establishment of Vector-Borne Diseases in Mammalian Hosts?. Plos DOI: 10.1371/journal.ppat.1004646.
- Fraga, J., Montalvo, A., De Doncker, S., Dujardin, J. & Auwera, G. (2010). Phylogeny of *Leishmania* species based on the heat shock protein 70 gene. *Infection, Genetics and Evolution*, 10(2), 238–45.
- González, C., Cabrera, O., Munstermann, L. & Ferro, C. (2006). Distribución de los vectores de *Leishmania infantum* (Kinetoplastida: Trypanosomatidae) en Colombia. *Biomédica*, 26(supl.1), 64–72.
- González, E. & Martínez, F. (2010). Consecuencias evolutivas causadas por bacterias del género *Wolbachia* en artrópodos. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 46, 189–202.
- Gomes, M., de Medeiros, M., Silva, J., Tavares, J., Alves, M. & Freire, M. (2016). Sand flies (Diptera, Psychodidae, Phlebotominae), vectors of *Leishmania* protozoa, at an Atlantic Forest Conservation Unit in the municipality of Nísia Floresta, Rio Grande do Norte state, Brazil. *Parasites & Vectors*, 9, 83.
- Hall, T. (1999). BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*, 41, 95–98.
- Hernández, J., Hurtado, A., Ortiz, R. & Walschburger, T. (1992). Unidades biogeográficas de Colombia. Págs. 105-152 en: Halffter, G. (ed.). *La Diversidad Biológica de Iberoamérica I. CYTED-B Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo*. Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, México.
- Higgins, D., Bleasby, A. & Fuchs, R. (1992). CLUSTAL V: improved software for multiple sequence alignment. *Comput Appl Biosci*. 8, 189–191.
- Hoffmann, A., *et al.* (2011). Successful establishment of *Wolbachia* in *Aedes* populations to suppress dengue transmission. *Nature*, 476, 454–457.
- Hoffmann, A., Ross, P.n & Rasic, G. (2015). *Wolbachia* strains for disease control: ecological and evolutionary considerations. *Evolutionary Applications* doi:10.1111/eva.12286. 8, 751-768.

- Holdridge, L. (1967). *Life Zone Ecology*. San José (Costa Rica): Tropical Science Center.
- Kittayaponga, P., Milnea, J., Tigvattananontb, S. & Baimaia, V. (2000). Distribution of the Reproduction-modifying Bacteria, *Wolbachia*, in Natural Populations of Tephritid Fruit Flies in Thailand Pattamaporn Kittayapong. *Journal of the Science Society of Thailand*, 26, 93–103
- Le Pape, P. (1992). Écoépidémiologie de la leishmaniose a *Leishmania infantum* = *L. chagasi* dans la plaine des caraïbes (Colombie): corrélation vecteur et réservoir canin. [Montpellier, Francia]: Université de Montpellier I.
- Librado, P. & Rosas, J. (2009). DnaSP v5: A software for comprehensive analysis of DNA polymorphism data. *Bioinformatics*, 25, 1451–145.
- Luyo–Acero, G., Uezato, H., Oshiro, M., Takei, K., Kariya, K., Katakura, K., *et al.* (2004). Sequence variation of the Cytochrome b gene of various human infecting members of the genus *Leishmania* and their phylogeny. *Parasitology*, 128, 483–491.
- Martin, D., Williamson, C. & Posada, D. (2005). RDP2: recombination detection and analysis from sequence alignments. *Bioinformatics*, 21(2) 260–262.
- Martínez, L., Rebollo, J., Luna, A., Cochero, S. & Bejarano, E. (2010). Molecular identification of the parasites causing cutaneous leishmaniasis on the Caribbean coast of Colombia. *Parasitology*, 106, 647–652.
- Montoya-Lerma, J. & Lane, R. (1996). Factors affecting host preference of *Lutzomyia evansi* (Diptera: Psychodidae), a vector of visceral leishmaniasis in Colombia. *Bulletin of Entomological Research*, 86 (1), 43–50.
- Ono, M., Braig, H., Munstermann, L., Ferro, C. & Ot' Neill, S. (2001). *Wolbachia* Infections of Phlebotomine Sand Flies (Diptera: Psychodidae). *J Med Entomol.* 38(2), 237–241.
- Paternina–Gómez, M., Pérez–Doria, A., Paternina, L., Velbel, D., Martínez, L. & Bejarano, E. (2011). Infección natural de *Lutzomyia micropyga* con tripanosomatídeos en el Caribe Colombiano. *Biomédica*, 31(sup.3), 209–421.
- Paternina, L. (2012). Determinación molecular de las fuentes alimenticias de *Lutzomyia* spp. (Diptera: Psychodidae) asociadas a casos de Leishmaniasis Cutánea en el departamento de Sucre, Caribe Colombiano [tesis de maestría]. [Medellín (Colombia)]: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. p. 70.
- Pérez–Doria, A., Paternina, L., Paternina, M., Martínez, L., Verbel–Vergara, D. & Bejarano E. (2011). Infección natural de *Lutzomyia evansi* con especies del complejo *Leishmania braziliensis* causantes de leishmaniasis cutánea en la Costa Caribe Colombiana. *Biomédica*, 31(3), 23–205.

- Robert, E. (2004). MUSCLE: multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput. *Nucleic Acids Research*, 32(5), 1792–97.
- Rodriguero, Marcela, S. (2013). *Wolbachia*, una pandemia con posibilidades. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 72, 3–4.
- Ruang–Areerate, T., Kittyapong, P., Baimai, V. & O’Neill, S. (2003). Molecular Phylogeny of *Wolbachia* Endosymbionts in Southeast Asian Mosquitoes (Diptera: Culicidae) based on WSP gene sequences. *Journal of Medical Entomology*, 40(1), 1–5.
- Rodríguez, N., Aguilar, C., Barrios, M. & Barker, D. (1999). Detection of *Leishmania braziliensis* in naturally infected individual sandflies by polymerase chain reaction. *Trans R Soc Trop Med Hyg.* 93, 47–49.
- Sinkins, S. P., Walker, T., Lynd, A. R., Steven, A. R., Makepeace, B. L., Godfray, H. C. J., & Parkhill, J. (2005). *Wolbachia* variability and host effects on crossing type in *Culex* mosquitoes. *Nature*, 436(7048), 257–260.
- Sanchez, I., Liria, J. & Feliciangeli, M. (2015). Ecological niche modeling of seventeen sandflies species (Diptera, Psychodidae, Phlebotominae) from Venezuela. *International Journal of Zoology*. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/108306>.
- Tamura, K., Dudley, J., Nei, M. & Kumar, S. (2007). MEGA 4.1: Molecular Evolutionary Genetics Analysis (MEGA) software version 4.0. *Molecular Biology and Evolution*, 24, 1596–1599.
- Vívenes, M., Oviedo, M. & Márquez, J. (2005). Desarrollo de *Lesihmania mexicana* y *Lesihmania amazonensis* en *Lutzomyia evansi* (Diptera: Psychodidae, Phlebotomine). *Revista Colombiana de Entomología*, 31(1), 71–74.
- Vivero, R., Ortega, E., Aparicio, Y., Torres, C., Muskus, C. & Bejarano, E. (2013). Flebotominos adultos e inmaduros (Diptera: Psychodidae): registros para el Caribe colombiano. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 3(2), 1–10.
- Vivero R., Torres–Gutiérrez C., Bejarano E., Cadena H., Estrada L., Florez F., *et al.* (2015) Study on natural breeding sites of sand flies (Diptera: Phlebotominae) in areas of *Leishmania* transmission in Colombia. *Parasit Vectors*, 8 (116). doi: 10.1186/s13071–015-0711–y.
- Vivero, R., Cadavid-Restrepo, G., Uribe, S., Moreno, C. & Vélez, I. (2016). Bacterial communities associated with the digestive tract of wild populations of *Lutzomyia evansi*: a vector of *Leishmania* in Colombia. *Parasite*. DOI: 10.1051/parasite/2016051. 23, 32.

- Wallace, H. (2013). Mosquitos genéticamente modificados: preocupaciones actuales. Enang (Malasia): Third World Network. P. 98
- Walker, T., Johnson, P., Moreira, L., Iturbe, I., Frentiu, F., McMeniman, C., *et al.* (2011). The wMel *Wolbachia* strain blocks dengue and invades caged *Aedes aegypti* populations. *Nature*, 476, 450–453.
- Werren, J., Zhang, W. & Guo, L. (1995). Evolution and phylogeny of *Wolbachia*: reproductive parasites of arthropods. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*, 261, 55–63.
- Werren, J. (1997). Biology of *Wolbachia*. *Annual Review of Entomology*, 42, 587–609.
- Werren, J., Baldo, L. & Clark, M. (2008). *Wolbachia*: master manipulators of invertebrate biology. *Nature Reviews Microbiology*, 6, 741–751.
- Young, G. & Duncan, M. (1994) Guide to identification and geographic distribution of *Lutzomyia* sand flies in Mexico, the West Indies, Central and South America (Diptera: Psychodidae). *Mem. Am. Entomol.* 54, 1–881.
- Zambrano, P. (2014). Leishmaniasis. CIUDAD: Instituto Nacional de Salud. Protocolo de Vigilancia en Salud Pública PRO-R02.016-Versión 01.
- Zhou, W., Rousset, F. & O'Neill, S. (1998). Phylogeny and PCR-based classification of *Wolbachia* strains using WSP gene sequences. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*, 265, 509–515.

# MÉTODO DIDÁCTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE UN METAL SIN CONTACTO<sup>a</sup>

## A TEACHING METHOD FOR THE CHARACTERIZATION OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY WITHOUT CONTACT

BRAYAN PATIÑO JURADO<sup>b</sup>, SIGIFREDO SOLANO GONZÁLEZ<sup>c</sup>

Recibido 02-09-2016, aceptado 07-12-2016, versión final 08-12-2016.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** En este trabajo se describe un método para caracterizar la conductividad eléctrica de tubos metálicos sin hacer contacto con ellos. Se utiliza un circuito LC, a baja frecuencia, para detectar el cambio de inductancia debido a la presencia del conductor en el núcleo de la bobina. Así mismo, se implementa un instrumento virtual en LabVIEW para medir los cambios del promedio de la potencia instantánea en la bobina a partir de las mediciones de corriente y voltaje cuando diferentes materiales conductores se disponen en su núcleo.

**PALABRAS CLAVE:** Conductividad eléctrica, circuito LC, circuito RLC, frecuencia de resonancia, promedio de potencia instantánea, LabVIEW.

**ABSTRACT:** This work aims to present a method to characterize the electrical conductivity of metal tubes without making contact with them. A LC circuit is implemented to detect the change in the inductance due to the conductor material within the coil. Moreover, a virtual instrument created in LabVIEW is implemented for calculating the average value of instantaneous power of the inductor by measuring the current and the voltage when different conductor tubes are placed in the core.

**KEYWORDS:** Electrical conductivity, LC circuit, RLC circuit, resonance frequency, the average value of instantaneous power.

---

<sup>a</sup>Patiño Jurado, B. & Solano González, S. (2016). Método didáctico para la caracterización de la conductividad eléctrica de un metal sin contacto. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 55-64. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n2.59893>

<sup>b</sup>Estudiante de maestría en Ciencias-Física. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. [bjpatinoj@unal.edu.co](mailto:bjpatinoj@unal.edu.co).

<sup>c</sup>Profesor asociado, Escuela de Física. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

# 1. INTRODUCCIÓN

La medida de la conductividad eléctrica en conductores no es sencilla y requiere métodos o equipos relativamente sofisticados que no siempre se adaptan a la geometría del objeto para ofrecer una medida aceptable. Sin embargo, algunos métodos conocidos, basados en las soluciones analíticas de Dodd & Deeds (1968) ofrecen muy buenos resultados, como el método de análisis de apantallamiento magnético (Íñiguez et al., 2009; Íñiguez et al., 2005), el método de corriente de Eddy pulsada (Chen & Lei, 2015) y los métodos de ancho de banda de corrientes de Eddy de cuatro puntos para platos metálicos (Bowler & Huang, 2005). En el presente trabajo, el objetivo es desarrollar un método didáctico para caracterizar la conductividad eléctrica de tubos metálicos sin contacto a baja frecuencia, utilizando un circuito resonante LC. Al mismo tiempo que se complementa el método con el análisis del cambio de la potencia en la bobina del circuito RLC en cuyo núcleo se dispone el conductor. El desarrollo de este trabajo se puede considerar además, como un experimento demostrativo del efecto que tiene la generación de corrientes de Foucault en materiales que se introducen en el interior de una bobina modificando su inductancia.

Un circuito LC resonante es un circuito constituido por un capacitor y un inductor en serie en el que se ha establecido una condición inicial. La ecuación diferencial que describe el circuito resonante con voltaje en el capacitor  $V_c$  está dada por la siguiente expresión (Cogdell, 2000):

$$\frac{d^2V_c}{dt^2} + \frac{V_c}{LC} = 0 \quad (1)$$

Y para un circuito RLC realimentado, la ecuación diferencial toma la forma:

$$\frac{d^2i_L}{dt^2} + \frac{i_L}{LC} + \frac{(R \pm \beta)}{L} \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (2)$$

Donde  $\pm$  corresponde a la realimentación positiva o negativa respectivamente y  $\beta$  es un parámetro de realimentación tal que si  $\beta = R$ , y el signo es negativo, el circuito es resonante.

El método permite caracterizar los cambios en la frecuencia de resonancia del circuito LC con la conductividad ya conocida del material cilíndrico hueco. Puesto que por la ley de inducción de Faraday-Lenz, una bobina produce un flujo magnético variable con el tiempo y genera un campo eléctrico  $\vec{E}$ . Este campo eléctrico a su vez, induce una distribución de corrientes  $\vec{J}$  en un conductor que se disponga en el núcleo de la bobina, según la relación  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ , que se denominan corrientes de Foucault o corrientes de Eddy (Alonso & Valli, 2010). Además, esas corrientes generan campos magnéticos que modifican el flujo magnético  $\Phi$  generado por la corriente de la bobina y con ella la inductancia misma de la bobina según la siguiente relación (Boylestad et al., 2004)

$$L(\Phi) = N \frac{\Phi}{i_L} \quad (3)$$



El sistema se puede considerar como dos bobinas en serie: una inductancia que corresponde a la bobina generadora y una inductancia que corresponde al tubo conductor en su interior (Jiles, 2015)

$$L(\Phi) = N \frac{\Phi}{i_L} + \frac{\Phi}{i_{ind}} \quad (4)$$

A su vez, la frecuencia natural de resonancia cambia de acuerdo a la corriente inducida en cada material de prueba

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(\Phi)C}} \quad (5)$$

y, por supuesto, varía con el flujo de campo.

El voltaje en la bobina  $V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$  cambia a  $V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} + M \cdot \frac{di_{ind}}{dt}$ , donde  $M$  es la inductancia mutua. Aquí la potencia activa no cambia considerablemente mientras que la potencia aparente si se ve modificada por las corrientes de Foucault. De esta manera, la potencia cambia debido a la reactancia inductiva según la siguiente relación:

$$Q = i^2 X_L \quad (6)$$

Donde la reactancia  $X_L = \omega L$  de la bobina se ve modificada por el cambio de la inductancia, lo cual determina la variación de la potencia inductiva según Jackson et al. (2008):

$$P_L = i_L v_L = i_L^2 X_L = i_L^2 L \omega \quad (7)$$

Esta última consecuencia posibilita caracterizar también la conductividad, suministrada por los fabricantes, de los materiales conductores dispuestos en el interior de la bobina, con el cambio del promedio de la potencia instantánea, la cual está dada por la corriente  $i(t)$  y el voltaje  $v(t)$  instantáneos (Jiles, 2015; Boylestad et al., 2004):

$$\langle P_L \rangle = \langle i_L(t) \cdot v_L(t) \rangle \quad (8)$$

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la caracterización de la frecuencia de resonancia con la conductividad del material se dispusieron los elementos como se muestra en el circuito mostrado en la Figura 1. La bobina sensora utilizada es de referencia *PHywe* 36.6 mH ( $\pm 0.1$  mH) y el osciloscopio de realimentación es un análogo Leader 8020, el cual posee una salida análoga amplificada para realimentar el circuito a través de una resistencia R1. El montaje experimental es mostrado en la Figura 2. Además, se cortaron tubos de aluminio, latón, cobre, hierro, bronce, titanio y acero galvanizado (40% zinc); todos de dimensiones 100.00 mm de largo, 24.08 mm de diámetro interior y 25.40 mm de diámetro exterior.

La condición de voltaje inicial se consigue moviendo el núcleo de hierro en el interior del inductor. Posteriormente se verifica que se ha producido un voltaje inducido, se observa la señal de resonancia del circuito LC en el osciloscopio y se modifica el valor de la resistencia variable para optimizar la realimentación. Se introduce cada tubo metálico en la bobina sensora al tiempo que se determina la frecuencia de resonancia en el osciloscopio para cada material. Posteriormente, se caracterizan los cambios en la frecuencia de resonancia con los datos de conductividad eléctrica para las muestras conocidas.

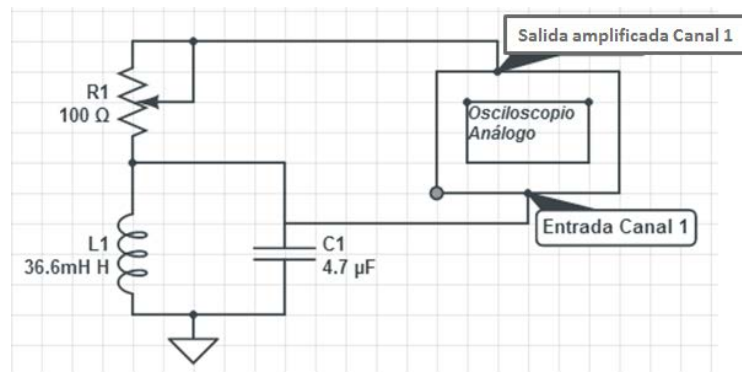


Figura 1: Circuito LC conectado al osciloscopio para realimentar la señal. Realizado con el software LTSpice.

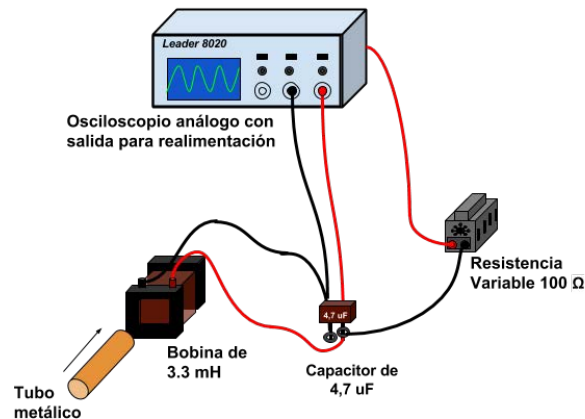


Figura 2: Esquema del montaje experimental del circuito LC realimentado con el osciloscopio análogo.

El otro método utilizado consiste en la adquisición de voltaje y corriente de forma instantánea en la bobina sensora, con el objetivo de determinar el promedio de la potencia instantánea, según la ecuación 8, ya sea que se disponga o no un material conductor en su núcleo. Para ello se construye

el circuito de la Figura 3, cuyo montaje experimental corresponde con la Figura 4, realizando la conexión de modo diferencial a la tarjeta de adquisición DAQ NI 6009. Se hace la adquisición de las medidas de voltaje y corriente por medio de un programa en LabVIEW (versión 2013). A través del instrumento virtual mostrado en la Figura 5, se obtiene los datos del promedio de la potencia instantánea al tomar 100 muestras por periodo de oscilación de las señales y promediando los productos de voltaje y corriente instantáneas. Finalmente, se introduce cada tubo y se determina el promedio de la potencia instantánea al tiempo que se caracteriza con la conductividad del material conductor correspondiente.

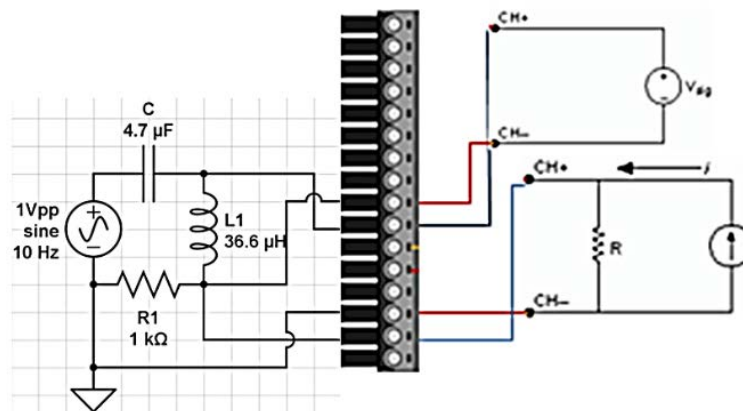


Figura 3: Circuito RLC para adquirir las señales de voltaje y corriente en la bobina. Se muestra la conexión diferencial a los puertos A10 para la corriente y A11 para el voltaje de tarjeta DAQ NI 6009.

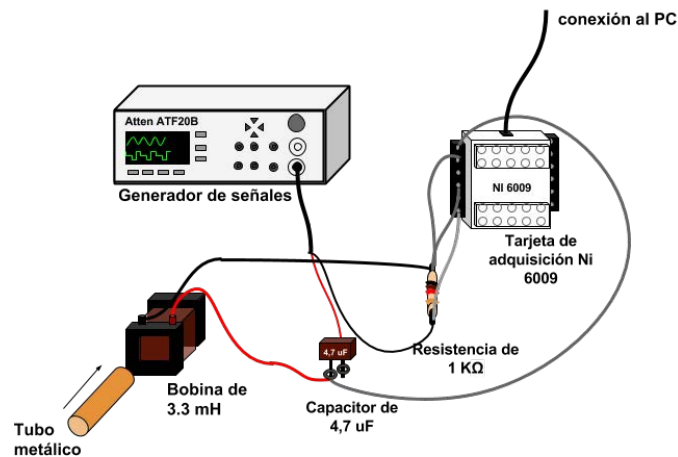


Figura 4: Esquema del montaje experimental del circuito RLC para la medición de la potencia instantánea promedio a través de la adquisición de las señales con la tarjeta DAQ NI 6009 de Labview.

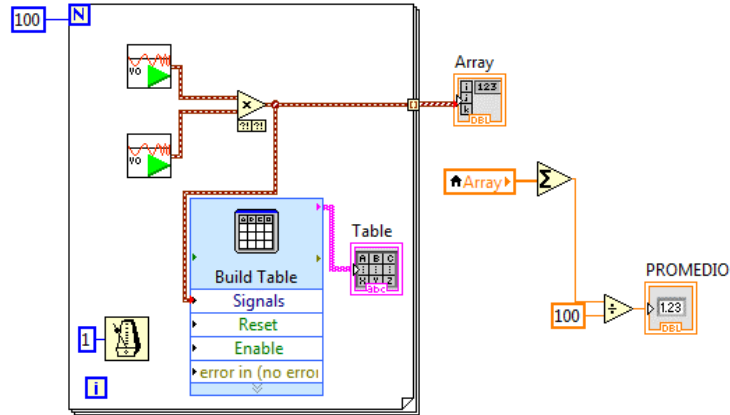


Figura 5: Diagrama de bloques del instrumento virtual en LabVIEW para adquirir señales de voltaje y corriente en la bobina y determinar la potencia media.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para caracterizar la conductividad con la frecuencia se han utilizado los datos de conductividad eléctrica suministrados por los fabricantes de los tubos utilizados (Productos extruidos, 2010; Tubería de cobre, 2007; Productos, 2011). Seguidamente, se observa el cambio de la frecuencia de resonancia del circuito LC debido a la presencia de cada tubo en el interior de la bobina sensora, se reportan los resultados en la Tabla 1. La Figura 6 muestra una respuesta representativa de la señal de resonancia, medida en un osciloscopio Digital UNI-T 2025C (resolución  $\pm 0,1\text{Hz}$ ), al cambio de inductancia de la bobina sensora cuando se dispone un tubo de hierro en su interior.

Por otro lado, el instrumento virtual en LabVIEW ha realizado el cálculo del promedio de la potencia instantánea cuando los diferentes tubos metálicos son introducidos en el núcleo de la bobina sensora modificando su reactancia. La Figura 7 muestra los datos de voltaje, corriente y potencia instantánea de la bobina sin núcleo que fueron adquiridos con la tarjeta DAQ NI 6009 y almacenados en el arreglo del instrumento virtual en Labview. Además, los datos del promedio de la potencia instantánea obtenidos para cada material son presentados en la Tabla 2.

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos del circuito LC implementado, para cada uno de los materiales introducidos en la bobina sensora, muestran una apreciable diferencia entre las medidas de frecuencia de resonancia. Ello implica que de acuerdo a la ecuación 3, el cambio de inductancia de la bobina, debido al material en su núcleo, es suficientemente significativo para cambiar la frecuencia de resonancia del circuito, ecuación 5. A partir de ello, se tiene un método didáctico para explicar como

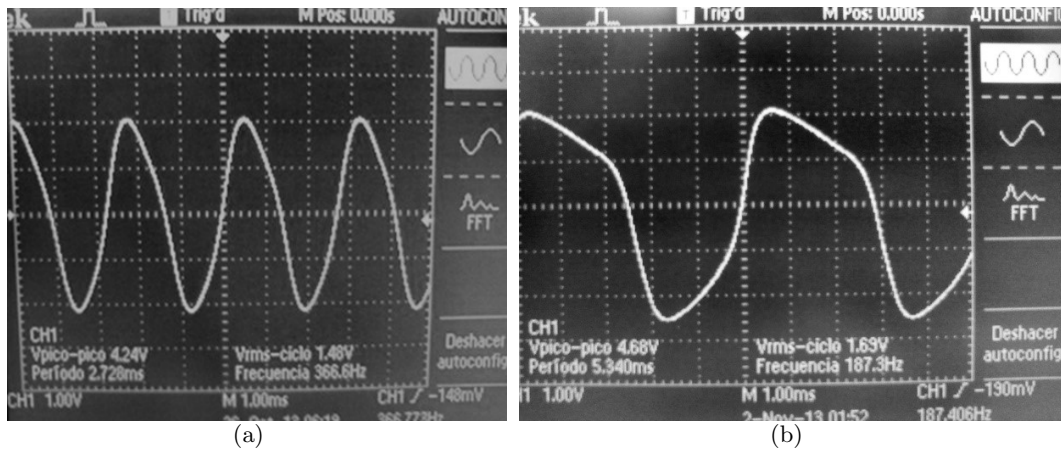


Figura 6: (a) Señal de resonancia del circuito LC conseguida en el osciloscopio con una frecuencia de 366.6 Hz y voltaje pico a pico de 4.24 V. (b) Se observa a la derecha el cambio de frecuencia debido a la presencia de un tubo de hierro en la bobina.

Tabla 1: Frecuencia de resonancia y conductividad para los tubos utilizados (medidos a 25°C)

Material	Diámetro ext. - espesor - longitud ±0.02mm	Frecuencia de resonancia (Hz)	Incertidumbre en la frecuencia (Hz)	Conductividad $\times 10^6 \frac{S}{m}$	Incertidumbre en la conductividad $\times 10^6 \frac{S}{m}$
Aire	-	357.7	±0.01	-	-
Latón	∅25.40-1.32-100.00	256.7	±0.01	15.76	±0.01
Cobre	∅25.40-1.32-100.00	368.4	±0.01	52.77	±0.01
Hierro	∅25.40-1.32-100.00	187.5	±0.01	12.10	±0.01
Aluminio	∅25.40-1.32-100.00	320.8	±0.01	36.38	±0.01
Bronce	∅25.40-1.32-100.00	220.5	±0.01	5.72	±0.01
Titanio	∅25.40-1.32-100.00	211.5	±0.01	4.35	±0.01
Acero Galvanizado (40%Zinc)	∅25.40-1.32-100.00	232.4	±0.01	8.23	±0.01

puede medirse la conductividad sin contacto, y la posibilidad de profundizar en el método para caracterizar con rigor cada material empleado a partir de una medida directa de conductividad, logrando mostrar experimentalmente el efecto de la generación de las corrientes de Foucault en los materiales dispuestos en el interior de una bobina ya que modifican su inductancia.

Por otra parte, los resultados de la implementación del circuito RLC para determinar los cambios en el promedio de la potencia de la bobina sensora, muestran también una diferencia apreciable entre los diferentes metales utilizados. En este caso, el cambio de la inductancia, debido al tubo

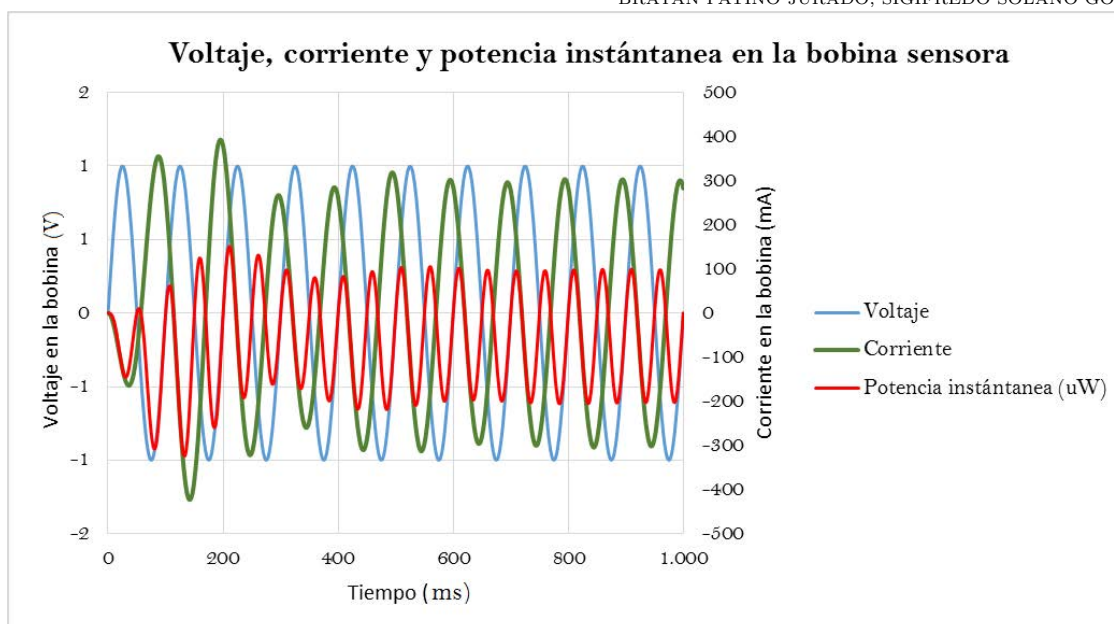


Figura 7: Mediciones de voltaje, corriente y potencia instantánea en la bobina sensora, adquiridos con la tarjeta DAQ NI 6009. A partir de estos datos se calculó el promedio de la potencia instantánea inductiva.

Tabla 2: Potencia media instantánea en la bobina sensora para los diferentes tubos metálicos dispuestos en su núcleo.

Material	Diámetro ext. - espesor - longitud $\pm 0.02\text{mm}$	Promedio de la potencia instantánea $\times 10^9\text{VA}$	Incertidumbre en la potencia $\times 10^9\text{VA}$	Conductividad $\times 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$	Incertidumbre en la conductividad $\times 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$
Aire	-	-2.29	$\pm 0.01$	-	-
Latón	$\varnothing 25.40\text{-}1.32\text{-}100.00$	-2.06	$\pm 0.01$	15.76	$\pm 0.01$
Cobre	$\varnothing 25.40\text{-}1.32\text{-}100.00$	-2.41	$\pm 0.01$	52.77	$\pm 0.01$
Hierro	$\varnothing 25.40\text{-}1.32\text{-}100.00$	-2.19	$\pm 0.01$	12.10	$\pm 0.01$
Aluminio	$\varnothing 25.40\text{-}1.32\text{-}100.00$	-2.10	$\pm 0.01$	36.38	$\pm 0.01$
Bronce	$\varnothing 25.40\text{-}1.32\text{-}100.00$	-2.08	$\pm 0.01$	5.72	$\pm 0.01$
Titanio	$\varnothing 25.40\text{-}1.32\text{-}100.00$	-2.05	$\pm 0.01$	4.35	$\pm 0.01$
Acero Galvanizado (40 %Zinc)	$\varnothing 25.40\text{-}1.32\text{-}100.00$	-2.16	$\pm 0.01$	8.23	$\pm 0.01$

metálico en el interior de la bobina, modifica el valor de la reactancia inductiva y con ello el promedio de la potencia instantánea que se mide de la corriente y voltaje instantáneos del inductor. Aquí, el instrumento virtual desarrollado hizo un manejo adecuado de los datos adquiridos por la tarjeta *DAQ NI 6009*. Finalmente, se ha mostrado con estos datos que la medición del cambio del promedio de la potencia instantánea en la bobina constituye otro buen método para caracterizar

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han mostrado dos métodos didácticos para la caracterización de la conductividad de tubos metálicos. Se debe profundizar rigurosamente en el futuro hasta lograr un instrumento o método para garantizar la medida de la conductividad de los tubos conductores pues sería de gran utilidad donde no se pueda hacer directamente. De esta manera, al caracterizar con rigor los resultados de frecuencia y potencia, se puede pasar de un método demostrativo a un método más económico para la medición de la conductividad sin contacto.

El método de la medición de la frecuencia de resonancia de un circuito LC realimentado mostró resultados específicos para cada uno de los materiales dispuesto en el núcleo de la bobina, debido al cambio de la inductancia que se esperaba desde la base teórica expuesta.

El método de la medición del promedio de la potencia instantánea de la bobina sensora en un circuito RLC realimentado mostró resultados también específicos para cada uno de los materiales introducidos en el núcleo. Esto se constituye en otro método demostrativo, no sólo de cómo se podría medir la conductividad sin contacto, sino de cómo la inductancia es modificada por la generación de corrientes de Foucault en materiales por el campo magnético variable de la bobina.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Escuela de Física de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín por los recursos suministrados para la realización de este trabajo como proyecto de la asignatura Taller III (Circuitos y dispositivos electromagnéticos).

## Referencias

- Alonso Rodríguez, A. & Valli, A. (2010). Eddy current approximation of Maxwell Equations. Milan: Springer.
- Bowler, N. & Huang, Y. (2005). Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point methods. *Measurement Science and Technology*, 16(11), 2193–2200.

- Boylestad, R., Mendoza Barraza, C. & Cera Alonso, J. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. México: Pearson Education.
- Chen, X. & Lei, Y. (2015). Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method. *NDT & E International*, 75, 33–38.
- Cogdell, J. (2000). *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Prentice Hall.
- Dodd, C. V., & Deeds, W. E. (1968). Analytical Solutions to Eddy–Current Probe–Coil Problems. *Journal of applied physics*, 39(6), 2829–2838.
- Íñiguez, J., Raposo, V., Flores, A., Zazo, M. & Hernández–López, A. (2005). Measurement of the electrical conductivity of metallic tubes by studying magnetic screening at low frequency. *Am. J. Phys.* 73(3), 206.
- Íñiguez, J., Raposo, V. & Zazo, M. (2009). Measurement of electrical conductivity in nonferromagnetic tubes and rods at low frequencies. *American Journal of Physics*, 77(10), 949–953.
- Jackson, H., Temple, D. & Kelly, B. (2008). *Introduction to electric circuits*. Don Mills, Ont.: Oxford University Press.
- Jiles, D. (2015). *Introduction to magnetism and magnetic materials*. CRC press.
- Lynch, A. C., Drake, A. E., & Dix, C. H. (1983). Measurement of eddy-current conductivity. *IEE Proceedings A-Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education-Reviews*, 130(5), 254–260.
- May, P. & Zhou, E. (2012). *Numerical Modelling and Design of an Eddy Current Sensor*. INTECH Open Access Publisher.
- Productos. (2011). [En línea]. [Centralbroncesymetales.com](http://www.centralbroncesymetales.com). [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: <http://www.centralbroncesymetales.com/productos.html#>
- Productos extruidos. (2010). [En línea]. Bogotá Colombia. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: [http://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man\\_alumina\\_perfiles\\_estandar\\_1.pdf](http://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man_alumina_perfiles_estandar_1.pdf)
- Tubería de cobre. (2007). [En línea]. Bogotá Colombia. [Consultada en noviembre de 2016]. Disponible en: [http://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man\\_metalex\\_tuberia\\_cobre.pdf](http://www.coval.com.co/pdfs/manuales/man_metalex_tuberia_cobre.pdf)



# ANÁLISIS PALINOLÓGICO Y FISICOQUÍMICO DE MIEL DE ABEJAS (*Apis mellifera l.*) PROCEDENTE DE ALGUNOS MUNICIPIOS DEL ORIENTE Y SUROESTE DE ANTIOQUIA (COLOMBIA)<sup>a</sup>

## PHYSICOCHEMICAL AND PALYNOLOGYC ANALYSIS OF *Apis mellifera l.* HONEYBEE COLLECTED FROM SOME EASTERN AND SOUTHWESTERN MUNICIPALITIES OF ANTIOQUIA (COLOMBIA)

CÉSAR A. VELÁSQUEZ<sup>b</sup>, JESÚS H. GIL<sup>c</sup>, JOHN F. URREGO<sup>d</sup>, DIEGO DURANGO<sup>e</sup>,  
IVONNE M. CASTAÑEDA<sup>b</sup>

Recibido 13-10-2016, aceptado 02-12-2016, versión final 20-12-2016.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** Con el fin de determinar la calidad de la miel de *Apis mellifera* subespecie *scutellata*, procedente de algunos municipios del Suroeste y Oriente Antioqueño (Colombia), producidas durante los años 2013 y 2015, se realizó un estudio fisicoquímico y palinológico de 18 muestras. El análisis fisicoquímico reveló que todos los parámetros analizados se encontraban dentro de los valores establecidos por la normatividad Colombiana, con muy pocas excepciones. En general todas las mieles analizadas fueron de buena calidad y las variaciones en los parámetros analizados, fueron relacionadas con el origen botánico y geográfico de las mismas o errores en el proceso de manipulación. Desde el punto de vista palinológico se observó que la mayoría de mieles del Suroeste fueron uniflorales y las del Oriente multiflorales; la riqueza total de polen de las muestras fue muy variable en ambas regiones, oscilando desde muy pobres a muy ricas. En Oriente el taxón más común fue Asteraceae, seguido de Fabaceae, Solanaceae, Myrtaceae (principalmente *Eucalyptus*), *Hypochaeris*, *Borreria* y *Hedyosmum* y en el Suroeste fueron *Coffea arabica* y *Cecropia agustifolia* seguidos

<sup>a</sup>Velásquez, C. A., Gil, J. H., Urrego, J. F., Durango, D., Castañeda, I. M. (2016). Análisis palinológico y fisicoquímico de miel de abejas (*Apis mellifera l.*) procedente de algunos municipios del Oriente y Suroeste de Antioquia (Colombia). *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 65-87. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n2.60541>

<sup>b</sup>Escuela de Biociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. [cavelasq@unal.edu.co](mailto:cavelasq@unal.edu.co), [labpaleo\\_med@unal.edu.co](mailto:labpaleo_med@unal.edu.co)

<sup>c</sup>Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. [jhgil@unal.edu.co](mailto:jhgil@unal.edu.co)

<sup>d</sup>Laboratorio de Bromatología, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. [jfurregor@unal.edu.co](mailto:jfurregor@unal.edu.co)

<sup>e</sup>Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. [lldurango@unal.edu.co](mailto:lldurango@unal.edu.co)

**PALABRAS CLAVE:** Antioquia, calidad de miel, Palinología, Fisicoquímica.

**ABSTRACT:** In order to determine the honey quality of the species *Apis melliferae* subspecies *scutellata*, from some of the Southwestern and Eastern municipalities of Antioquia Department (Colombia), during 2013 and 2015, physicochemical and palynological studies were made in 18 samples. The physicochemical analysis revealed that all analyzed parameters agreed to the established values of the Colombian laws, with few exceptions. Overall the total honeys samples were considered of good quality and minor variations in the analyzed parameters were attributed to the honeys botanical or geographic origin and also errors in the handling processes. From the palynological view point, most of the samples from southwestern region were unifloral and the Eastern ones were multifloral; total pollen richness was highly variable in both regions, ranging from very poor to very rich samples. The most common taxon in the Eastern region was Asteraceae, followed by Fabaceae, Solanaceae, Myrtaceae (mainly *Eucalyptus*), *Hypochaeris*, *Borreria* and *Hedyosmum* and in the Southwest, the most abundant taxa were *Coffea arabica* and *Cecropia agustifolia* followed by *Mimosa*, *Fabaceae*, *Cordia*, *Mangifera indica* and *Acalypha*.

**KEYWORDS:** Antioquia, honeybee, Palynology, Physicochemistry, quality.

## 1. INTRODUCCIÓN

La miel es la sustancia natural dulce producida por obreras de abejas melíferas a partir del néctar de las flores, secreciones extraflorales o insectos chupadores de savia; que las abejas toman, transportan, transforman, concentran y almacenan en los panales (Ulloa, et al., 2010; Codex Alimentarius Commission, 2001). La miel puede variar en propiedades fisicoquímicas como color, humedad, aroma, densidad y sabor; según el contenido de minerales, carbohidratos, agua, ácidos orgánicos, vitaminas, proteínas, aminoácidos, enzimas, pigmentos, polen y cera (Codex Alimentarius Commission, 2001) y, también por factores como tipo de néctar, suelo, condiciones climáticas, manejo y forma de extracción, origen botánico y geográfico (Fonnegra, 1989; Ulloa, et al., 2010; Persano Oddo, et al., 1995). En conjunto, son factores que tanto el apicultor como el usuario deben tener en cuenta al momento de comercializar y consumir el producto y por lo tanto son de mucho valor, no sólo en aspectos nutricionales sino también en el mercadeo.

La variabilidad en los cerca de 400 componentes de la miel, ha hecho que los investigadores determinen rangos que estas sustancias deben cumplir, para garantizar su pureza y calidad a los consumidores (Dimi & Ilze, 2006; Vásquez, 2010). Además de la apreciación sensorial que brindan el color, olor o sabor; características fisicoquímicas como conductividad eléctrica, acidez (pH), actividad diastasa e invertasa, rotación específica, sólidos insolubles en agua y los contenidos de prolina (Bodganov, et al., 1999; Baroni, et al., 2009), azúcares, humedad, minerales (a menudo reemplazado por el de conductividad eléctrica) y HMF (Hidroximetilfulfural), han sido establecidos

como estándares para control de calidad.

El HFM (Hidroximetilfurfural) y la actividad diastásica, indican el grado de envejecimiento de la miel; un valor alto de HMF y bajos valores de la enzima diastasa indican que su almacenamiento no ha sido adecuado o ha estado sometida a altas temperaturas. La humedad hace referencia al contenido de agua y la actividad de agua (aw) da un valor más exacto de la disponibilidad potencial del agua en la miel; estos dos factores son relevantes respecto a la calidad y almacenamiento, ya que altos valores de humedad son indicadores de que la miel es propensa a fermentarse (Zamora, et al., 2008; Zandamela Mungói, 2008). El pH de la miel, que en su estado natural es ácido (3.5–5.5), determina el sabor y protege la miel del deterioro y proliferación de microorganismos (Bodganov, et al., 2004). La conductividad eléctrica determina la cantidad de minerales que hay en la miel y el valor de ceniza expresa el contenido de sales minerales y puede ser un indicativo del origen geográfico ya que su contenido depende del tipo de suelo donde se encuentran las plantas generadoras de néctar (Karabagias, et al., 2014). En este aspecto, el color también puede ser determinante, pues se sabe que a mayor contenido de minerales más oscura es la miel (Suescún & Vit, 2008). El color de la miel, que va desde ámbar claro a oscuro, también está determinado por el origen botánico, temperatura, cantidad de polen superficial y tiempo de almacenamiento (Terrab, et al., 2005; Bodganov, et al., 2004). Otro componente importante en la calidad de la miel son los carbohidratos, mono y disacáridos, que representan el 73–95% de su peso seco (Dimi & Ilze, 2006; Zamora, et al., 2008); de ellos la fructuosa, glucosa, sacarosa y maltosa son de gran utilidad porque ayudan a diferenciar mieles uniflorales de multiflorales o detectar problemas de adulteración.

Igual que los análisis sensoriales y fisicoquímicos, los análisis palinológicos de la miel son de mucha utilidad en la determinación de la calidad, en razón de que las plantas apícolas (nectaríferas, poliníferas o ambas) pueden ser identificadas por su contenido de polen. En el proceso de recolección de néctar, para elaboración de la miel, las abejas se impregnan con polen de las plantas que visitan y terminan transportándolo al interior de la colmena. En el control de calidad, esto es importante ya que la presencia o ausencia de polen puede dar indicios de que las abejas fueron alimentadas con sustancias azucaradas o que la miel fue suplementada con polen, melaza o sustancias azucaradas o fueron usadas trampas de polen. De igual manera la presencia de esporas de hongos en la miel da indicios de contaminación de la misma (Fonnegra, 1989; Von Der, et al., 2004; Russmann, 1998; Louveaux, et al., 1978). Esto significa que el estudio polínico de la miel (Melisopalinología), no solo ayuda en el control de calidad, sino que da información del tipo de plantas que usan las abejas y del origen geográfico de las mismas.

Dado que el néctar es muy pobre en proteínas, el polen se convierte en la principal fuente de estas en la miel; además de que contienen vitaminas, minerales y otros compuestos que hacen que el contenido de los mismos sea proporcional a su valor nutricional. En Estados Unidos y algunos estados

de Europa se acepta que para que una miel pura tenga buen valor nutritivo, debe de contener más de 200.000 granos de polen por cada 10mL y en el trópico más de 100.000 por cada 10 mL, incluso después de su centrifugación (Fonnegra, 1989). En el caso de mieles que se filtran para eliminar impurezas, el contenido de polen puede disminuir.

Además de la composición y calidad de la miel, otros aspectos como la producción, mercadeo y consumo, son vitales en la industria apícola. La determinación de la calidad de la miel establecida a través de diferentes criterios como los análisis fisicoquímicos, palinológicos y propiedades organolépticas (Bodganov, et al., 2004); es una práctica poco usada en Colombia por el apicultor común, a pesar de la normatividad existente y es frecuente encontrar en el mercado nacional mieles adulteradas o sustitutos de miel de abejas con poco valor nutricional. Esta circunstancia junto con el hecho de que no hay suficientes excedentes para vender al exterior, disminuyen las posibilidades de exportación a otros países.

Para el año 2010 las exportaciones de los 20 países más productores ascendió a 1.216.556 toneladas valoradas en US \$898 millones; con Argentina, China, México y Alemania como principales exportadores (Laverde, et al., 2010) y el estimado para Colombia en 2012 fue de 1500–2000 toneladas, Ministerio Agricultura y Desarrollo Rural, 2012 en Sánchez, et al. (2013) . Esta baja representación de Colombia en el mercado mundial de mieles, es debida básicamente a factores como falta de tradición en apicultura, desconocimiento de técnicas de mejoramiento genético, patologías, métodos de control y el uso inapropiado de equipos para evitar la contaminación. (Espinal, et al., 2006).

Actualmente en Europa y Estados Unidos ha disminuido la producción de miel a causa de la pérdida masiva de abejas causada por múltiples factores como el uso excesivo de agroquímicos, enfermedades, clima, etc (Dainat, et al., 2012) y, aunque en Colombia este problema también empieza a presentarse, hay mayor posibilidad de controlarlo si se tiene en cuenta la experiencia de los países con dificultades y se aumenta la sensibilización de la población al consumo del producto y la exigencia de calidad en el mismo. Estas circunstancias aunadas a la gran diversidad de pisos térmicos y de vegetación que tiene Colombia, abre toda una posibilidad para los apicultores de nuestro país y justifican la realización de investigaciones como la que aquí presentamos. Una capacitación adecuada en cuanto a producción, tipo de vegetación a tener cerca a los apiarios, control de calidad y mercadeo; más el apoyo oficial para que el acceso sea de gran cobertura y debidamente subsidiado, hará que a futuro este producto pueda llegar a todo el país y que además se pueda exportar excedentes. Para las políticas posconflicto que se trazan actualmente en Colombia, esta es una de las tantas posibilidades que deben tenerse en cuenta.

Con el objetivo de aportar a la investigación melisopalinológica en Colombia y, estimular la realización de estudios similares que apunten hacia un control de calidad apropiado de las mieles de abeja

que se generan en nuestro país; realizamos un estudio de la calidad de mieles de *Apis mellifera* L., procedente de algunos municipios del Oriente y Suroeste del departamento de Antioquia, a través de la caracterización fisicoquímica según parámetros estándar y la caracterización palinológica de las mismas.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

Las mieles analizadas provienen de 11 municipios del Oriente y Suroeste antioqueño (Figura 1, Tabla 1). La mayoría de municipios del Oriente antioqueño se encuentran localizados en el altiplano de Rionegro con una altitud que varía entre 2100-2600m; sin embargo, varios municipios tienen parte de sus territorios por debajo de esa cota altitudinal. La región de Oriente tiene la papa y el frijol como cultivos tradicionales, además de una fuerte floricultura bajo condiciones de invernadero. Por su parte, el Suroeste es una zona muy quebrada con alturas que llegan a 4000m, la mayoría de sus municipios se encuentran entre 1000-2500m de altitud y es la zona cafetera por excelencia de Antioquia. Condiciones climáticas diversas así como variaciones en la geomorfología, suelos, entre otros; determinan el tipo de vegetación presente en los 11 municipios estudiados. Aunque no hay inventarios de vegetación específicos de cada apiario, sí hay estudios completos de la vegetación de ambas subregiones que sirven como referencia (Callejas, 2011; Antioquia, 2014; Idárraga-Piedrahíta, et al., 2011; Sánchez, 1995); además de una palinoteca con más de 200 montajes de especies que crecen en la zona.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Análisis fisicoquímico

18 muestras de miel centrifugada, 100-200 mL, fueron obtenidas en centros de acopio de 11 municipios de las subregiones Suroeste y Oriente del Departamento de Antioquia y llevadas a los laboratorios de Alimentos y Paleoecología de la Universidad Nacional de Colombia-Medellín para estudio fisicoquímico y palinológico, respectivamente. Las muestras fueron almacenadas en un lugar oscuro y fresco durante el periodo en que se hicieron los procedimientos. En cada muestra se determinaron las características fisicoquímicas relacionadas a continuación, de acuerdo con los siguientes métodos:

El contenido de sólidos solubles se determinó por lectura refractométrica a 20°C, empleando un refractómetro ABBE con luz de sodio (Milton Roy Company), el de humedad se reportó utilizando la relación entre índice de refracción y contenido de agua de la miel (AOAC método 969.38) y para la actividad acuosa se empleó un medidor de actividad acuosa (Acualab) de espejo enfriado. El contenido de cenizas se determinó empleando el método gravimétrico (AOAC método

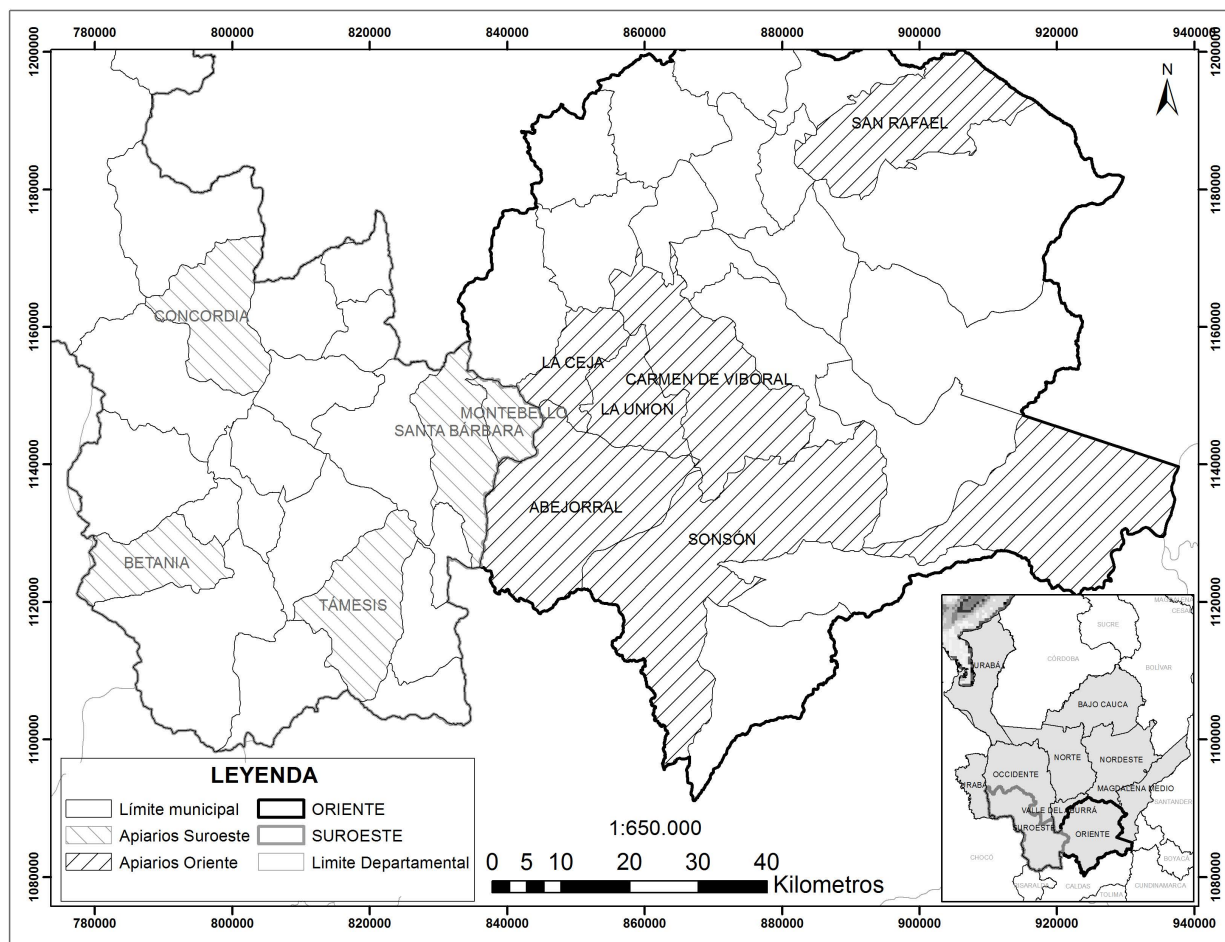


Figura 1: Mapa del departamento de Antioquia con la ubicación de las subregiones Oriente y Suroeste y los municipios escogidos para el presente estudio.

920.181) y la conductividad eléctrica se midió con un conductímetro de mesa sobre una disolución de miel al 20%, preparada en agua destilada libre de CO<sub>2</sub>, a 20°C. El pH se estableció en una solución de miel al 10% (p/v) empleando un electrodo selectivo calibrado con soluciones buffer de pH 4 y 7 y la acidez libre se realizó por titulación con NaOH hasta pH 0 8.2 (AOAC método 962.19).

El Hidroximetilfurfural se determinó espectrofotométricamente mediante clarificación de las mieles con las soluciones Carrez (I y II) y la adición de bisulfito de sodio (AOAC método 980.23) y la actividad diastasa se estableció espectrofotométricamente a través del cambio de absorbancia del complejo almidón-yodo (AOAC método 958.09). La rotación óptica se midió en un polarímetro digital Jasco P-2000 con filtro de sodio (589 nm), apertura de 8, temperatura de 20°C y en celda de 1 dm. Para ello, 12g de miel se diluyeron en 50mL de agua; seguidamente se adicionó volúmenes iguales de los reactivos Carrez I y II, se agitó por 30s y se diluyó la solución a 100mL. Después de

Tabla 1: Coordenadas geográficas, altitud y zona de vida de los municipios estudiados. Las letras OR (Oriente) y SO (Suroeste) hacen referencia al código establecido para cada muestra (1-18). bmh-T: Bosque muy húmedo Tropical, bp-PM (Bosque Pluvial Premontano), bh-MB: Bosque húmedo Montano Bajo, bh-PM: Bosque Húmedo Premontano, bmh-MB: Bosque muy húmedo Montano Bajo, bmh-PM: Bosque muy húmedo premontano, bs-T: Bosque seco Tropical, de acuerdo con las zonas de vida de Holdridge, 1981.

Código	Código de laboratorio	Año de cosecha	Municipio	Coordenadas geográficas		Altura	Zona de vida
OR1	1	2014	San Rafael	6°17'36.76"	75°01'42.88"	1000-2000	bmh-T ;bp-PM;bh-MB;bh-PM
OR2	2	2014	La Unión	5°58'25.86"	75°21'39.46"	2000-3000	bmh-MB
OR3	3	2015	La Ceja	6° 2'12.01"	75°25'58.80"	1800-2300	bmh-MB;bmh-PM;bh-MB
OR4	4	2014	El Carmen de Vival	6° 4'53.00"	75°20'0.22"	800-3000	bmh-PM;bp-PM
OR5	5	2014	Sonsón	5°42'46.27"	75°18'35.52"	1380-3600	bmh-PM;bh-PM;bh-T
OR6	6	2013	Abejorral	5°47'20.64"	75°25'42.77"	2125-2950	bs-T;bh-PM;bmh-PM;bmh-MB
OR8	7	2013	Sonsón	5°42'46.27"	75°18'35.52"	1380-3600	bmh-PM;bh-PM;bh-T
OR9	8	2013	Sonsón	5°42'46.27"	75°18'35.52"	1380-3600	bmh-PM;bh-PM;bh-T
SO1	9	2015	Támesis	5°39'54.10"	75°33'58.62"	1610-1820	bmh-PM;bh-PM;bs-T;bmh-MB
SO2	10	2014	Santa Bárbara	5°52'27.57"	75°33'58.62"	1669	bmh-PM;bh-PM;bs-T;bmh-MB
SO3	11	2015	Santa Bárbara	5°52'27.57"	75°33'58.62"	1669	bmh-PM;bh-PM;bs-T;bmh-MB
SO4	12	2014	Santa Bárbara	5°52'27.57"	75°33'58.62"	1669	bmh-PM;bh-PM;bs-T;bmh-MB
SO5	13	2014	Santa Bárbara	5°52'27.57"	75°33'58.62"	1669	bmh-PM;bh-PM;bs-T;bmh-MB
SO6	14	2013	Montebello	5°56'48.29"	75°31'25.04"	1892	bmh-PM;bm-PM;bs-T;bmh-MB
SO7	15	2013	Concordia	6°2'43.90"	75°33'58.62"	1952	bh-PM;bmh-MB;bmh-PM;bs-T
SO8	16	2013	Santa Bárbara	5°52'27.57"	75°33'58.62"	1669	bmh-PM;bh-PM;bs-T;bmh-MB
SO9	17	2013	Santa Bárbara	5°52'27.57"	75°33'58.62"	1669	bmh-PM;bh-PM;bs-T;bmh-MB
SO10	18	2013	Betania	5°44'53.23"	75°58'35.14"	1287	bmh-PM;bh-MB;bp-M

24h de reposo se filtró la solución con papel Wathman y el filtrado se empleó para la medición en el polarímetro.

Los azúcares reductores se determinaron espectrofotométricamente empleando el reactivo ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNSA) siguiendo la metodología descrita por Saxena, et al. (2010). La glucosa, fructosa y sacarosa se cuantificaron mediante cromatografía líquida de alta eficiencia empleando un detector de índice de refracción. Se empleó una columna pínacle II Amino (150\*4.6mm, 3  $\mu$ m) con temperatura de horno de 35°C y como fase móvil la mezcla acetonitrilo: agua 90:10 a un flujo de

1.0mL/min. Se construyeron curvas de calibración para cada uno de los azúcares.

## 3.2. Análisis palinológico

### 3.2.1. Obtención e identificación de material polínico

Las mieles fueron procesadas según técnica de acetólisis de Erdtman (1986) con algunas modificaciones propuestas por Fonnegra (1989) y el Laboratorio de Paleoecología de la Universidad Nacional de Colombia, sede de Medellín. El montaje permanente de placas se hizo con parafina teniendo como medio de montaje gelatina glicerinada, siguiendo el protocolo de Kissler (1935) en Erdtman (1986). Las muestras fueron analizadas en un microscopio Zeiss (Primo Star) en aumentos de 400 y 1000 y, las fotomicrografías fueron tomadas con una cámara Zeiss (Axioncam ERc 5s). La identificación polínica se realizó con ayuda de la Palinoteca del Laboratorio de Paleoecología de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, que contiene especies apícolas propias de la zona; además de bibliografía especializada como: Aguilar (1992), Aguilar & Velásquez (1992), Velásquez & Rangelch (1995), Velásquez (1999), Roubik & Moreno (1991), Bedoya (2002), Nates-Parra, et al. (2013), Giraldo, et al. (2011), Moreno & Devia (1982), Girón (1995).

Los palinomorfos se identificaron hasta familia y género y, solo en aquellos casos donde se sabía que la planta estaba en la zona y sus granos de polen ya habían sido descritos en otros estudios, se llegó hasta especie (Ej. *Rubiaceae: Coffea arabica*). A pesar de tener una buena colección de placas de polen de plantas apícolas, como referencia; no es posible en muchos casos, identificar el polen hasta especie, en razón de que muchos géneros y familias son estenopolínicas. A los granos que no fue posible identificar, se les denominó como morfotipos; estos también fueron debidamente ubicados, descritos y fotografiados. Este procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de Paleoecología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

### 3.2.2. Análisis cualitativo y cuantitativo

Para determinar un número mínimo de granos a contar en las muestras palinológicas, se escogió como muestra tipo la OR3 por tener un número total de granos promedio a todas las muestras analizadas. En ésta se realizó un conteo sistemático de granos de polen, discriminando el número de taxones diferentes que se encontraba y la cantidad total de polen observada. Al contar un total de 577 granos se llegó a un total de 36 taxa y se observó que la curva se estabilizó. Luego se realizaron mediante el programa estadístico R versión 2.3.7.5, 2500 simulaciones de conteo partiendo de los datos del conteo inicial. De acuerdo con los resultados se estableció que para detectar en promedio el 70% de las especies encontradas (Velásquez, 1999; Velásquez, 2004) se necesitaría contar aproximadamente 165 granos; sin embargo, hasta donde se pudo los conteos se llevaron a 500 o más



granos por placa, para garantizar conteos representativos. En la presentación de los resultados de conteos se usaron palinogramas obtenidos con los programas TILIA y TILIAGRAPH ®V.1.7.16 (Grimm, 1987), que permiten visualizar las frecuencias relativas de cada taxón (Figura 2). En cuanto a gráficos y diagramas de dispersión se utilizó el programa Excel 2012.

Para el análisis cualitativo se aplicó el método de Louveaux, et al. (1978), clasificando los granos de polen en las siguientes categorías según su abundancia relativa en cada una de las muestras: categoría 1, polen dominante (D), presente en más de 45%; categoría 2, polen secundario (S), presente entre 16-45%; categoría 3, polen aislado importante (AI) de 3-15%; categoría 4, polen aislado (A), presente en menos de 3%. De acuerdo con la categoría definida y el conocimiento de los taxa botánicos presentes, se establece si la miel es unifloral cuando posee un polen dominante o multifloral si no lo hay.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis fisicoquímico

Los valores registrados de los parámetros fisicoquímicos, mayoritariamente se encuentran dentro de los valores establecidos por la normatividad Colombiana para mieles de *Apis mellifera*. En general, todas las mieles cumplieron con los valores establecidos para mieles del trópico, según la resolución 1057 del ministerio de protección social, en relación a los parámetros de humedad, cenizas, conductividad eléctrica, azúcares reductores, hidroximetilfurfural y sacarosa. No obstante, algunas mieles presentaron valores de acidez libre por encima de 50 meq/Kg y actividad diastasa inferior a 8. Es notable que las mieles provenientes del Suroeste antioqueño presentaron mayor acidez libre que las mieles provenientes del Oriente de Antioquia (Tabla 2).

### 4.2. Análisis palinológico cuantitativo y cualitativo

Más de 500 granos de polen por muestra de miel fueron contados y aproximadamente 100 tipos polínicos provenientes de hierbas, arbustos y árboles fueron identificados; además de varios elementos llamados tipos polínicos, que estuvieron presentes en muy baja proporción y que no se asociaron a ninguna especie vegetal conocida. Una relación entre las proporciones de los principales tipos polínicos identificados se observa en la figura 2. De acuerdo con la cantidad de polen presente en las muestras de miel (polen/mL), se definieron la categoría polínica y el tipo de miel, así mismo se identificaron los principales taxones asociados y se categorizaron según abundancia relativa (Tabla 3). Algunos taxones representativos identificados en las muestras de miel se muestran en las planchas fotográficas 1 y 2.

Tabla 2: Caracterización fisicoquímica de mieles colectadas en las subregiones del Oriente y Suroeste de Antioquia.

Muestras	Humedad	aw	Cenizas(%)	CE(mS/cm)	AL(meq/Kg)	pH	ID	HMF (mg/Kg)	AR(%)	Fructosa(%)	Glucosa(%)	Sacarosa(%)	RO
<b>Oriente</b>													
OR1 (1)	18	0.59	0.29	0.33	37.4	3.76	12	42	85.59	31.51	31.51	6.6	-7.46
OR2 (2)	20	0.61	0.27	0.49	33.2	3.66	15	29	83.41	29.96	29.96	6.02	-9.3
OR3 (3)	18	0.59	0.28	0.67	26.3	3.67	11	38	89.72	29.08	29.08	8.98	-12.4
OR4 (4)	19	0.6	0.17	0.35	23.5	3.73	12	24	82.45	30.47	30.47	7.33	-4.98
OR5 (5)	18	0.59	0.26	0.58	24.4	3.83	N.R.	19	86.47	31.27	31.27	7.41	-12.8
OR6 (6)	20.1	0.56	0.32	0.62	43.04	3.9	13	36	66.77	40.19	31.76	2.03	-9.05
OR8 (7)	17	0.54	0.23	0.51	23.26	3.97	2.2	38	76.73	36.38	31.72	2.07	-6.07
OR9 (8)	17.7	0.56	0.23	0.51	26.1	3.83	0.9	30	76	38.2	31.9	2.07	-8.91
<b>Suroeste</b>													
SO1 (9)	18	0.61	0.1	0.5	37.1	3.42	6	55	87.23	30.83	30.85	8.97	-9.89
SO2 (10)	17	0.57	0.21	0.43	49.8	3.61	9	59	78.24	28.75	28.75	7.98	-6.01
SO3 (11)	18	0.6	0.37	0.55	54.2	3.75	15	38	80.5	30.07	30.07	8.7	-3.7
SO4 (12)	17	0.55	0.44	0.67	52.7	3.72	15	38	85.92	29.55	29.55	10.91	-8.38
SO5 (13)	17	0.58	0.35	0.62	56.6	3.75	12	40	81.84	30.17	30.17	6.59	-7.74
SO6 (14)	18.9	0.53	0.27	0.56	42.6	4.1	12.7	49	64.8	36.6	27.2	2.73	-3.17
SO7 (15)	18.9	0.56	0.18	0.41	46.6	3.75	6.4	48	70.7	37	35.3	3.06	-5.23
SO8 (16)	18.5	0.52	0.15	0.34	27.6	3.96	12.5	27	74.5	38.6	36.8	2.66	-5.59
SO9 (17)	17.8	0.54	0.45	0.85	35.8	4.47	13.3	25	69.9	36.4	28.2	1.98	-4.12
SO10 (18)	18.2	0.56	0.16	0.4	34.2	3.64	11.4	35	72.03	36.63	30.75	2.48	-7.97
Promedio Oriente	18.6	0.582	0.25	0.48	28.9	3.32	9.7	32	80.05	33.76	30.43	5	-8.46
Desviación	1.1	0.022	0.048	0.115	7.336	0.121	5.201	7.485	7.348	4.116	1.851	2.81	2.868
CV	6	3.8	19.4	23.9	25.4	3.2	53.4	23.1	9.2	12.2	6.1	56.3	-33.9
Promedio Suroeste	17.9	0.562	0.27	0.53	42.3	3.32	11.3	41	76.57	33.46	30.76	5.61	-6.18
Desviación	0.7	0.029	0.127	0.153	9.19	0.295	3.209	11.247	7.378	3.86	3.031	3.364	2.235
CV	4.1	5.2	47.3	28.6	21.7	7.7	28.3	27.2	9.6	11.5	9.9	60	-36.2
Norma Colombiana <sup>a</sup>	≤21	-	≤0.60	≤0.8	≤50	-	≥8	≤60	≥60	-	-	≤10	-

<sup>a</sup>Resolución 1057 de 2010 Ministerio Protección Social; aw: actividad de agua; CE = conductividad eléctrica; AL = acidez libre; pH = potencial de hidrogeno; ID = índice de diastasa; HMF = hidroximetilfurfural; AR = azúcares reductores; RO = rotación óptica; CV= Coeficiente de variación.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 5.1. Análisis fisicoquímico

La mayoría de parámetros físico químicos medidos estuvieron dentro de los estándares nacionales e internacionales. Por ejemplo, respecto de la humedad, los valores en todas las muestras fueron menores al valor máximo permitido en la normativa nacional para mieles del trópico (21 %), aunque las muestras del Oriente presentaron un valor promedio ligeramente superior (18,6 %) en comparación con las del Suroeste antioqueño (17,9 %). En este último sector Velásquez (2013) reportaron valores de humedad similares entre 17, 12 y 19,75 %. Dado que algunos autores indican que el contenido de humedad de la miel depende del contenido de agua del néctar de la planta, el nivel de maduración alcanzado en la colmena, las condiciones de procesamiento y almacenamiento, el periodo estacional ( Yücel & Sultanoğlu, 2013; Nanda, et al., 2003) y la diversidad de los lugares de procedencia de las muestras de miel analizadas, es factible que las pequeñas diferencias encontradas puedan ser explicadas por la variación en estos factores.

ANÁLISIS PALINOLÓGICO Y FÍSICOQUÍMICO DE MIEL DE ABEJAS (*Apis mellifera* L.) PROCEDENTE DE ALGUNOS MUNICIPIOS DEL ORIENTE Y SUROESTE DE ANTIOQUIA (COLOMBIA)

Tabla 3: Clasificación de las muestras de acuerdo con abundancia total de polen por unidad de medida y origen botánico. Los tipos de polen identificados se muestran según su abundancia relativa: \* polen dominante, \*\* polen secundario\*\*, \*\*\*polen aislado importante, \*\*\*\* polen aislado.

Código	Código de laboratorio	Año de cosecha	Municipio	Cantidad de polen/mL y categoría de acuerdo a la riqueza	Categoría según cantidad de polen	Tipos de miel según origen botánico	Principales taxones encontrados en las muestras de mieles
OR1	1	2014	San Rafael	5529(I)	Clase I	Multifloral	<i>Tapiriva</i> (42,8)**, <i>Hedysmum</i> (13,9)***, <i>Inga</i> (6,2)***, <i>Melastomataceae</i> (3,4)***
OR2	2	2014	La Unión	1113(I)	Clase I	Multifloral	<i>Hypochoeris</i> (21,3)**, <i>Asteraceae</i> (17,1)***, <i>Croton</i> (13,5)***, <i>Borreria</i> (12,8)***
OR3	3	2013	La Ceja	5732(I)	Clase II	Multifloral	<i>Hypochoeris</i> (27,9)**, <i>Asteraceae</i> (15,3)***, <i>Fabaceae</i> (9,8)***, <i>Crotalaria</i> (6,2)***
OR4	4	2014	El Carmen de Vival	43(I)	Clase I	Unifloral	<i>Myrtaceae</i> (47)*, <i>Coffea arabica</i> (7)***, <i>Mimosa pudica</i> (6,5)***, <i>Solanaceae</i> (6,5)***, <i>Cecropia angustifolia</i> (6)***
OR5	5	2014	Sonsón	13485(II)	Clase II	Multifloral	<i>Myrtaceae</i> (25,5)**, <i>Fabaceae</i> cf. <i>trifolium</i> (89,8)***, <i>Rumex</i> (9,2)***, <i>Hypochoeris</i> sp.(7)***, <i>Borreria</i> (5,4)***, <i>Viburnum</i> (59)***, <i>Asteraceae</i> (4,6)***, <i>Myrtaceae</i> sp1(3,4)***
OR6	6	2013	Abejorral	14249(II)	Clase II	Multifloral	<i>Coffea arabica</i> (37)**, <i>Cecropia angustifolia</i> (37)**, <i>Cordia</i> sp.(9,4)***
OR8	7	2013	Sonsón	6220(II)	Clase II	Unifloral	<i>Coffea arabica</i> (55,5)*, <i>Viburnum</i> sp.(18,9)***, <i>Cecropia angustifolia</i> (5,4)***, <i>Acalypha</i> sp.(4)***
OR9	8	2013	Sonsón	7768(II)	Clase II	Unifloral	<i>Cecropia angustifolia</i> (70)*, <i>Mangifera indica</i> (5,1)***, <i>Coffea arabica</i> (4,3)***
SO1	9	2014	Támesis	1836(I)	Clase I	Unifloral	<i>Cecropia angustifolia</i> (21)**, <i>Solanaceae</i> (9,4)***, <i>Asteraceae</i> (4,5)***, <i>Muehlenbeckia</i> (3,8)***, <i>Coffea arabica</i> (3,5)***, <i>Mimosa</i> sp2.(3,1)***, <i>Acalypha</i> sp.(2,9)***, <i>Rutaceae</i> (2,8)***
SO2	10	2014	Santa Barbara	4041(I)	Clase II	Multifloral	<i>Cecropia angustifolia</i> (71,4)*, <i>Cordia</i> sp.(7,1)***, <i>Mimosa pudica</i> (4,7)***, <i>Piper</i> sp.(4)***
SO3	11	2014	Santa Bárbara	125768(V)	Clase V	Unifloral	<i>Mimosa pudica</i> (39,7)**, <i>Asteraceae</i> (20,5)**, <i>Psidium</i> sp.(7,6)***, <i>Hedysmum</i> (7,2)***, <i>Fabaceae</i> cf. <i>trifolium</i> (5,2)***, <i>Anacardiaceae</i> sp2.(2,9)***, <i>Eucalyptus</i> (2,7)***, <i>Ilex</i> sp.(2)****
SO4	12	2014	Santa Bárbara	9120(II)	Clase II	Unifloral	<i>Coffea arabica</i> (76,7)*, <i>Fragaria</i> (6,4)***, <i>Fabaceae</i> (3,39)***, <i>Eucalyptus</i> (3,2)***
SO5	13	2014	Santa Bárbara	4370(II)	Clase II	Unifloral	<i>Fabaceae</i> (83)*, <i>Coffea arabica</i> (9,89)***, <i>Melaceae</i> (5,8)***
SO6	14	2013	Montebello	1795(I)	Clase I	Unifloral	<i>Mangifera indica</i> (49,5)*, <i>Psidium</i> sp.(812,39)***, <i>Coffea arabica</i> (12,5)***, <i>Solanaceae</i> sp1.(8)***, <i>Cecropia angustifolia</i> (5,4)***
SO7	15	2013	Concordia	9451(II)	Clase II	Unifloral	<i>Cecropia angustifolia</i> (82,3)*, <i>Asteraceae</i> (2,8)***, <i>Mimosa pudica</i> (1,9)***, <i>Mangifera indica</i> (1,8)****
SO8	16	2013	Santa Bárbara	635(I)	Clase I	Multifloral	<i>Cordia</i> sp.(24,7)**, <i>Coffea arabica</i> (17,1)**, <i>Asteraceae</i> (13,4)***, <i>Mimosa pudica</i> (11,8)***, <i>Fabaceae</i> (10,7)***, <i>Piper</i> sp.(10,4)***, <i>Cecropia angustifolia</i> (2,4)***, <i>Hedysmum</i> (2,1)****
SO9	17	2013	Santa Bárbara	3571(II)	Clase II	Multifloral	<i>Solanaceae</i> sp2.(31,1)**, <i>Viburnum</i> sp.(19)**, <i>Asteraceae</i> (10,6)***, <i>Fabaceae</i> cf. <i>trifolium</i> (7,3)***, <i>Hypochoeris</i> sp.(4,8)***
SO10	18	2013	Betania	16281(III)	Clase III	Unifloral	<i>Asteraceae</i> (469)*, <i>Fabaceae</i> (239)**, <i>Hypochoeris</i> sp.(9,5)***, <i>Solanaceae</i> (7,2)***, <i>Hypericum</i> (1,9)****, <i>Viburnum</i> (1,6)****

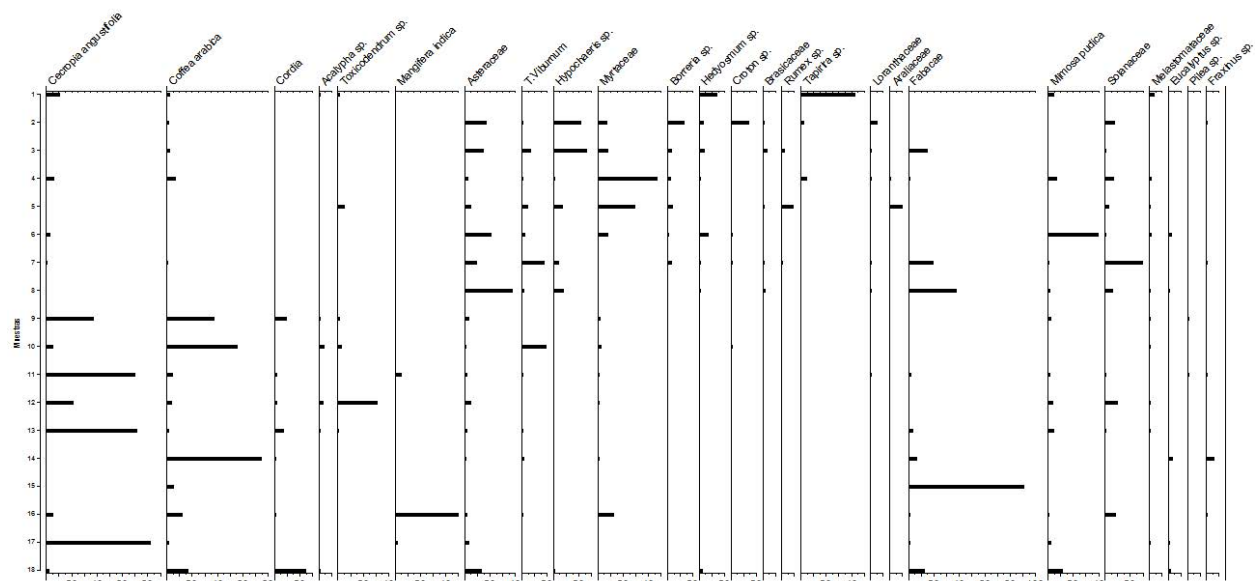


Figura 2: Porcentaje de los principales tipos polínicos identificados en muestras de miel procedentes del Oriente (1-8 en el eje Y) y Suroeste de Antioquia (9-18 en el eje Y). Números en eje Y corresponden a códigos de muestras, de acuerdo con datos presentados en la Tabla 3. Se evidencia una clara diferencia entre las mieles de las dos regiones.

El valor promedio de aw de las mieles fue de 0.58 (Oriente) y 0.56 (Suroeste), promedios aceptables ya que estos usualmente varían entre 0.50 y 0.65; aunque no hay límites establecidos por las normas nacionales o internacionales. Valores más altos entre 0,611 y 0,652, fueron reportados en el Suroeste de Antioquia por Velásquez (2013). Mediciones por encima de 0.60 pueden representar un umbral

crítico para la estabilidad microbiológica porque la miel contiene levaduras osmófilas que pueden deteriorar el producto mediante fermentación alcohólica (Escuredo, et al., 2013).

Los contenidos de cenizas en mieles varían entre 0.02 y 1.1% con valores promedios de 0.17% (Chakir, et al., 2011), mientras que la normativa colombiana (Ministerio de la protección social., 2010) establece valores menores a 0.6%. Los valores promedio de las mieles del Oriente y Suroeste antioqueño estuvieron por debajo de este valor, 0.25 y 0.27% respectivamente. Los bajos valores de cenizas y conductividad eléctrica, relacionados entre sí, indican que las mieles del Oriente y Suroeste de Antioquia analizadas son de origen floral y que posiblemente ninguna de las muestras fue adulterada con melazas (Mendes, et al., 1998). En particular, las mieles estudiadas provenientes del Suroeste (promedio = 0.53 mS/cm; solo una estuvo por encima de normatividad colombiana: <0.8 mS/cm) presentaron mayores valores de la conductividad eléctrica que las mieles del Oriente (promedio = 0.48 mS/cm), lo cual posiblemente este asociado no solo al contenido de cenizas sino también al mayor contenido de acidez encontrado en ellas; pues la conductividad eléctrica en mieles revela no solo la presencia de iones y proteínas sino también la presencia de ácidos orgánicos (Yücel & Sultanoglu, 2013).

En cuanto a la acidez, se observó que algunas mieles procedentes del Suroeste presentaron valores más altos que las del Oriente e incluso superiores al valor máximo establecido en las normativas nacionales (Ministerio de la protección social., 2010) e internacionales (Codex Alimentarius Commission, 2001). En razón de que la acidez en la miel es debida a la presencia de ácidos orgánicos, principalmente ácido glucónico, su respectiva lactona y de iones inorgánicos (Nanda, et al., 2003) y, que de acuerdo con el análisis palinológico, en estas hay predominio de la especie *Coffea arabica* (café); es factible asociar los mayores valores de acidez de las mieles de los municipios del Suroeste antioqueño estudiados, a su origen botánico, pues son altamente cafeteros y generalmente los apia-rios están cerca a los cafetales. Los resultados coinciden con los reportados por Velásquez (2013) cuyos valores de acidez, en mieles del Suroeste antioqueño, oscilaron entre 38,0 y 45,3 meq/kg.

Por su parte, el pH de las mieles del Suroeste varió entre 3,42 y 4,47 (promedio = 3,82) y las del Oriente entre 3.66 y 3.99 (promedio 3,82), valores próximos a los de referencia para mieles y cercanos a los encontrados en muestras del Suroeste antioqueño (Velásquez, 2013). Dado que este parámetro es de gran importancia durante la extracción y el almacenamiento e influye en la textura, estabilidad y vida útil de la miel (Terrab, et al., 2005), se puede pensar que las muestras analizadas son estables; además de que son de origen floral y no de mielada que normalmente tienen valores de pH más altos. La alta presencia de granos de polen también apoya este supuesto. Por otro lado, la estabilidad de la miel depende también de la proliferación de microorganismos, ya que levaduras y mohos son capaces de desarrollarse en ambientes ácidos (pH = 4.0-4.5). La ausencia casi total de estos organismos o de sus esporas reafirman la idea de unas muestras esta-

bles. En general, las mieles del Suroeste fueron más ácidas y oscuras que las del Oriente antioqueño.

La actividad diastasa, así como el contenido de HMF, son parámetros ampliamente reconocidos por diferentes regulaciones para evaluar la frescura y el sobre calentamiento del producto (Código Alimentario Argentino, 1997). Un factor que afecta la actividad enzimática es la temperatura; por lo tanto, algunos autores indican que bajos valores en la actividad diastasa podrían estar relacionados con un inadecuado procesamiento o mal manejo poscosecha del producto durante la pasteurización, o el almacenamiento de la miel por periodos largos con incrementos de temperatura. Bajos valores en actividad diastasa también están asociados con la alimentación artificial de las abejas con azúcares (Guler, et al., 2014). En general, los valores de la actividad diastasa de las mieles analizadas del Oriente y Suroeste estuvieron dentro de los valores establecidos en la norma colombiana (Ministerio de la protección social., 2010), aunque algunas muestras presentaron valores por debajo de 8 en la escala Schade.

Respecto al contenido de HMF, las normas nacionales (Ministerio de la protección social., 2010) e internacionales (Codex Alimentarius Commission, 2001) establecen valores máximos para mezclas de mieles y procesadas de 40 mg/kg, y hasta 60 mg/kg para mieles de clima tropical. Los valores promedio en las mieles analizadas de Oriente y Suroeste de Antioquia fueron 32 y 41 mg/kg, respectivamente. Posiblemente, los mayores valores encontrados en mieles del Suroeste se debe a que estas mieles presentan mayor acidez, lo cual facilita la deshidratación de los azúcares que dan origen al HMF. La formación del HMF se presenta a través de la reacción de Maillard, la cual es favorecida por la temperatura, el almacenamiento, el aw, el pH y la presencia de ácidos orgánicos en la muestra.

Los valores promedio de azúcares reductores, en las mieles del Oriente y Suroeste de Antioquia, fueron de 80,05 y 76,57 %, respectivamente. De acuerdo con los estándares del Codex Alimentarius Commission (2001) y la normatividad colombiana, la cantidad mínima de azúcares reductores en miel floral es del 60 %. El contenido de monosacáridos en la miel típicamente varía entre el 65 y el 80 % de los sólidos solubles totales de la miel; de ellos la fructosa y la glucosa representan un 38 y 31 %, respectivamente y, son los carbohidratos reductores más abundantes en la miel. Las mieles evaluadas presentaron contenidos de fructosa y glucosa alrededor del 33, 76 % y 33,46 %, para Oriente y Suroeste respectivamente; muy cercano al reporte de 32.27 y 31.21 % de Velásquez (2013).

Además del análisis de azúcares reductores, la cantidad de sacarosa es un parámetro que permite evaluar la madurez de la miel e identificar un manejo inapropiado de esta. Altos valores de sacarosa podrían indicar una adulteración con endulzantes provenientes de la caña de azúcar, o una alimentación artificial prolongada de las abejas con sacarosa donde este disacárido no alcanza a desdoblarse en glucosa y fructosa. Ya que las mieles del Oriente y Suroeste de Antioquia presentaron contenidos de sacarosa promedio de 5,00 y 5,61 %, respectivamente y en razón de que la normativa colombiana

establece valores máximos de 10%; puede decirse que las mieles analizadas se encuentran dentro del rango de normalidad. De otro lado, todas las mieles analizadas fueron levorotatorias con valores promedio de -8,46 y -6,18 para las mieles procedentes del Oriente y Suroeste de Antioquia, respectivamente. Dado que típicamente las mieles de origen floral son levógiras e indican que los contenidos de fructosa son mayores que los contenidos de glucosa (Bodganov, et al., 2004), podría decirse que no hay adulteración en las muestras estudiadas.

## 5.2. Análisis palinológico

Respecto de la palinología, el estudio muestra que la mayoría de mieles estudiadas provenientes del Suroeste fueron del tipo unifloral y las del Oriente fueron multiflorales. En las primeras los tipos polínicos dominantes fueron *Coffea arabica* y *Cecropia agustifolia* seguidos de *Mimosa*, *Fabaceae*, *Cordia*, *Mangifera indica* y *Acalypha*. Este resultado es apenas lógico si consideramos que el Suroeste de Antioquia está intensamente cultivado con café y normalmente los apiarios están cerca a los cultivos. En algunos casos como en Santa Bárbara, donde el cultivo de mango también es importante, es frecuente encontrar su polen en las muestras analizadas. En las mieles procedentes del Oriente antioqueño, el taxón más común fue *Asteraceae*, seguido de *Fabaceae*, *Solanaceae*, *Myrtaceae* (principalmente *Eucalyptus*), *Hypochaeris*, *Borreria* y *Hedyosmum*. La tradición papera y frijolera de esta región se ve reflejada en el contenido polínico de las muestras. En general, la mayoría de los tipos polínicos identificados reflejan la presencia de cultivos, arvenses relacionados con los mismos y algunos árboles asociados a cultivos o pertenecientes a parches de bosque que aún se conservan en la zona.

En un estudio realizado en el Suroeste antioqueño, que abarcó 113 municipios, por el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Antioquia (Fonnegra, 1992), se encontró que *Coffea arabica*, en todos los casos, fue la fuente más importante de polen; seguida por especies de *Asteraceae*, *Mimosa*, *Poaceae*, *Cyperaceae* y otras como *Piper spp*, *Schinus mole*, *Impatiens balsamina*, *Melastomataceae spp*, *Myrtaceae spp*, *Sida acuta*, *Aphelandra glabrata*, *Inga edulis*, *Sida rhombifolia* y *Solanum spp*. Un caso particular de este estudio fue el municipio de Santa Bárbara: De 12 apiarios estudiados, nueve tuvieron mieles uniflorales y 3 multiflorales; sin embargo, en todos los casos el polen más frecuente encontrado fue *Coffea arabica*. En nuestro estudio de 6 apiarios estudiados, uno fue multifloral, pero a diferencia de lo encontrado en 1992, *C. arabica* no fue el polen más frecuente. Aquí el dominio fue de *Cecropia* (4 apiarios), seguido de *Coffea arabica* (1 apiario) y *Mangifera indica* (1 apiario). En otro apiario estudiado en Santa Bárbara (Londoño, 1998), de 12 muestras analizadas solamente una fue del tipo unifloral con dominio de *Coffea arabica*, las demás fueron multiflorales siendo más frecuentes los granos de polen de *Coffea arabica*, *Eucalyptus sp*, *Mimosa spp*, *Asteraceae spp*, *Adenaria floribunda*, *Spondias mombin* y *Cecropia sp*.

Es claro que existen algunas coincidencias con nuestros resultados, pero también hay notables diferencias que pueden deberse, en primer lugar a que los apiarios estudiados no fueron los mismos (no hay georeferenciación), a la fuerte deforestación de la zona en los últimos 25 años, alteraciones de la vegetación por cambio climático, cambios en el uso de la tierra, tipo de vegetación presente en el gradiente altitudinal y tipo de miel analizada. Esta falta de homogeneidad en los resultados muestra que es necesario un estudio sistemático, en que un buen número de apiarios seleccionados, sean seguidos en el tiempo para así lograr generalizaciones más robustas. Aunque estudios similares ya han sido realizados en nuestro medio (apiario de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín), diferencias importantes se detectan de una época del año a la otra (Valencia & Velásquez, 2014). Esta variación implica que cada apiario debe tener su propio calendario apícola y que un análisis polínico particular de sus muestras de miel es necesario, incluso mes a mes, pues la floración de las plantas apícolas no ocurre simultáneamente sino de forma escalonada y el apicultor debe conocer con precisión, que plantas son las más visitadas por sus abejas en los alrededores inmediatos del apiario y en épocas diferentes del año.

En las mieles uniflorales provenientes del Suroeste con *Coffea arabica* como polen dominante, los granos que siguieron en frecuencia fueron los del tipo Aislado Importante (3-15 %) y en menor grado polen Secundario (16-45 %) y Aislado (menos de 3 %). El fuerte monocultivo de café en el sector estudiado, aunado a la deforestación intensa, puede explicar la ausencia de taxa secundarios y en cambio sí explicar el alto número de polen en bajas frecuencias provenientes de malezas, pequeños relictos de bosque o árboles usados como sombrío, caso de Nogal cafetero (*Cordia sp.*) y Guamo (*Inga sp.*).

En el caso de las multiflorales, predominantes en el Oriente antioqueño, uno o dos tipos de polen fueron Secundarios y el resto fue Aislado Importante y Aislado, siendo el porcentaje total de este último muy bajo. El resultado era de esperarse, ya que en el Oriente no hay un monocultivo tan marcado como en el Suroeste, con excepción de municipios paperos como La Unión o frijoleros como Carmen de Viboral. En el caso de la papa, esta condición de monocultivo, no se vio reflejado en el contenido polínico de la miel, en razón de que esta planta no es de valor apícola y la tradición en nuestro medio es a propagarla por medios vegetativos; además, sus cultivos tienden a ubicarse a altitudes mayores a 2500m, en donde hay menor presencia de apiarios. La presencia indiscriminada de polen de *Solanaceae* en varios apiarios se debe a la presencia de malezas de esta familia, cuyos granos de polen no son fáciles de diferenciar. Desafortunadamente no hay otros estudios similares en la zona que pudieran permitir una comparación gruesa con nuestros resultados, aunque sí hay estudios sobre los diferentes tipos de abejas que visitan los cultivos (Sepúlveda, 2013).

La riqueza total de polen de las muestras fue muy variable en ambas regiones, oscilando desde muy

pobres a muy ricas. Considerando que las mieles tropicales deberían tener al menos 100.000 granos de polen por cada 10 mL (Fonnegra, 1992), la mayoría de las mieles analizadas fueron relativamente pobres; sin embargo, dado que estas mieles se recibieron ya filtradas y en ese proceso se pierde mucho polen; es posible que un análisis de las mismas mieles sin filtrar, muestre un resultado más positivo. Un aspecto importante, ya que la zona del Suroeste es tradicionalmente una región con fuerte cultivo de café, y las mieles de la zona son dominadas por este elemento polínico, es posible certificar estas mieles como monoflorales, siempre y cuando los apiarios estén ubicados en el área de influencia de los cultivos.

## APÉNDICE: PLANCHAS FOTOGRÁFICAS PRINCIPALES TALLA

### A. PLANCHA 1

1. *Hedyosmum sp.* (Chlorantaceae)
2. *Hypochoeris sp.* (Asteraceae)
3. *Bromeliaceae*
4. *Brassicaceae*
5. *Myrtaceae*
6. *Viburnum sp.* (Adoxaceae)
7. *Borreria sp.* (Rubiaceae)
8. *Hypericum sp.* (Hypericaceae)
9. *Fabaceae*
10. *Cecropia peltata* (Moraceae)

### B. PLANCHA 2

1. *Euphorbia sp.* (Euphorbiaceae)
2. *Erythrina sp.* (Fabaceae)
3. *Tapirira sp.* (Anacardiaceae)
4. *Loranthaceae*
5. *Coffea arabica* (Rubiaceae)
6. *Cordia sp.* (Boraginaceae)
7. *Mangifera indica* (Anacardiaceae)



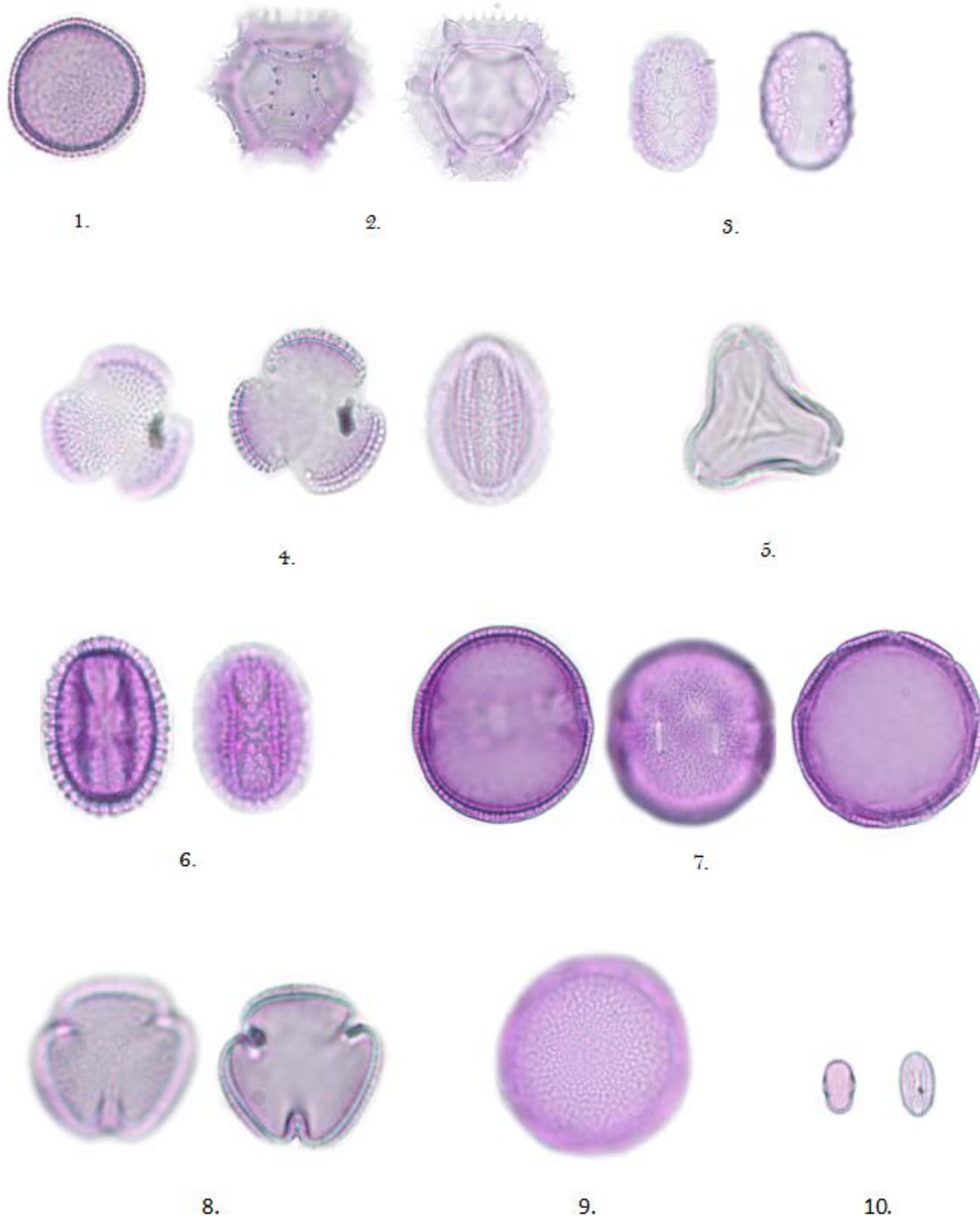


Figura 3: Plancha 1

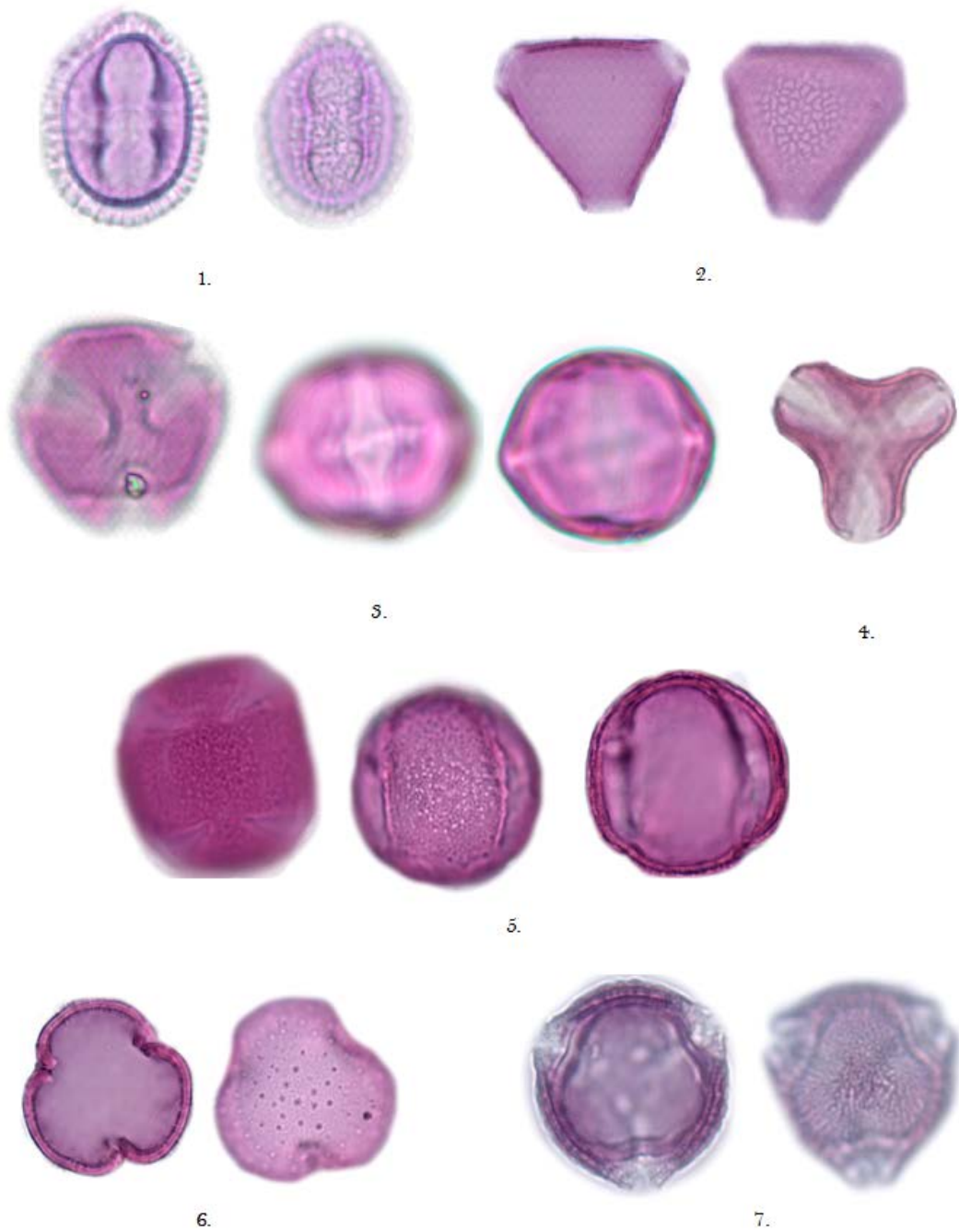


Figura 4: Plancha 2

## Referencias

- Aguilar, C. I. (1992). Contribución al estudio palinológico de la flora apícola del Suroeste Antioqueño. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 184p.
- Aguilar, C. & Velásquez C. (1992). Contribución al estudio palinológico de la flora apícola del Suroeste Antioqueño (I). *Revista del ICNE*, 4(1).
- Antioquia, G. de. (2014). Gobernación de Antioquia. Departamento Administrativo de Planeación. Anuario Estadístico de Antioquia, 2014 [Recurso electrónico] Medellín: Departamento Administrativo de Planeación, 2014.
- Baroni, M. V., Arrua, C., Nores, M. L., Fayé, P., Díaz, M. del P., Chiabrando, G. A. & Wunderlin, D. A. (2009). Composition of honey from Córdoba (Argentina): Assessment of North/South provenance by chemometrics. *Food Chemistry*, 114(2), 727–733. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.10.018>
- Bedoya, O. G. (2002). Granos de polen potencialmente alergénicos en el Valle de Aburrá. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Bogdanov, S.; Ruoff, K. & Persano, L. (2004). Physico-chemical methods for the characterisation of unifloral honeys: a review. *Apidologie*, 35(2004), 4–17. <https://doi.org/10.1051/apido:2004047>
- Bogdanov, S., Lüllmann, C., Martin, P., von der Ohe, W., Russmann, H., Vorwohl, G. & Vit, P. (1999). Honey quality and international regulatory standards: review by the International Honey commission. *Bee World*, 80(2), 61–69. <https://doi.org/10.1080/0005772X.1999.11099428>
- Callejas, R. (2011). Generalidades del departamento de Antioquia. Flora de Antioquia: catálogo de las plantas vasculares. vol. I. Introducción. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Chakir, A., Romane, A., Barbagianni, N. & Bartoli, D. (2011). Major and trace elements in different types of Moroccan honeys. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(4), 223–231.
- Codex Alimentarius Commission. (2001). Codex Alimentarius Commission Standards. *Codex Stan 12–1981*, 1–8.
- Código Alimentario Argentino. (1997). Capítulo X. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de [http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas\\_alimentos\\_caa.asp](http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp)
- Dainat, B., vanEngelsdorp, D. & Neumann, P. (2012). Colony collapse disorder in Europe. *Environmental Microbiology Reports*, 4(1), 123–125. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2011.00312.x>
- Dimi, F. & Ilze, Č. (2006). The criteria of honey quality and Its changes during storage and thermal treatment. *LLU Raksti*, 4, 73–78.

- Eardley, C. & Mansell, M. (1996). The natural occurrence of insect pollinators in an avocado orchard, 19(**September 1994**), 36–38.
- Erdtman, G. (1986). Pollen morphology and plant taxonomy: Angiosperms. The Netherlands. Brill, E. J.
- Escuredo, O., Míguez, M., Fernández-González, M. & Seijo, M. C. (2013). Nutritional value and antioxidant activity of honeys produced in a European Atlantic area. *Food Chemistry*, 138(**2–3**), 851–856. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.015>
- Espinal, C., Martínez, H., Santos, C. & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Observatorio de Agrociencias Colombia. (2006). La cadena de la abejas y la apicultura en Colombia. Retrieved from [https://bancayagro.files.wordpress.com/2008/06/caracterizacion\\_abejas2.pdf](https://bancayagro.files.wordpress.com/2008/06/caracterizacion_abejas2.pdf)
- Fonnegra, R. (1989). Introducción a la palinología. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Fonnegra, R. (1992). Análisis palinológico de la miel de abejas del Suroeste Antioqueño. Centro de Investigaciones Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín. 236p.
- Giraldo, C., Rodríguez, A., Chamorro, F. J., Obregón, D., Montoya, P., Ramírez, N. & Nates-Parra, G. (2011). Guía ilustrada de polen y plantas nativas visitadas por abejas. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de biología. Laboratorio de Investigaciones e Abejas (LABUN).
- Girón Vanderhuck, M. (1995). Análisis palinológico de la miel y la carga de polen colectada por *Apis mellifera* en el Suroeste de Antioquia, Colombia. *Boletín Museo Entomológico de la Universidad del Valle*, 3(**2**), 35–54.
- Grimm, E. C. (1987). CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers and Geosciences*, 13(**1**), 13–35. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(87\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(87)90022-7)
- Guler, A., Kocaokutgen, H., Garipoglu, A. V., Onder, H., Ekinci, D. & Biyik, S. (2014). Detection of adulterated honey produced by honeybee (*Apis mellifera L.*) colonies fed with different levels of commercial industrial sugar (C3 and C4 plants) syrups by the carbon isotope ratio analysis. *Food Chemistry*, 155, 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.033>
- Holdridge, L. R. (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 105, 267–368.
- Idárraga-Piedrahíta, Á., Ortiz, R. del C., Callejas Posada, R. & Merello, M. (2011). Flora de Antioquia. Catálogo de las plantas vasculares, vol. II. Listado de las Plantas Vasculares del departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia.

- Karabagias, I. K., Badeka, A., Kontakos, S., Karabournioti, S. & Kontominas, M. G. (2014). Characterisation and classification of Greek pine honeys according to their geographical origin based on volatiles, physicochemical parameters and chemometrics. *Food Chemistry*, 146, 548–557. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.105>
- Kisser, J. (1935). Bemerkungen zum einschulss in glycerin –gelatine. *Ztschr. F. Mikroskopie*, 51, 372–374.
- Laverde, J., Egea, L., Rodríguez, D. & Peña, J. (2010). Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de las abejas y la apicultura en Colombia con énfasis en miel de abejas. Bogotá: Ministerio de Agricultura Desarrollo Rural.
- Londoño, C. P. (1998). Análisis Palinológico de la miel de abejas del Suroeste Antioqueño Colombiano. Tesis Pregrado en Agronomía. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Louveaux, J., Maurizio, A. & Vorwohl, G. (1978). Methods of melissopalynology. *Bee World*, 5(3), 139–153. <https://doi.org/10.1080/0005772X.1978.11097714>
- Mendes, E., Brojo Proença, E., Ferreira, I. M. P. L. V. & Ferreira, M. (1998). Quality evaluation of Portuguese honey. *Carbohydrate Polymers*, 37(3), 219–223. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(98\)00063-0](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(98)00063-0)
- Ministerio de la protección social. (2010). Resolución 1057. Reglamento técnico sobre requisitos sanitarios que debe cumplir la miel de abejas para consumo humano. Bogotá: Ministerio de la Protección Social.
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural proyecto apoyo a alianzas. (2005). Apoyo productivo a la apicultura en 10 municipios del departamento de Sucre. Colombia.
- Moreno, J. E. & Devia, W. (1982). Estudio de origen botánico de la miel y el polen almacenado por *Apis mellifera*, *Melipona ebúrnea* y *Trigona* (*Tetragonisca*) *angustula* (*Hymenoptera: Apidae*), en el municipio de Arbelaez Cundinamarca, Colombia. Tesis pregrado en Biología. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- Nanda, V., Sarkar, B. C., Sharma, H. K. & Bawa, A. S. (2003). Physico-chemical properties and estimation of mineral content in honey produced from different plants in Northern India. *Journal of Food Composition and Analysis*, 16(5), 613–619. [https://doi.org/10.1016/S0889-1575\(03\) 00062-0](https://doi.org/10.1016/S0889-1575(03) 00062-0)
- Nates-Parra, G., Montoya, P. M., Chamorro, F. J., Ramírez, N., Giraldo, C. & Obregón, D. (2013). Geographical and botanical origin of *Apis mellifera* (API-DAE) honey in four Colombian departments. Origen geográfico y botánico de mieles de *Apis mellifera* (APIDAE) en cuatro departamentos de Colombia,

18(3), 427–438. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0.84887163491&partnerID=40&md5=1c877d455ab0fd9db15771fc0105a799>

Nates-Parra, G. (2005). Guía para el manejo de la abeja Angelita o virginita *Tetragona angustulata*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. (2000). William Horwitz.

Persano Oddo, L., Piazza, M. G., Sabatini, a G. & Accorti, M. (1995). Characterization of unifloral honeys. *Apidologie*, 26(6), 453–465. <https://doi.org/10.1051/apido:19950602>

Roubik, D. & Moreno, J. E. (1991). Pollen and Spores of Barro Colorado Island. (M. B. Garden, Ed.). Panamá.

Russmann, H. (1998). Hefen und Glycerin in Blütenhonigen–Nachweis einer Gärung oder einer abgestoppten Gärung. *Lebensmittelchemie*, 56, 116–117.

Sánchez, D. (1995). Trabajo de investigación sobre la abeja africanizada–fase II (calendarios apícolas para el Suroeste Antioqueño). *Miscelánea, Sociedad Colombiana de Entomología*, 32, 40p.

Sánchez, O. A., Castañeda, P. C., Muños, G. & Tellez, G. (2013). Aportes para el análisis del sector apícola Colombiano. *CienciAgro*, 2(4), 469–483.

Sanchez, V., Baeza, R., Ciappini, C., Zamora, M. C. & Chirife, J. (2010). Comparison between Karl Fischer and refractometric method for determination of water content in honey. *Food Control*, 21(3), 339–341. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.08.022>

Saxena, S., Gautam, S. & Sharma, A. (2010). Physical, biochemical and anti-oxidant properties of some Indian honeys. *Food Chemistry*, 118(2), 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.001>

Sepúlveda, P. (2013). Diversidad de abejas (*Hymenoptera: Apoidea: Anthophila*) en cultivos de papa (*Solanum tuberosum L.*) y su efecto en la Polinización. Tesis de Doctorado en Ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Suescún, L. & Vit, P. (2008). Control de calidad de la miel de abejas producida como propuesta para un proyecto de servicio comunitario obligatorio. *Fuerza Farmacéutica*, I, 6–15.

Terrab, A., Recamales, A. F., González–Miret, M. L. & Heredia, F. J. (2005). Contribution to the study of avocado honeys by their mineral contents using inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Food Chemistry*, 92(2), 305–309. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.07.033>

- Ulloa, J. A., Mondragón, P. M., Rodríguez, R., Reséndiz, J. A. & Rosas-Ulloa, P. (2010). La miel de abeja y su importancia. *Revista Fuente*, 2(4), 11–18.
- Valencia, C. & Velásquez, C. (2014). Caracterización palinológica de mieles del apiario del Laboratorio de Investigaciones Melitológicas y Apícolas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 3(1), 19–40.
- Vásquez, C. L. (2010). Caracterización de mieles de San Pedro de Atacama basada en análisis físicos, químicos y melisopalínológicos. Tesis pregrado Licenciado en Biología. Universidad Austral de Chile.
- Velásquez, C. A. (1999). Atlas palinológico de la flora vascular paramuna de Colombia: *Angiospermae*. Medellín, Antioquia: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Velásquez, C. & Rangel-ch, O. (1995). Atlas palinológico de la flora vascular del Páramo I. Las familias más ricas en especies. *Caldasia*, 17(82–85), 509–567.
- Velásquez, C. A. (2004). Paleoecología de alta resolución de Holoceno tardío en el páramo de Frontino-Antioquia. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Velásquez Giraldo, A. V. (2013). Caracterización físico-química y microbiológica de la miel de *Apis mellifera* sp. del Suroeste de Antioquia, Colombia. *Ingeniería y Ciencia – Ing.cienc.*, 9 (18), 61–74. Recuperado de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/1843>
- Von Der, W., Persano, L., Piana, M., Morlot, M. & Martin, P. (2004). Harmonized methods of melissopalynology. *Apidologie*, 35, S18–S25. <https://doi.org/10.1051/apido:2004050>
- Yücel, Y. & Sultanoğlu, P. (2013). Characterization of honeys from Hatay Region by their physicochemical properties combined with chemometrics. *Food Bioscience*, 1, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2013.02.001>
- Zamora, O., Domínguez, R., Alaniz-Gutiérrez, L. & Quezada-Ehan, J. J. G. (2008). Frequency of European and African-derived morphotypes and haplotypes in colonies of honey bees (*Apis mellifera*) from NW México. *Apidologie*, 39, 388–396. <https://doi.org/10.1051/apido:2008016>
- Zandamela Mungói, E. M. F. (2008). Caracterización físico-química y evaluación sanitaria de la miel de mozambique. Tesis de Doctorado en Veterinaria. Universidad Autónoma de Barcelona.

# PROGRAMA EN CÓDIGO ABIERTO PARA EL ANÁLISIS BIDIMENSIONAL DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR EL MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE<sup>a</sup>

## OPEN CODE PROGRAM FOR THE BIDIMENSIONAL ANALYSIS OF SLOPES' STABILITY BY THE EQUILIBRIUM METHOD

LUDGER O. SUÁREZ-BURGOA<sup>b</sup>, EXNEYDER A. MONTOYA ARAQUE<sup>c</sup>

Recibido 05-09-2016, aceptado 20-12-2016, versión final 28-12-2016.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** El artículo realiza una recopilación sobre los desarrollos pasados en la programación computacional referente al análisis de estabilidad de taludes aplicada a la geotecnia. Luego, el artículo presenta el programa desarrollado por los autores, que posibilita resolver problemas de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite mediante las soluciones de Fellenius y de Bishop usando PYTHON3<sup>®</sup>. El programa consiste de 22 funciones procedimentales independientes, que como conjunto forma un sistema anidado que posibilita correr el programa completo; todo esto ayudado por una interfaz gráfica de usuario que se corre desde la terminal. Los resultados se presentan de forma gráfica. Finalmente, el artículo coloca algunos ejemplos y validaciones. Se puede concluir que el programa es en principio académico porque no presenta la solución general; pero debido a que es un código abierto se puede usar en futuras implementaciones inclusive las generales.

**PALABRAS CLAVE:** código fuente libre, análisis de estabilidad de taludes, método de equilibrio límite, método de Bishop.

**ABSTRACT:** This article makes a recopilation about the past developments in computer programming in regard to the analysis of slope stability applied to geotechnics. After that, the article presents the computer program developed by the authors which allows to solve slope stability problems under the method of limit equilibrium with the solutions proposed by Fellenius and Bishop using PYTHON3<sup>®</sup>. The program consist of 22 procedural independent functions, which as a set form a nested system which allow to run the complete analysis; all of these helped by a graphical user interfase run from the terminal. Results are presented graphically. Finally, this article presents some examples and validations. We can conclude that the program is in principle for academic uses because it does not solve the genral solution; but because it is an open source

<sup>a</sup>Suárez-Burgoa, L. O. & Montoya Araque, E. A. (2016). Programa en código abierto para el análisis bidimensional de estabilidad de taludes por el método de equilibrio. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 88–104. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n2.59914>

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, [losuarezb@unal.edu.co](mailto:losuarezb@unal.edu.co).

<sup>c</sup>Departamento de Geociencias, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, [eamontoyaa@unal.edu.co](mailto:eamontoyaa@unal.edu.co).



code it can be used for future implementations inclusive the general ones.

**KEYWORDS:** free source code, slope stability analysis, limit equilibrium method, Bishop method.

## 1. INTRODUCCIÓN

La forma de resolver los problemas de análisis bidimensional (2D) de estabilidad de taludes (AET) por el método de equilibrio límite (MEL) en sus versiones originales (*i.e.* hoy en día versiones clásicas) se mantienen prácticamente inalterada; por tanto, es posible afirmar que lo único que ha cambiado es el modo cómo se resuelve el problema a través de la creación de un código computacional, y cómo aquel código interactúa con el usuario.

La primera implementación computacional del método de equilibrio para la estabilidad de taludes se puede determinar con el desarrollo obtenido por Bishop & Morgenstern (1960).

Pese a lo anterior, hoy en día —después de 50 años del creado el primer código para este fin— la comunidad de usuarios de esta herramienta tienen una libertad limitada de emplear algún código abierto que realice tal tarea, bien sea porque no existe como código abierto, porque éste si existe pero presenta problemas de incompatibilidad con los diversos sistemas operativos o porque no está acompañado de un mecanismo que facilite la interacción con el usuario que no simpatiza de ejecutar directamente desde la consola. Esto obliga en gran parte a buscar apoyo en códigos cerrados y/o comerciales; inclusive recurriendo a la piratería de éstos.

La lista de programas de computación de código cerrado para el análisis de taludes bidimensional por el método de equilibrio límite (2D-AET-MEL) es amplia, en comparación de la carencia de programas bajo la modalidad de código abierto. Esta situación es desventajosa debido a que impide la transferencia de conocimiento y fomenta la dependencia tecnológica con los desarrolladores de software privado y privativo.

En las siguientes secciones se presenta el *programa* denominado pyCSS<sup>®</sup> (del Inglés *circular slope stability pyprogram*). Éste fue desarrollado a partir de 22 funciones del lenguaje PYTHON3<sup>®</sup> en su versión 3.x, más dos módulos del mismo lenguaje con los que se ejecuta vía archivo de lotes desde la consola, o vía interfaz gráfica. También, se hace un listado de las capacidades y limitaciones del mismo para finalmente presentar los resultados del uso de éste con algunos ejemplos que validan su funcionalidad.

## 2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR COMPUTADOR

La conceptualización de modelar un deslizamiento a través de la dinámica de un cuerpo rígido cilíndrico sobre una base que encaja el mismo se formuló a principios del siglo XX (Pettersen 1916 citado por Steward, et al. (2011), Rendulic 1935 y Fellenius 1939 citado por Creager, et al. (1939)); sin embargo, los cálculos eran tediosos y largos porque se los hacía de forma manual. Pese a esta limitación, se reflejó gran aceptación en la ingeniería, tal como se puede apreciar en los diversos artículos presentados en el Segundo Congreso Internacional de Grandes Presas en 1936 (Ehrenberg, 1936; Fellenius, 1936; Frontard, 1936; Jáky, 1936; May & Brahtz, 1936).

La tarea para el cálculo manual fue acelerada con la elaboración de ábacos de cálculo presentados por Terzaghi (1936) y Taylor (1937) (consulte también a Baker (2003) y Steward, et al. (2011)), y posteriormente mejorados con la introducción del concepto de *coeficientes de estabilidad* y los ábacos presentados por Bishop & Morgenstern (1960) y Hoek & Bray (1977).

Sólo a finales de los años sesenta del siglo pasado se logró crear un programa computacional de análisis de estabilidad de taludes para los métodos más comunes de aquel entonces, que se resumían en el método de Bishop (1955) y el método de Janbu (1954). En aquel tiempo, estos programas fueron considerados como los más complicados que se hayan escrito para un computador para tal fin (Bromhead, 1978; Morgenstern & Price, 1965; Morgenstern & Price, 1967).

Con el desarrollo de la informática en esa misma época, el 2D-AET-MEL fue reformulado para que éste se use en forma automatizada, y sea aplicable a taludes con cualquier forma de superficie de deslizamiento. A razón de esta nueva formulación se presentaron casi en forma simultánea dos métodos que hoy en día se los conoce como el método de Bishop y el método de Janbu, y ambos bajo el principio del *método de las dovelas*.

La cronología de los desarrollos tempranos entre los métodos de Bishop y Janbu es confusa, y siempre fue motivo de discusión porque no se tiene absoluta certeza de quién fue el primero en presentar el método de dovelas; pero pareciera que fue del siguiente modo (Simons, et al., 2001).

1. El artículo de Bishop fue presentado en una conferencia un año antes de que apareciera impreso. Investigaciones separadas permitieron a Janbu y Kenney llegar a un mismo resultado (Kenney trabajando bajo la dirección de Bishop en la Escuela Imperial de Londres).
2. Janbu publicó primero, en 1955, pero en una forma incorrecta, y la tesis de Kenney apareció un año después.

3. Posteriormente, Janbu republicó la forma correcta de las ecuaciones, pero en una forma relativamente inaccesible para los lectores de habla inglesa.
4. En ese lapso, Bishop convenció a Price, que fue uno de los autores del primer programa computacional de análisis de estabilidad (Little & Price, 1958), de probar las ecuaciones del programa de Kenney para deslizamientos no circulares.

Fue a partir de la investigación de Little & Price (1958) donde se encontró que las ecuaciones básicas conducían a otros problemas numéricos cuando eran evaluadas para una alta precisión, debido a que no se obtenía una suficiente precisión como para definir la estabilidad de un deslizamiento [*i.e.* con alrededor de 5% como el mejor valor]: él y Morgenstern (Morgenstern & Price, 1965; Morgenstern & Price, 1967) desarrollaron entonces un método más sofisticado (también en el Colegio Imperial de Londres) que hoy en día se lo conoce como el método de Morgenstern & Price. Esta vez, los autores estaban seguros de haber superado la complejidad en los cálculos y estaban listos para difundir el uso del método, y más aún debido a la mayor disponibilidad de las computadoras en el medio (Simons, et al., 2001).

Janbu desarrolló su método después, y publicó su procedimiento generalizado de dovelas en 1973, y un número más de métodos también aparecieron publicados a lo largo del fin de la década de los 60 y 70 del siglo XX.

A partir de estos primeros logros se tienen hasta la actualidad un innumerable número de desarrollos orientados a resolver el problema por medio de computadoras, que fueron publicados en estos años en revistas indexadas. Con base a una muestra de 115 artículos publicados en revistas indexadas de alto impacto referente a temas de AET-LEM entre los años 1965 hasta 2010, se observó que el número de publicaciones fue creciendo en cantidad cada 5 años desde 1965 hasta un máximo en el periodo de 1980 a 1985; y a partir de éste, la cantidad de publicaciones fue decreciendo paulatinamente hasta el año 2000. Sin embargo, entre los años 2000 a 2005 se observó nuevamente un incremento en la cantidad de artículos publicados, esta vez tratando el tema del AET-LEM para tres dimensiones (3D), el cual siguió una tendencia en descenso en el segundo lustro (*i.e.* entre el 2005 y 2010).

### 3. PROGRAMA DESARROLLADO

El método de equilibrio límite (MEL) implica realizar un análisis de estabilidad del macizo que tendrá que deslizarse a lo largo de una superficie de falla sin considerar las deformaciones y las distorsiones que ello implica. Esta gran limitación era tolerada cuando se aplicaba el método en su inicio (*i.e.* hasta los años 90 del siglo pasado); sin embargo, con la aplicación de los métodos de análisis de estabilidad a través del análisis esfuerzo–deformación de la masa del macizo por algún

método numérico (*e.g.* el método de elementos finitos) el MEL se convirtió sólo en una herramienta académica; aseveración que aún es poco aceptada por ingenieros geotecnistas tradicionalistas y empresas consultoras en geotecnia con alta carga analítica, poco tiempo y escaso personal especialista.

El desarrollo de ecuaciones mostrado en la anterior sección se ha introducido dentro de un código en el lenguaje de programación PYTHON3<sup>®</sup>, que en conjunto definen un programa que se ha denominado pyCSS<sup>®</sup>, con el cual se puede realizar el 2D-AET-MEL.

Para lograr el presente desarrollo computacional se le dió gran importancia en crear un *marco geométrico* lo suficientemente solvente para poder luego generalizar el método de las dovelas. A este marco se lo entiende como aquellas funciones que permiten definir la geometría de la superficie del talud, el contorno donde abarca el geomaterial, la geometría del nivel freático, la geometría de la superficie de falla y la forma cómo ésta se divide en dovelas en función de la geometría de la superficie del talud y superficie del nivel freático. Luego de tener definido el número de dovelas, se logra agrupar toda la información en cada una de ellas, con el fin de ser usada durante la solución para obtener el factor de seguridad contra el deslizamiento.

El paradigma de programación usado para el marco geométrico del presente desarrollo fue el de *programación estructurada*, donde se deben usar únicamente tres estructuras: secuencia, selección e iteración; considerando innecesario el uso de la instrucción de transferencia incondicional (*i.e.* básicamente el comando `goto`).

En total se desarrollaron 22 funciones haciendo un total de 148,1 kB de espacio, más un archivo de lotes (*i.e. script*) para hacer más fácil la relación del código con el usuario y un archivo que convoca a una sencilla interfaz gráfica que hace aún más intuitiva la ejecución del programa para algunos usuarios.

De las 22 funciones, se gastaron 19 (*i.e.* 103,4 kB) solo para desarrollar el marco geométrico del método, una sola función (*i.e.* 4,1 kB) de visualización y dos funciones (*i.e.* 40,6 bytes) que permiten la convergencia de la solución del problema (Tabla 1).

En lo que respecta al grupo de funciones, las más importantes resultan ser `automaticslipcircles.py` y `onlyonecircle.py`, que obtienen la solución para hallar la superficie crítica y para evaluar una única superficie definida; sin embargo, resulta necesario que el contexto del problema sea definido en todas las funciones del marco geométrico; por tanto resulta también importante tener un solvente marco geométrico.

A continuación se mencionan las principales variables de entrada que se usan para definir el marco introductorio, geométrico y geomecánico para la ejecución del programa; sin embargo, una des-

Tabla 1: Funciones destinadas para realizar distintas tareas.

Tarea Global	Nombres de las Funciones
Marco Geométrico	azimuthangle.py, circleby2ptsradius.py, create2dsegmentstructure.py, defineslipcircle.py, defineswatertable.py, divideslipintoslices.m extractplinefrom2pts.py, interatefbishopsimpsat.py, interateffelleniussat.py, materialboundary.py, obtainmaxdepthdist.py polyarea.py, reportslicestructurevalues.py, sliparcdiscretization.py, tangentlineatcirclept.py, terrainsurface.py, uniquenesswithtolerance.py, unitvector.py, vertprojection2pline.py,
Visualización	plotslice.py
Solución	automaticslipcircles.py y onlyonecircle.py

cripción más detallada de estas variables y otras más se encuentra en el manual del usuario del programa Suárez-Burgoa & Montoya Araque (2016).

Previo a la introducción de variables que definen la geometría y otros aspectos para la ejecución del programa, se debe definir la información básica de éste; para ello es necesario indicar:

- Nombre del proyecto `projectName`;
- Autor del proyecto `projectAuthor`;
- Fecha de ejecución del análisis `projectDate`.

Para definir el marco geométrico del problema, es necesario:

- Definir la geometría de la superficie del talud y profundidad del macizo con la variables:
  - Altura vertical del talud `slopeHeight`.
  - Pendiente del talud `slopeDip` dado por un vector  $1 \times 2$ , donde el primer término es una distancia horizontal y el segundo una distancia vertical.
  - Distancia horizontal de la corona del talud hacia el límite izquierdo del macizo `crownDist`.
  - Distancia horizontal de la pata del talud hacia el límite derecho del macizo `toeDist`.
- Definir la superficie del nivel freático a partir de la profundidad, respecto la línea horizontal que define la corona del talud `wtDepthAtCrown` y especificar si se va a considerar el talud parcialmente sumergido o si será coincidente con el talud `toeUnderWatertable`.
- Definir las siguientes variables cuando se evalúe una única superficie de falla circular:
  - Punto de la superficie de falla que corta la parte baja del talud `hztDistPointAtToeFromCrown`.
  - Punto de la superficie de falla que corta la parte alta del talud `hztDistPointAtCrownFromCrown`.

- Radio del círculo de la superficie de falla `slipRadius`.
- Especificar las siguientes variables cuando se evalúen múltiples superficies de falla circular con el fin de encontrar la superficie crítica:
  - Número de superficies que serán evaluadas `numCircles`.
  - Cantidad de incrementos en un radio inicial `radiusIncrement`.
  - Número de veces que un radio aumenta la cantidad anterior `numberIncrements`.
  - Máximo valor de  $f_s$  para mostrar en el diagrama de contornos.
- Número de dovelas a usar `numSlices=nDivs`.

Para definir las propiedades físicas del problema, se definen:

- Pesos unitarios del agua `waterUnitWeight` y del suelo (*i.e.* suelo seco) `materialUnitWeight`.
- Propiedades efectivas saturadas o secas (dependiendo del problema) del material:
  - Ángulo de fricción interna efectiva del material `frictionAngleGrad`.
  - Cohesión drenada efectiva del material `cohesion`.

Finalmente, para encontrar la convergencia del cálculo del método de Bishop simplificado se tiene que dar un valor del factor de seguridad inicial (*i.e.* un valor semilla `seedSafetyFactor`), el cual está programado para tomar aquel que se obtenga en primera instancia con el método de Fellenius; esto es fácilmente modificable para considerar otro valor inicial.

Las limitaciones de código, así inicialmente concebido, se listan a continuación:

- Es para taludes con un solo tipo de geometría estándar.
- Es para macizo de un solo material con parámetros últimos efectivos de resistencia seca o saturada. según el criterio de Mohr–Coulomb.
- El nivel freático es horizontal y no considera presiones intersticiales negativas;
- No tiene la opción de aplicación de fuerzas estabilizantes o desestabilizantes externas ni internas.
- Analiza problemas de taludes que miran hacia la derecha y de ocurrir un eventual deslizamiento el sentido del movimiento en masa tendría esta misma dirección (limitante sólo de comodidad visual).
- Obtiene la solución de Fellenius y de Bishop únicamente.

El código del archivo por lotes `finalModule.py` se muestra en el Apéndice 7, éste resulta ser una de las alternativas para que el programa interactúe con el usuario para hacer correr un ejemplo. Ese archivo define y resuelve un problema cuyo resultado se muestra en la Figura 1. De manera similar se pudo proceder para evaluar múltiples superficies y encontrar aquella que sea crítica.

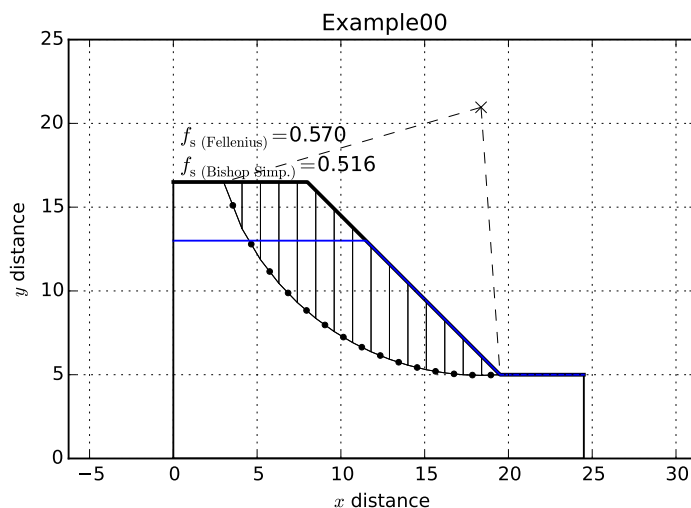


Figura 1: Problema ejemplo para encontrar el factor de seguridad contra la estabilidad con el código elaborado. Fuente: elaboración propia.

La otra alternativa para ejecutar cualquiera de las dos modalidades mencionadas es vía interfaz gráfica que resulta ser más intuitiva para muchos usuarios; ésta se muestra en la Figura 2.

Un exhaustivo estudio podrá desarrollarse con el acceso del código que se puede obtener según se explica en el Apéndice 7.

## 4. ALGORITMO PARA LA BÚSQUEDA DE LA SUPERFICIE CRÍTICA

El programa `pyCSS`<sup>®</sup> incluye una función que posibilita determinar la superficie de falla crítica (*i.e.* aquella cuyo valor de factor de seguridad es el más bajo para un talud definido), ésta lleva el nombre de `automaticslipcircles.py`. Los pasos a seguir para lograr el cálculo son los siguientes.

1. Definir la superficie del talud y el nivel freático si es que se desea (Figura 3(a)).
2. Seleccionar un par de puntos aleatorios sobre la superficie del talud (Figura 3(b)).

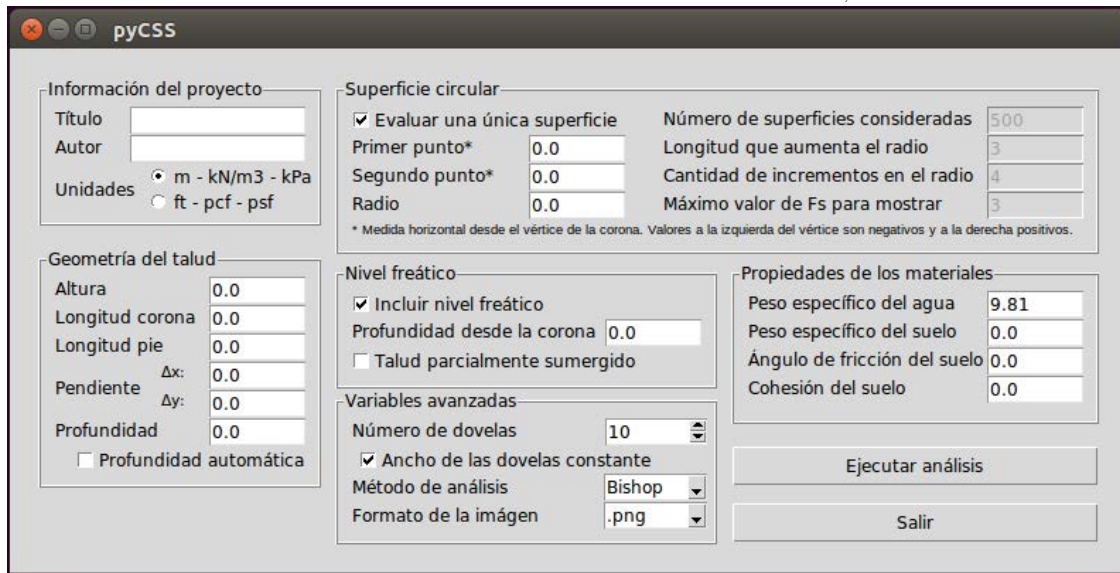


Figura 2: Vista de la interfaz gráfica del programa pyCSS<sup>®</sup> ejecutada en UBUNTU<sup>®</sup> Fuente: Elaboración propia.

3. Encontrar el círculo con el radio mínimo posible que pase por el par de puntos aleatorios y evaluar esta superficie (Figura 3(c)).
4. Aumentar el radio inicial una magnitud  $l$  introducida por el usuario para el mismo par de puntos aleatorios.
5. Verificar que la superficie circular no corte la cara y la pata del talud simultáneamente y corregirla sea el caso para proceder a evaluar la nueva superficie como se observa en la Figura 3(d). La corrección consiste en descartar la porción de la superficie circular que no se encuentra dentro de la masa de suelo, conservando el radio intacto.
6. Repetir los dos ítem anteriores  $n$  veces, donde  $n$  también lo introduce el usuario hasta lograr un esquema como el que se muestra en la Figura 3(e).
7. Definir un nuevo par de puntos aleatorios sobre la superficie y repetir todo el ciclo desde el numeral 2. Esta cantidad de puntos aleatorios es función de la cantidad de superficies que se desean evaluar, lo cual es introducido por el usuario.

Del procedimiento iterativo anterior se obtiene una nube de puntos asociados a todos los centros de las superficies circulares evaluadas, donde cada uno también está ligado a un valor de factor de seguridad. De este modo, teniendo esta distribución espacial bidimensional de puntos, es posible interpolar los valores de factor de seguridad para visualizar la distribución de los mismos.

Con la visualización de la interpolación mencionada se podrá distinguir la región donde se encontraría el mínimo valor, aunque internamente la función se encarga de buscarlo y mostrárselo al



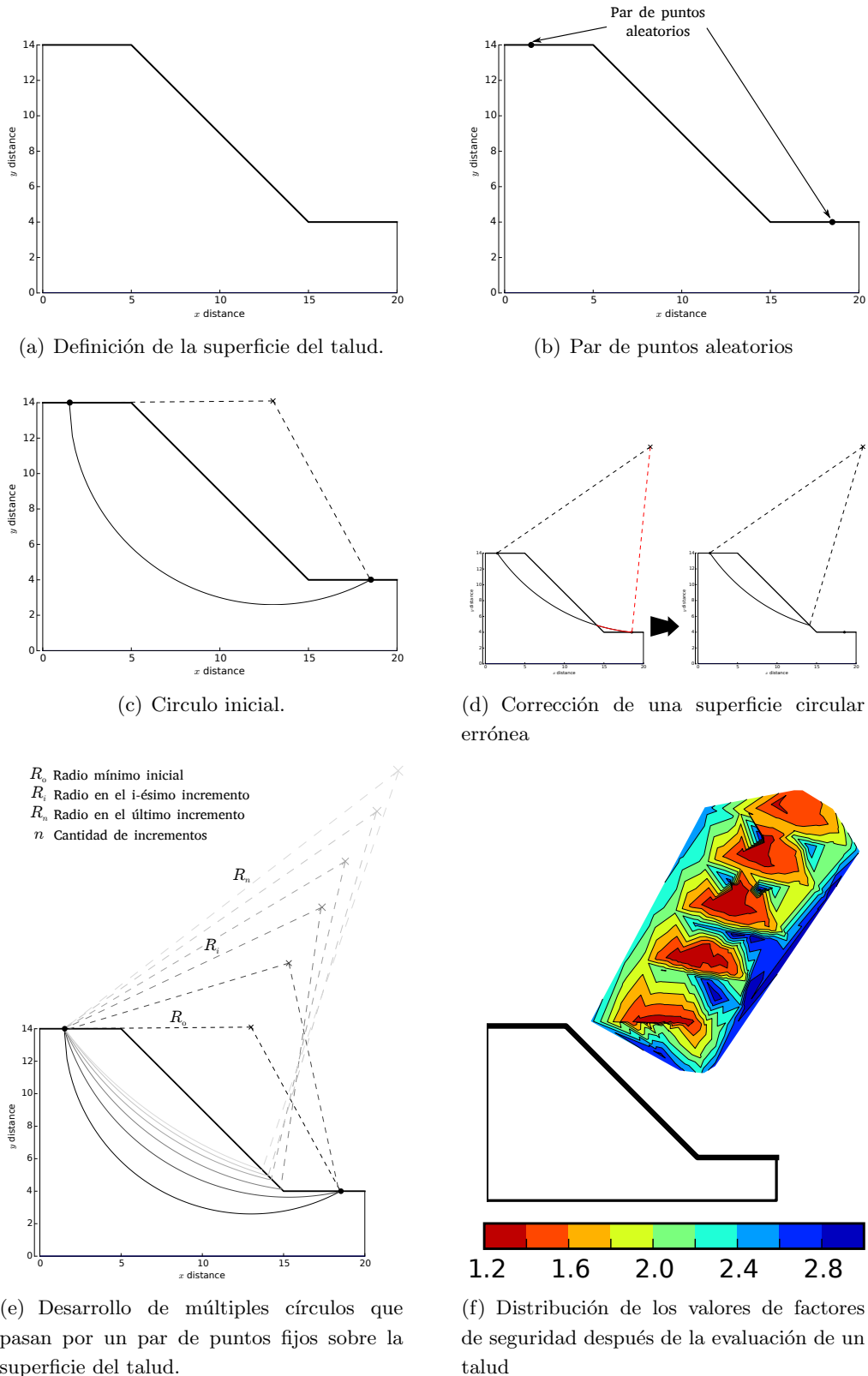


Figura 3: Algoritmo de la función que encuentra la superficie crítica. Fuente: Elaboración propia.

usuario. Cabe mencionar, que hay la posibilidad de encontrar una distribución con varios mínimos locales (como se menciona en varios autores en el artículo de Cheng & Lau (2008)), sin embargo, el mínimo global será el que defina la superficie de falla crítica.

## 5. EJEMPLOS PARA VALIDACIÓN

Para la validación del programa pyCSS<sup>®</sup> se procedió a comparar los resultados obtenidos de los valores de factor de seguridad respecto a cinco elementos ya validados, estos incluyen dos ejemplos extraídos de revistas internacionales, un manual directriz norteamericano y el paralelo respecto a dos ejemplos cualesquiera ejecutados en *software* comercial ampliamente aceptado y usado en la industria y la academia, tal y como sigue.

1. Ejemplo 2 (figura 6) del artículo de Chang (1992).
2. Cálculo manual del ejemplo de la figura 4-3 del manual de U. S. Army Corps of Engineers (2003), siguiendo los lineamientos planteados por ellos mismos.
3. Ejemplo 1 (figura 2, sección 4.1) del artículo de Zhao, et al. (2014).
4. Igual que el anterior, adicionando nivel freático, evaluado en el software comercial SLIDE<sup>®</sup>.
5. Igual que el anterior, considerando el talud parcialmente sumergido.

Las comparaciones se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Comparación de los resultados obtenidos entre pyCSS<sup>®</sup> y las otras fuentes.

Val.	pyCSS		Otra fuente		Referencia	Error absoluto $e_{abs}$	
	Fellenius	Bishop Simp.	Fellenius	Bishop Simp.		Fellenius	Bishop Simp.
01	1.944	2.096	1.928	2.080	Chang (1992)	1.6 %	1.6 %
02	2.126	2.250	2.133	2.302	U. S. Army Corps of Engineers (2003)	0.7 %	5.2 %
03	0.967	0.992	0.967	0.992	Zhao, et al. (2014)	0.0 %	0.0 %
04	0.750	0.736	0.749	0.736	SLIDE <sup>®</sup>	0.1 %	0.0 %
05	0.962	1.004	0.938	0.966	SLIDE <sup>®</sup>	2.4 %	3.8 %

Se puede observar que las diferencias de valores están por el orden del 5 % o menos, lo que demuestra que el código está desempeñando correctamente los cálculos.

## 6. DISCUSIÓN

Los métodos manuales se aplicaron mucho antes de la llegada de las computadoras, las hojas de cálculo y los programas de computación de la actualidad.

Pese a que los métodos clásicos fueron automatizados por procesos computacionales —como el presente caso— o se han concebido nuevos métodos, todavía es responsabilidad del usuario (*i.e.* estudiante y/o ingeniero de diseño) el asegurar que las propiedades que definen el modelo (*i.e.* las entradas) y las predicciones de la estabilidad (*i.e.* la salida, reflejada en el valor del factor de seguridad contra el deslizamiento) pasen por una verificación. Inclusive, es un deber explícito del usuario de verificar a mano las salidas que dan los programas de computación; es decir, en una inmediata y transparente manera sin la presencia de la *caja negra* del *misterioso programa*.

Bajo un concepto de caja negra, no es posible revisar los pasos que llevaron a la obtención de un determinado resultado. En el caso de un programa con código abierto —debido a que es libre— el concepto de la *caja negra* no aplica; por tanto, este código puede ser empleado como *herramienta manual* de verificación, cuando haya pasado por una serie de pruebas y depuración (*i.e.* proceso de *debugging*).

El presente programa posibilita potenciales para que la comunidad interesada desarrolle una herramienta con la solución general abierta (expuesta) para el AET-MEL.

## 7. CONCLUSIONES

Se logró el primer paso de crear un código computacional simple con fines académicos, pero con gran potencialidad de que éste sea el marco de partida para que el mismo crezca con la ayuda de la comunidad científica adscrita a la filosofía planteada de software libre.

De este modo se puede esperar que este programa se convierta en un programa de mayores alcances para el aprovechamiento profesional de la región (*i.e.* Sudamérica). Este aspecto será un estímulo permanente para la apropiación de las nuevas tecnologías y la innovación (da Rosa & Heinz, 2007).

Los siguientes pasos a seguir con la comunidad voluntaria para el desarrollo del presente código son: crear el entorno geométrico más generalizado y bajo el paradigma de *programación orientada a objetos*; generalizar el método para cualquier geometría de talud, nivel freático, capas de materiales y superficie de deslizamiento; generalizar el cálculo del factor de seguridad para los demás métodos del 2D-MEL que existen en la literatura; crear un entorno gráfico mucho más amigable para el

usuario y que sea multiplataforma (i.e. que pueda ser compilado en cualquier sistema operativo).

## APÉNDICE A

### A. LISTADO DEL PROGRAMA DE LOTES

Este programa por lotes es un ejemplo del empleo de las funciones desarrolladas en este trabajo. El usuario puede copiar el siguiente código en cualquier editor de texto y ejecutarlo desde PYTHON3<sup>®</sup>, bien sea directamente desde la consola, desde un entorno gráfico creado para PYTHON3<sup>®</sup>, o introducir los valores a la interfaz gráfica de pyCSS<sup>®</sup>. En cualquiera de los tres casos, el manual del usuario Suárez-Burgoa & Montoya Araque (2016) , instruye paso a paso el procedimiento para lograr una ejecución satisfactoria del programa y/o sus funciones.

```

''' Description.
This is a minimal module in order to perform a circular arc slope stability
analysis for a trial example.
'''

#-----#
### Add functions directory ###
import sys
sys.path += ['./functions']

#-----#
## Modules/Functions import
import numpy as np
import time

from onlyonecircle import onlyonecircle

#-----#
### Project data ###
projectName = 'Example00'
projectAuthor = 'Ludger O. Suarez-Burgoa and Exneyder A. Montoya Araque'
projectDate = time.strftime("%d/%m/%y")

#-----#
### Define inputs ###
# The slope geometry #
slopeHeight = [11.5, 'm']
slopeDip = np.array([1, 1])
crownDist = [8, 'm']
toeDist = [5, 'm']
wantAutomaticToeDepth = False
if wantAutomaticToeDepth == True:
toeDepth = ['automatic toe Depth']
else:
toeDepth = [5, 'm']
# The slip arc-circle #
wantEvaluateOnlyOneSurface = False

```

```
if wantEvaluateOnlyOneSurface == True:
hztDistPointAtCrownFromCrown = [-5, 'm']
hztDistPointAtToeFromCrown = [11.5, 'm']
slipRadius = [16, 'm']
else:
numCircles = 1000
radiusIncrement = [5, 'm']
numberIncrements = 5
maxFsValueCont = 3
# Water table depth #
wantWatertable = True
if wantWatertable == True:
wtDepthAtCrown = [3.5, 'm']
else:
wtDepthAtCrown = ['No watertable']
toeUnderWatertable = False
# Materials properties #
waterUnitWeight = [9.8, 'kN/m3']
materialUnitWeight = [17, 'kN/m3']
frictionAngleGrad = [25, 'degrees']
cohesion = [4.5, 'kPa']

### Advanced inputs ###
# Want divide the slip surface in constant width slices? #
wantConstSliceWidthTrue = True
# Number of discretizations of slip surface. #
numSlices = 15
# Number of discretizations of circular arcs. #
nDivs = numSlices
# Select the method to calculate the safety factor ['Flns', 'Bshp' or 'Allm'] #
methodString = 'Allm'
# Select the output format image ['.eps', '.jpeg', '.jpg', '.pdf', '.pgf', \
# '.png', '.ps', '.raw', '.rgba', '.svg', '.svgz', '.tif', '.tiff']. #
outputFormatImg = '.pdf'

#-----#
# Operations for only one slip surface #
if wantEvaluateOnlyOneSurface == True:
msg = onyonecircle(projectName, projectAuthor, projectDate, slopeHeight, \
slopeDip, crownDist, toeDist, wantAutomaticToeDepth, toeDepth, \
hztDistPointAtCrownFromCrown, hztDistPointAtToeFromCrown, slipRadius, \
wantWatertable, wtDepthAtCrown, toeUnderWatertable, waterUnitWeight, \
materialUnitWeight, frictionAngleGrad, cohesion, wantConstSliceWidthTrue, \
numSlices, nDivs, methodString, outputFormatImg)

#-----#
# Operations for multiple slip surface #
else:
automaticslipcircles(projectName, projectAuthor, projectDate, slopeHeight, \
slopeDip, crownDist, toeDist, wantAutomaticToeDepth, toeDepth, numCircles, \
radiusIncrement, numberIncrements, maxFsValueCont, wantWatertable, \
wtDepthAtCrown, toeUnderWatertable, waterUnitWeight, materialUnitWeight, \
frictionAngleGrad, cohesion, wantConstSliceWidthTrue, numSlices, nDivs, \
methodString, outputFormatImg)
```

## B. ALOJAMIENTO Y DESARROLLO DEL CÓDIGO

El desarrollo y administración del presente código está alojado en la plataforma para el hospedaje de códigos, que permite la colaboración y control de versiones, denominada *GitHub* en el enlace <https://github.com/eamontoyaa/pyCSS>. Allí podrá obtener un archivo comprimido `.zip` que contiene el programa `pyCSS`<sup>®</sup> y el respectivo manual del usuario en formato `.pdf`. A través de este sitio se hace las respectivas descargas, aportes y peticiones de participación en el proyecto.

## C. LICENCIA DEL PROGRAMA

Los autores son miembros del *Semillero de Geología Matemática y Computacional* parte del Grupo de Investigación en Geotecnia de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín.

Copyright © 2016 en adelante, Universidad Nacional de Colombia.

Copyright © 2016 en adelante, Ludger O. Suárez Burgoa y Exneyder Andrés Montoya Araque.

Este código abierto es software libre: usted puede redistribuirlo y/o modificarlo bajo los términos de la Licencia BSD, ya sea la versión 2 de dicha Licencia, o (a su elección) cualquier versión posterior. Usted encontrará una copia de la Licencia BSD en los archivos del código, consulte detalles en <https://opensource.org/licenses/BSD-2-Clause> .

## D. DESCARGO DE RESPONSABILIDADES

El presente código computacional se distribuye con la esperanza de que sea útil, pero sin ninguna garantía; sin la garantía implícita en su comercialización o idoneidad para un propósito particular. Consulte la <https://opensource.org/licenses/BSD-2-Clause> para mayores detalles.

## Referencias

- Baker, R. (2003). A second look at Taylor's stability chart. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1102–1108.
- Bishop, A. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5, 7–17.
- Bishop, A. & Morgenstern, N. (1960). Stability coefficients for earth slopes. *Géotechnique*, 10, 129–150.
- Bromhead, E. (1978). Large landslides in London clay at Herne B, Kent. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 11, 291–304.

- Chang, C. (1992). Discrete elements method for slope stability analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(12), 1889–1905.
- Cheng, Y. M. & Lau, C. K. (2008). Slope stability analysis and stabilization: new methods and insight (1 ed.). New York: Routledge.
- Creager, W., Barnes, D., Philippe, R. & Plummer, F. (1939). Selected bibliography on soil mechanics. Manuals of Engineering Practice, 18 18, American Society of Civil Engineers, New York. Prepared by the committee of the soil mechanics and foundation division on soil mechanics bibliography.
- da Rosa, F. & Heinz, F. (2007). Guía práctica sobre software libre: su selección y aplicación local en América Latina y el Caribe. Technical report, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Montevideo.
- Ehrenberg, J. (1936). Calculation of the stability of dams. In *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, 4, 331–386.
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. In *ICOLD (Ed.), Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, 4, 445–459.
- Frontard, J. (1936). Calculations on the stability of earth dams. In *ICOLD (Ed.), Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, 4, 288–293.
- Hoek, E. & Bray, J. (1977). Rock slope engineering (2 ed.). Institution of Mining and Metallurgy.
- Jáky, J. (1936). The stability of earth sloped. In *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics*, 2, 125–129.
- Janbu, N. (1954). Stability analysis of slopes with dimensionless parameters. *Soil Mechanics Series* 46, University of Harvard, Cambridge.
- Little, A. & Price, V. (1958). The use of an electronic computer for slope stability analysis. *Geotechnique*, 8(3), 113–120.
- May, D. & Brahtz, J. (1936). Proposed methods fo calculating the stability of earth dams. In *ICOLD (Ed.), Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, 4, 539–576.
- Morgenstern, N. & Price, V. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15, 79–93.
- Morgenstern, N. & Price, V. (1967). A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. *Computer Journal*, 9(4), 388–393.

- Simons, N., Menzies, B. & Matthews, M. (2001). A short course in soil and rock slope engineering (1 ed.). London: Thomas Telford.
- Steward, T., Sivakugan, N., Shukla, S. & Das, B. (2011). Taylor's slope stability charts revisited. *International Journal of Geomechanics*, 11(4), 348–352.
- Suárez-Burgoa, L. O. & Montoya Araque, E. A. (2016). Circular slope stability pyprogram (pyCSS). Programa de código abierto para el análisis de estabilidad de taludes en 2D, métodos de Fellenius y de Bishop. Manual del usuario. Universidad Nacional de Colombia.
- Taylor, D. (1937). Stability of earth slopes. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 24(3), 337–386. Reprinted in *Contributions to Soil Mechanics: 1925–1940*, Boston Society of Civil Engineers.
- Terzaghi, K. (1936). Critical height and factor of safety of slopes against sliding. In *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics* 1, 156–161.
- U. S. Army Corps of Engineers (2003). Engineering and Design. Slope Stability. Department of the Army.
- Zhao, Y., Tong, Z. Y. & Lü, Q. (2014). Slope stability analysis using slice-wise factor of safety. *Mathematical problems in engineering*, 6, 2014.



# USO DE LA TÉCNICA DE ALAMBRE CALIENTE PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE INFUSIONES DE CAFÉ ORGÁNICO Y CONVENCIONAL<sup>a</sup>

## USING HOT WIRE TECHNIQUE FOR MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY OF INFUSIONS OF ORGANIC AND CONVENTIONAL COFFEE

FERNANDO GORDILLO-DELGADO <sup>b</sup>, DIEGO F. VALENCIA-GRISALES <sup>b</sup>, JESÚS PLAZAS-SALDAÑA <sup>b</sup>

Recibido 04-11-2016, aceptado 28-12-2016, versión final 30-12-2016.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** Se implementó la técnica de alambre caliente (comúnmente llamada “hot-wire” por su traducción al inglés), un método versátil, de bajo costo y de alta precisión para la medición de la conductividad térmica de fluidos a través del aumento en la temperatura de un alambre que se introduce dentro del fluido y al que se le aplica entre sus extremos, de manera abrupta, una diferencia de potencial. El sistema se probó y calibró utilizando líquidos de conductividad bien conocida: agua, etilenglicol y glicerina. Este procedimiento se usó para medir la conductividad térmica de muestras de infusión de café orgánico y convencional. El mismo grado de tostión de los granos fue verificado con un colorímetro y la preparación se hizo por prensado de 22g del café en polvo en 110mL de agua. Los datos obtenidos se sometieron al Análisis de Varianza (ANOVA) y se confirmó que las diferencias de este parámetro termofísico en las dos muestras son significativas con un nivel de confianza de 95%. De esta forma, se comprobó que el valor de la conductividad térmica de la infusión de café permite diferenciar el café orgánico del convencional.

**PALABRAS CLAVE:** Conductividad térmica, alambre caliente, café orgánico, ANOVA.

**ABSTRACT:** The technique of hot wire, a versatile method of low cost and high accuracy for measuring the thermal conductivity of fluids through the increasing temperature of a wire that is immersed into the liquid and between its ends a potential difference is abruptly applied. Using well-known conductivity liquids: water, ethylene glycol and glycerine, the system was tested and calibrated. In this work, this procedure was used to measure the thermal conductivity of the infusion samples of organic and conventional coffee. The same roast degree of the beans was verified with a colorimeter and the preparation was made by pressing 22g

<sup>a</sup>Gordillo-Delgado, F., Valencia-Grisales, D. F. & Plazas-Saldaña, J. (2016). Uso de la Técnica de Alambre Caliente para la Medición de la Conductividad Térmica de Infusiones de Café Orgánico y Convencional. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 105–113. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n2.60889>

<sup>b</sup>Grupo de Investigación en Ciencia Aplicada para el Desarrollo de la Ecorregión- GICADE del IIC. Universidad del Quindío. Carrera 15 Calle 12N, Armenia, Quindío, fgordillo@uniquindio.edu.co

of coffee powder in 110mL of water. The obtained data were subjected to Analysis of Variance (ANOVA) and this confirmed that the differences in the thermophysical parameter in the two samples are significant with a confidence level of 95 %. On this way, it was proved that the thermal conductivity value of the coffee infusion allows differentiate between organic and conventional coffee.

**KEYWORDS:** Thermal conductivity, hot-wire, organic coffee, ANOVA.

## 1. INTRODUCCIÓN

La técnica del alambre caliente es utilizada para medir la conductividad térmica ( $k$ ) de fluidos a través de la transferencia a la muestra del calor generado por una corriente eléctrica que pasa por un alambre en contacto con ella; normalmente el proceso se hace dentro de una celda cilíndrica. La variación de temperatura se registra por medio de las variaciones de tensión en el filamento. En el modelo para analizar los resultados obtenidos con esta técnica transitoria, se considera una fuente vertical lineal que tiene calor específico cero y conductividad térmica infinita, sumergida en un fluido isotrópico infinito con propiedades termofísicas independientes de la temperatura y que al inicio de la medición ( $t = 0$ ) está en equilibrio termodinámico con la fuente (Azarfar, et al., 2016). La variación de la temperatura del alambre en función del tiempo, cuando por él circula una corriente constante es mostrada en la ecuación 1.

$$\Delta T(t) = \frac{q}{4\pi k} \left[ \ln \left( \frac{4\alpha t}{\gamma^2} \right) - \gamma \right] \quad (1)$$

Donde  $q$  es el flujo de calor,  $\gamma$  es la constante de Euler,  $k$  es la conductividad térmica y  $\alpha$  es la difusividad térmica de la muestra. La variación de la resistencia del alambre conductor que actúa como una fuente de calor debido al efecto Joule, permite determinar el cambio de temperatura teniendo en cuenta que:

$$R(t) = R_0(1 + \delta\Delta T) \quad (2)$$

En la ecuación 2  $R_0$  es la resistencia inicial del alambre y  $\delta$  es el coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica. Si la corriente,  $I$ , que se suministra al filamento es constante, pero la resistencia aumenta debido al calentamiento, la tensión también variará en función del tiempo:

$$\Delta V(t) = V(t) - V_0 = R_0 I \delta \frac{q}{4\pi k} \left[ \ln \left( \frac{4\alpha t}{\gamma^2} \right) - \gamma \right] \quad (3)$$

Donde  $q = \frac{I^2 R_0}{L}$ , con  $L$  la longitud del alambre. La derivada de la ecuación 3 con respecto al  $\ln(t)$  es:

$$m = \frac{I^2 R_0^2 \delta}{4\pi k L} \quad (4)$$

A partir de esta igualdad se puede calcular la conductividad térmica ( $k$ ) si se conoce la variación del voltaje en función del tiempo y la corriente suministrada al sistema (Marín, et al., 2014).

Los parámetros termofísicos intervienen directamente en el modelamiento de cualquier proceso térmico, ya que están involucrados con la transferencia de masa y de energía térmica y tienen una estrecha relación con la estructura y composición química de los materiales; por esta razón la técnica del alambre caliente es una herramienta particularmente importante en el estudio de alimentos líquidos, dado que no es destructiva, es de fácil manejo y es económica (Carson, et al., 2016).

En las últimas décadas algunos caficultores han implementado prácticas de cultivo orgánicas, sostenibles y amigables con el medio ambiente (Bravo-Monroy, et al., 2016), que dan un valor agregado al producto. El café orgánico es aquel que de acuerdo con los estándares de calidad nacional es fabricado y procesado sin el uso de insumos químicos de síntesis (plaguicidas y fertilizantes sintéticos). Todo caficultor que quiera comercializar su café bajo la designación de orgánico debe contratar a un organismo certificador que haga la inspección y control en su finca (Farfan & Sanchez, 2013). Este proceso es valioso en los negocios comerciales nacionales e internacionales (Nussbaum & Simula, 2013), así mismo es un elemento irremplazable para generar confianza en las relaciones cliente-proveedor (Grabs, et al., 2016). Aunque en ocasiones esta valoración subjetiva va acompañada por la inspección in situ a través de pruebas in vitro a los granos de café hechas en laboratorio, estos análisis son costosos y demorados. Por el contrario, con el uso de la técnica propuesta en este trabajo, se tiene un método cuantitativo para discriminar entre estos dos tipos de café, a través de una medición de alta precisión que no requiere de una preparación complicada de la muestra y que es de relativo bajo costo.

En este trabajo se reportan mediciones de la conductividad térmica de infusiones preparadas con café orgánico y convencional utilizando la técnica de alambre caliente; consecuentemente, se hizo un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA) de este parámetro para determinar la existencia de diferencia significativa entre los dos tipos de muestra.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se prepararon cinco infusiones con café convencional y cinco con café orgánico y de cada una se tomaron 4 muestras para hallar la conductividad térmica. Los granos tostados con las que se prepararon fueron adquiridos en el comercio local.

## 2.1. Color del café

Se determinó la luminosidad,  $L$ , en una escala de 0 a 100, donde 0 es oscuro y 100 es blanco y la cromaticidad,  $a$  y  $b$ , en la que  $a$  indica rojo cuando es positivo o verde cuando es negativo y  $b$  indica amarillo cuando es positivo o azul cuando es negativo (Macías & Campo, 2002). Para hacer estas mediciones se utilizó un colorímetro convencional (iWave WF30).

## 2.2. Preparación de infusiones

El café en grano con el que se prepararon las infusiones tuvo un grado de tostión media; lo que se verificó utilizando el colorímetro. La molienda se hizo en un molino (Proctor-Silex) y se pasó el polvo a través de un tamiz para obtener un tamaño de partícula entre 300 y 350 micrómetros; seguidamente, se calentaron 110mL de agua a 99°C y se adicionaron 22g del café molido; finalmente, se agitó la mezcla y se dejó enfriar a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) para luego pasarlo por un filtro AeroPress.

## 2.3. Medición de la conductividad térmica

Se vertieron 85mL de la infusión en la celda de alambre caliente para la medición de la conductividad térmica. La medida de la tensión eléctrica se hizo con un multímetro digital de alto rendimiento (KEITHLEY 2000) y se utilizó un alambre de platino A-M SYSTEMSTM de 44AWG (78.7 $\mu$ m de diámetro). Se tomaron 120 datos en 10 segundos a través del computador mediante una interfaz gráfica de usuario desarrollada en Labview. Con este programa se hizo el control de un arreglo de relés, utilizados para activar la fuente de voltaje y el multímetro durante el tiempo de medición; para esto se empleó una conexión USB CDC entre un microcontrolador (PIC 18f4550) y el computador.

El montaje experimental se muestra en la figura 1. Una fuente DC de alimentación INSTEK (GPS-3303) se usó para suministrar a los extremos del alambre una diferencia de potencial cercana a 1 V. El alambre de platino se coloca en contacto con la solución contenida en una celda cilíndrica metálica de 17cm de alto y diámetro interno de 3.5cm. Con este sistema se determina la conductividad térmica del fluido a través del aumento en la temperatura del alambre con el tiempo, después de que se da un cambio de paso en el voltaje aplicado. Esta temperatura se puede estimar conociendo la resistencia eléctrica del alambre embebido en el fluido, empleando la ley de Ohm.

La curva obtenida de voltaje en función del logaritmo natural fue ajustada en una región de comportamiento lineal con la ecuación 4 para obtener la conductividad térmica de la infusión.

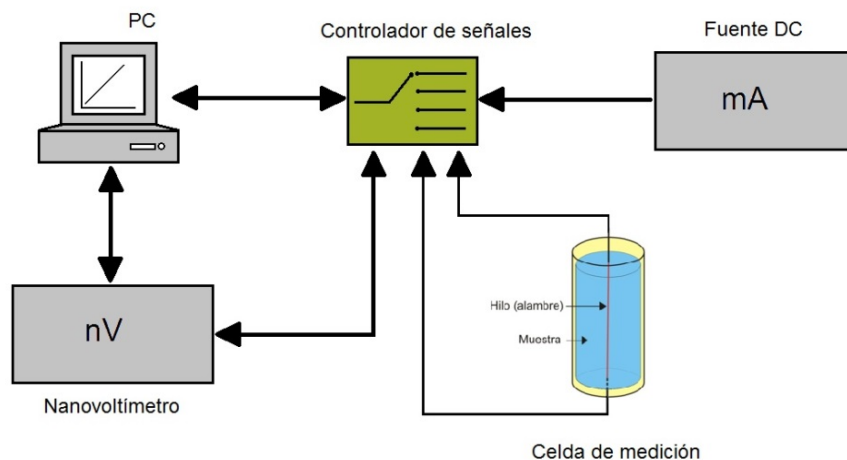


Figura 1: Montaje experimental de la técnica de alambre caliente. Fuente: elaboración propia.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1. Color del café

En la tabla 1 se presentan los parámetros de color del café orgánico y convencional tostado, molido y tamizado. De esto se puede ver que los dos tipos de café están en el mismo rango de tosti3n, ya que presentan coloraci3n similar.

Tabla 1: Color de los diferentes tipos de caf3

Muestra en polvo	$L$	$a$	$b$
Caf3 org3nico	18.74±0.01	18.73±0.01	30.01±0.01
Caf3 convencional	18.90±0.01	18.87±0.01	37.63±0.01

#### 3.2. Medici3n de la conductividad t3rmica en las infusiones de caf3

La calibraci3n del sistema de medici3n se hizo midiendo la conductividad t3rmica de agua, etilenglicol y glicerina; cuyos valores reportados: 0.57W/mK, 0,227W/mK y 0,28W/mK, respectivamente (Tye, 1969), son similares a los valores medidos: 0.60W/mK, 0,24W/mK y 0.29W/mK, respectivamente. Esto permiti3 establecer la confiabilidad en las mediciones.

En la figura 2(a) se muestra la nube de puntos experimentales correspondiente a la diferencia de potencial medido entre los extremos del alambre en funci3n del tiempo, cuando se puso en contacto con una muestra de infusi3n de caf3 org3nico dentro de la celda de medici3n. En la figura 2(b) se nota un comportamiento similar con la infusi3n preparada con caf3 convencional; en ambos casos se

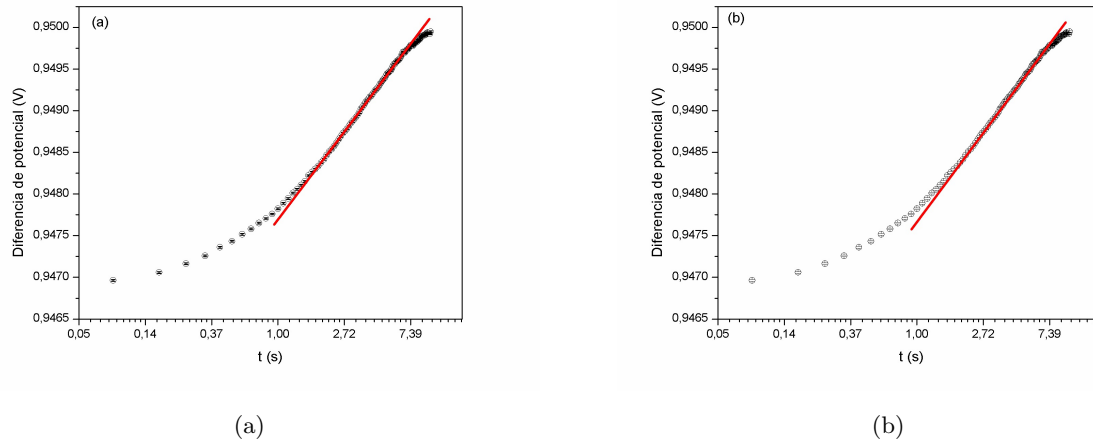


Figura 2: Datos tomados para: (a) una infusión de café orgánico y (b) una infusión de café convencional. La línea sólida corresponde al mejor ajuste lineal en la región de transición; en ambos casos con un valor de  $R^2$  de 0.98.

Fuente: elaboración propia.

define el ajuste lineal en la región de transición; la pendiente de esta recta es un parámetro requerido en la ecuación 4 para obtener la conductividad térmica de la muestra. El comportamiento de las curvas fue similar en todos los casos.

### 3.3. Análisis de ANOVA de un solo factor

Se analizaron los valores de conductividad térmica de 20 infusiones preparadas con café orgánico y 20 con convencional. En la tabla 2 se pueden ver los valores promedio obtenidos con su respectiva desviación estándar y coeficiente de variación. El coeficiente de variación para los dos tipos de infusión es muy bajo, lo que indica buena precisión del instrumento y homogeneidad de los datos; por otro lado, el valor promedio de la conductividad térmica de las infusiones de café convencional y orgánico fue de  $0.632 \pm 0.004$  W/mK y  $0.607 \pm 0.002$  W/mK, respectivamente.

Tabla 2: Resultados del ANOVA de la conductividad térmica de las muestras.

Infusión de café	Recuento	Promedio (W/mK)	Desviación estándar (W/mK)	Coefficiente de variación
Convencional	20	0.632	0.004	0.58 %
Orgánico	20	0.607	0.002	0.37 %
Total	40	0.620	0.013	2.12 %

Con el fin de determinar el potencial de discriminación de este parámetro se planteó una hipótesis nula,  $H_0$ :

$$H_0 : \mu_{Convencional} = \mu_{Organico} = \mu$$

Esta define que la media de la conductividad térmica de las infusiones de café,  $\mu_{Convencional}$  y  $\mu_{Organico}$  (convencional y orgánico), es igual; mientras que la hipótesis alterna,  $H_A$ , define que este valor es diferente en los dos casos:

$$H_A : \mu_{Convencional} \neq \mu_{Organico} \neq \mu$$

Tabla 3: ANOVA aplicado a la conductividad térmica de las infusiones de café.

Fuente	Suma de cuadrados (W/mK)	Grados de libertad	Cuadrado medio (W/mK)	Razón- F	Valor- P
Modo de cultivo	0.0064	1	0.0064	688.78	0.0000
Error	0.0004	38	0.000009		
Total	0.0068	39			

En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos por ANOVA; se observa que la variación total de los 40 datos obtenidos en este experimento fue de 0,0068W/mK. De esta cantidad, 0,0064W/mK se debe a diferencias relacionadas con el modo de cultivo y 0,0004W/mK corresponde a la diferencia entre el modo de cultivo del mismo tipo. Al ponderar estos valores con los correspondientes grados de libertad, se obtuvieron los cuadrados medios que reflejan la magnitud real de cada fuente de variación. Así, se nota que la diferencia debida al modo de cultivo es de 0,0064W/mK y que el error es de 0,000009W/mK; por lo tanto, el cuadrado medio del modo de cultivo es aproximadamente 689 (tabla 3) veces más grande que el cuadrado medio del error; lo cual indica que las diferencias observadas entre los tipos de cultivo son significativas y que no se deben a pequeñas variaciones de las muestras. Como el valor  $P$  es menor del 5% se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no hay igualdad entre las medias del modo de cultivo. Para comprobar la presencia de diferencias significativas entre las medias de las conductividades térmicas de las muestras de ambos tipos de cultivo, se probaron las hipótesis utilizando el método de mínima diferencia significativa (LSD).

Tabla 4: Valores resultantes de la aplicación de la prueba LSD de acuerdo con modo de cultivo del grano utilizado.

Contraste	Sig.	Diferencia	±Límites
Café convencional - Café orgánico	* <sup>a</sup>	0.0253	0.00195153

<sup>a</sup> \* indica una diferencia significativa

En la tabla 4 se pueden observar los datos arrojados por la prueba LSD, de los que se determina que las medias son significativamente diferentes con un nivel del 95% de confianza.

## 4. CONCLUSIONES

El valor de la conductividad térmica de la infusión de café permite diferenciar el café orgánico del convencional, utilizando un análisis de varianza de un solo factor, en el que la variable respuesta está dada por el valor de este parámetro obtenido mediante la técnica de alambre caliente. Los datos de esta magnitud oscilaron entre 0.632 y 0.633 W/mK y entre 0.606 y 0.608 W/mK, para las muestras de café convencional y orgánico, respectivamente. Por otro lado, se obtuvo información de la precisión de las mediciones, que tuvieron un coeficiente de variación menor del 1 %.

Posiblemente la conductividad térmica de la infusión preparada con café convencional es mayor debido al contenido de lípidos, proteínas y ácidos como lo expresa Macías & Campo (2002).

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Quindío por la financiación de este trabajo y por el apoyo a través del programa de estímulo económico a grupos de investigación.

## Referencias

- Azarfar, S., Movahedirad, S., Sarbanha, A., Norouzbeigi, R. & Beigzadeh, B. (2016). Research Paper: Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids. *Applied Thermal Engineering*, 105, 142–150.
- Bravo-Monroy, L., Potts, S. & Tzanopoulos, J. (2016). Drivers influencing farmer decisions for adopting organic or conventional coffee management practices. *Food Policy*, 58, 49–61.
- Carson, J., Wang, J., North, M & Cleland, D. (2016). Effective thermal conductivity prediction of foods using composition and temperature data. *Journal of Food Engineering*, 175, 65–73.
- Farfan, F. & Sanchez, P. (2013). Certificación de fincas de producción de café orgánico, *Avances técnicos Cenicafé*, 363, 120–178. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/wpcontent/uploads/2016/04/avt0363.pdf>.
- Grabs, J., Kilian, B., Hernández, D. C. & Dietz, T. (2016). Understanding Coffee Certification Dynamics: A Spatial Analysis of Voluntary Sustainability Standard Proliferation. *International Food & Agribusiness Management Review*, 19, 31–55.
- Macías, A., Campo, E. (2002). Café orgánico: caracterización, torrefacción y enfriamiento. *Cenicafé*, 53, 281–292. Disponible en: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc053\(04\)281-292.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc053(04)281-292.pdf).



Marín, E., Bedoya, A., Alvarado, S., Calderón, A., Ivanov, R. & Gordillo-Delgado, F. (2014). An explanation for anomalous thermal conductivity behaviour in nanofluids as measured using the hot-wire technique. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47, 1–8.

Nussbaum, R. & Simula, M. (2013). *The forest certification handbook*. Taylor & Francis: 563–583.

Tye, R. P. (1969). *Thermal conductivity*, vol 1. Academic Press.

# COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ENSAMBLAJE DE ESCARABAJOS COPRÓFAGOS (*Scarabaeidae: Scarabaeinae*) EN DOS FRAGMENTOS DE BOSQUE DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA<sup>a</sup>

## COMPOSITION AND STRUCTURE OF DUNG BEETLES ASSEMBLAGE (*Scarabaeidae: Scarabaeinae*) IN TWO FOREST FRAGMENTS FROM THE DEPARTMENT OF ANTIOQUIA

ARGEMIRO VARGAS-PÉREZ<sup>b</sup>, DIEGO ESTEBAN MARTÍNEZ-REVELO<sup>c</sup>

Recibido 16-09-2016, aceptado 26-12-2016, versión final 30-12-2016.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** La modificación del paisaje por intervención humana genera fragmentos de bosque de diferente forma y tamaño inmersos en una matriz de potreros, que pueden afectar en mayor medida la diversidad de organismos, especialmente aquellos con requerimientos ecológicos altos. Una primera aproximación para medir el efecto de la transformación del paisaje en los ensamblajes es conocer su estructura y composición, por esta razón, en este trabajo se describen los cambios en la diversidad de escarabajos coprófagos en dos fragmentos de bosque adyacentes de diferente tamaño ubicados en la zona circundante a la represa del río Porce a 200 metros de distancia entre sí. Los escarabajos coprófagos fueron muestreados durante dos días en abril de 2016, mediante el uso de trampas de caída cebadas con excremento humano. Se colectaron en total 217 individuos pertenecientes a nueve géneros y 15 especies. Se observó que la riqueza fue similar entre los fragmentos y no se encontró diferencias significativas en términos de diversidad con base en el número efectivo de especies. Sin embargo, la composición difirió entre fragmentos encontrando tres especies exclusivas del fragmento de bosque con mayor tamaño y una especie del fragmento de menor tamaño. Los resultados indican que la proximidad entre fragmentos permite el flujo de especies, lo que sugiere la importancia de mantener la continuidad de los corredores ecológicos para la conservación de escarabajos coprófagos a escala regional.

**PALABRAS CLAVE:** Bioindicadores, diversidad verdadera, fragmentación, represa del río Porce.

**ABSTRACT:** The landscape transformation by human intervention generates forest fragments with different size and shape, which are immersed in a matrix of pastures. This transformation impact to local

<sup>a</sup>Vargas-Pérez, A. & Martínez-Revelo, D. E. (2016). Composición y estructura del ensamblaje de escarabajos coprófagos (*Scarabaeidae: Scarabaeinae*) en dos fragmentos de bosque del departamento de Antioquia. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 114–123. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n2.60089>

<sup>b</sup>M. Sc. Ciencias Entomología, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; [aravargaspe@unal.edu.co](mailto:aravargaspe@unal.edu.co)

<sup>c</sup>Grupo de investigación en sistemática molecular, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín; [diemartinezre@unal.edu.co](mailto:diemartinezre@unal.edu.co)

diversity, particularly in species with higher ecological requirements. A first approximation to measure the impact on the biological communities is to know their structure and composition into the landscape, for this reason, this paper describes the changes in the structure and composition of dung beetles in two fragments of forest with different size in the Porce river, this fragments are at 200 meters of distance. The dung beetles were sampled during two days in April 2016, using pitfall traps baited with human feces. A Total of 217 individuals belonging to nine genera and 15 species were captured. It was observed that the richness was similar between the fragments and there was no significant differences in terms of diversity based on the effective number of species. However, the composition differed between fragments, showing three species unique in the largest forest fragment against one species in the smallest fragment. The results indicate that proximity between fragments allows the movement of species, this suggests the importance of keeping the continuity forest corridors for the dung beetles conservation in a regional scale.

**KEYWORDS:** Bioindicators, true diversity, fragmentation, Porce river dam.

## 1. INTRODUCCIÓN

La alteración y modificación de las características naturales de los ecosistemas como consecuencia de las actividades humanas, es sin lugar a duda una de las mayores causas de pérdida de organismos y por ende es considerada como la principal amenaza para la biodiversidad (Sala, et al., 2000). Este proceso genera pérdida de hábitats y reducción en el tamaño y aislamiento de los fragmentos de bosque, que incrementa la susceptibilidad de las comunidades a la influencia de la matriz circundante y la incidencia de factores ambientales, tales como temperatura, luminosidad y humedad (Bustamante & Grez, 1995; Fahrig, 2003). Las modificaciones en el hábitat a su vez reducen la oferta de recursos, que puede expresarse en cambios en la estructura y composición de especies y reducción de las poblaciones a diferentes escalas locales y regionales (Kattan, 2002).

Ante la transformación del paisaje natural en sistemas agrícolas que dan como resultado fragmentos de bosque rodeados de potreros, es necesario conocer cómo las comunidades biológicas se estructuran en los remanentes de bosque. Los escarabajos coprófagos son un grupo biológico importante que ofrece servicios ecosistémicos primordiales: por su hábito alimenticio principalmente de tipo coprófago, los escarabajos cumplen la función de dispersores secundarios de semillas, contribuyendo a la regeneración natural de los bosques y por su estrecha relación con los mamíferos y su sensibilidad a la perturbación del hábitat, son utilizados como indicadores de diversidad y del estado de conservación de los ecosistemas (Villareal, et al., 2006). Igualmente, por sus hábitos de vida cavadores facilitan la penetración de aire, agua y la remineralización del suelo, siendo potencialmente útiles en la recuperación de suelos degradados (Nichols, et al., 2008). Estas características hacen que los escarabajos coprófagos sean un grupo ideal para caracterizar la biodiversidad y ser incorporados en planes de monitoreo y conservación a escalas regionales.

El embalse del río Porce se ubica en el nordeste Antioqueño y se caracteriza por presentar una es-

estructura paisajística con fragmentos de bosque disímiles y alta incidencia de actividades ganaderas, además de otros impactos propios de la represa que pueden afectar de manera negativa la diversidad y sus servicios ecosistémicos derivados. Teniendo en cuenta lo anterior, el presente estudio evalúa las posibles diferencias en la estructura y composición del ensamblaje de escarabajos coprófagos en dos fragmentos de bosque adyacentes con diferente tamaño en las zonas aledañas al río Porce, con el fin de establecer una línea base de información sobre este grupo de insectos que aporte a futuras propuestas de monitoreo de biodiversidad a escala regional.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio:** El estudio se realizó en el embalse del río Porce II, municipio de Amalfi, noreste del departamento de Antioquia, en dos fragmentos de bosque húmedo tropical adyacentes distanciados 200 metros entre sí, correspondientes a una vegetación secundaria del orobioma bajo de los Andes (Figura 1).

Fragmento de bosque uno (B1): 06°47'21.1"N 075°07'21.1"O. Consta de un área aproximada de 332 Has a una altura de 956 msnm. Se caracteriza por pendientes suaves, alta conectividad y un proceso de sucesión secundaria avanzada.

Fragmento de bosque dos (B2): 06°47'45.3" N 075°07'17.1"O. Posee una extensión de 3.6 Has a una altura de 1048 msnm. Se caracteriza por pendientes pronunciadas, claros generados por caída de árboles y presencia de especies pioneras propias de estados sucesionales tempranos.

En cada fragmento de bosque se instaló un transecto conformado por seis trampas de caída cebadas con excremento humano, separadas 30 metros una de la otra, las trampas se revisaron cada 24 horas completando 48 horas de muestreo (Villareal, et al., 2006). El material recolectado se etiquetó y preservó en alcohol al 70% para su posterior determinación en el laboratorio de curaduría del Museo Entomológico Francisco Luis Gallego (MEFLG) de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, donde se depositó una colección de referencia. La determinación taxonómica de los géneros se realizó mediante el uso de claves de Medina & Lopera (2000) y Vaz De Mello, et al. (2011). Las determinaciones a nivel de especie y morfoespecie (codificador único de morfoespecie, identificado con la letra H) se realizaron con base en la comparación de los especímenes con la colección de referencia de escarabajos coprófagos de Colombia (CRECC) del instituto Alexander von Humboldt, Villa de Leyva, Boyacá.

Con el fin de analizar la estructura y composición del ensamblaje por fragmento de bosque se estimó la completitud del muestreo mediante el análisis de coberturas estandarizadas de las muestras al

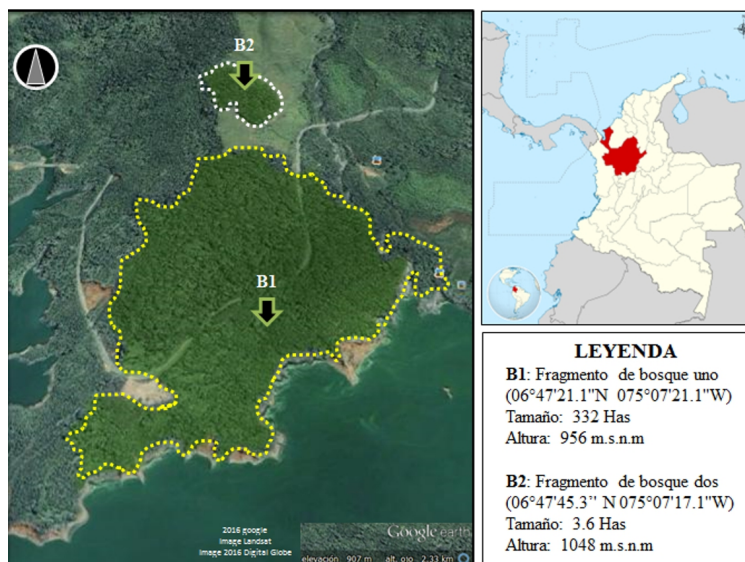


Figura 1: Áreas adyacentes a la zona de inundación de la represa porce II. Se indican los parches muestreados en polígonos a una escala de 3Km2. Fragmento de bosque uno (B1), Fragmento de bosque dos (B2). El tamaño fue calculado con los datos del programa google earth. Fuente: google earth

95% (INTERpolación y EXTRapolación), del cual se calculó la riqueza esperada a partir del número de individuos colectados de las comunidades  $q_0$ , y se comparó la diversidad con base en número efectivo de especies entre los fragmentos  $q_1$  y  $q_2$  (Jost, 2007). Por último, se estableció el modelo de distribución de abundancias de la comunidad de escarabajos coprófagos para cada hábitat a través de la construcción de gráficas de dominancia-diversidad, o curvas de Whittaker.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se recolectaron en total 217 individuos agrupados en 9 Géneros y 15 especies. Las especies más abundantes fueron *Canthon sp.* 01H con 55 individuos que representó el 16.55% del total de individuos recolectados y *Onthophagus sp.* 01H con 36 individuos que representan el 20.45%. Las especies menos representadas fueron *Eurysternus foedus* y *Eurysternus mexicanus* con dos individuos y *Oxysernon conspicillatum* y *Ontherus lunicollis* un individuo (Tabla 1).

Teniendo en cuenta los valores de riqueza publicados en otros muestreos en el departamento con el mismo esfuerzo de muestreo (48 horas), el número de especies en esta zona es alto. En fincas cafeteras-ganaderas del municipio de Tarso, Arie Noriega, et al. (2012) reporta 13 especies entre las coberturas de bosque, cafetal y pastizal, para bosque sólo reporta diez especies. En contraste, trabajos con mayor intensidad de muestreo realizados en el municipio de Puerto Berrío reportan hasta 40 especies en una matriz de paisaje fragmentado, estos resultados provienen de la región del

Tabla 1: Especies y abundancia de escarabajos coprófagos en dos fragmentos de bosque, embalse del río Porce, Antioquia.

Especies	Gremio	Fragmento de bosque		Total
		Uno	Dos	
<i>Canthon sp.</i> 01H	Gran rodador	22	33	55
<i>Onthophagus sp.</i> 01H	Pequeño cavador	27	17	44
<i>Uroxys sp.</i> 01H	Pequeño cavador	6	20	26
<i>Canthon subhyalinus</i> Harold, 1867	Pequeño rodador	19	3	22
<i>Canthidium sp.</i> 05H	Pequeño cavador	1	14	15
<i>Dichotomius andresi</i> Sarmiento & Amat, 2014	Gran cavador	9	6	15
<i>Dichotomius sp.</i> 07H	Gran cavador	7	3	10
<i>Trichillidium pilosum</i> Robinson, 1948	Pequeño cavador	2	8	10
<i>Eurysternus plebejus</i> Harold, 1880	Residente	6	3	9
<i>Onthophagus sp.</i> 09H	Pequeño cavador	1	2	3
<i>Dichotomius (Selenocopris) sp</i>	Gran cavador	1	1	2
<i>Eurysternus foedus</i> Guérin, 1844	Residente		2	2
<i>Eurysternus mexicanus</i> Harold, 1869	Residente	2		2
<i>Ontherus luniciollis</i> Génier, 1996	Gran cavador	1		1
<i>Oxysternon conspicillatum</i> Weber, 1801	Gran cavador	1		1
Total		105	112	217

magdalena medio (León, 2015).

En B1 se recolectaron 105 individuos y 14 especies, el índice de completitud fue del 95%. En B2 se capturaron 112 individuos y 12 especies, el índice de completitud fue del 99% (Tabla 2). De acuerdo con estos resultados, aunque la diferencia no es muy notoria, se espera obtener un mayor número de especies en B1 con relación a B2, debido al tamaño del fragmento, tal como lo proponen Estrada & Coates-Estrada (1991) y Chapman, et al. (2003), sugiriendo que la riqueza de escarabajos coprófagos puede ser mayor en fragmentos de bosque de gran tamaño ya que el establecimiento de organismos que potencialmente pueden aportar fuentes alimenticias para los escarabajos en fragmentos pequeños es limitado.

Tabla 2: Riqueza y completitud del muestreo de escarabajos coprófagos en dos fragmentos de bosque, embalse del río Porce, Antioquia.

Índice	Fragmento de bosque	
	Uno	Dos
Individuos	105	112
Riqueza observada	14	12
Completitud	0.95	0.99

La riqueza de gremios de escarabajos coprófagos entre los dos fragmentos de bosque varió en cuanto al grupo de grandes rodadores, donde B2 (fragmento de menor tamaño) perdió dos especies, los demás grupos mantuvieron igual número de especies. Llama la atención el patrón de variación que exhibe la abundancia de gremios entre los fragmentos: el número de individuos de especies residentes, grandes cavadores y pequeños rodadores disminuye en B2, mientras que el número de individuos de especies cavadoras pequeñas y grandes rodadores es mayor (tabla 3).

Tabla 3: Riqueza y abundancia de gremios de escarabajos coprófagos en dos fragmentos de bosque, embalse del río Porce, Antioquia.

Gremios	Fragmento de bosque uno		Fragmento de bosque dos		Total general
	Abundancia	Riqueza	Abundancia	Riqueza	
Pequeño cavador	37	5	61	5	98
Gran rodador	22	1	33	1	55
Gran cavador	19	5	10	3	29
Pequeño rodador	19	1	3	1	22
Residente	8	2	5	2	13
Total general	105	14	112	12	217

La riqueza de gremios entre los dos fragmentos varió en el número de especies. La comparación entre la diversidad verdadera con base en el número efectivo de especies no muestra diferencias significativa en ninguno de los órdenes entre los fragmentos (Figura 2). Aunque se observa una tendencia a la pérdida de biodiversidad en B2 siendo 1.1 ( $q_1$ ) y 1.08 ( $q_2$ ) veces menos diverso que B1, la variación no es significativa (Figura 2).

El grado de recambio de especies en los dos fragmentos presenta valores similares (Figura 4), el cálculo de diversidad beta en los tres órdenes que varía entre 1.01 a 1.03 no indica diferencias significativas. A pesar de la similitud en la composición, B1 presenta tres especies más que B2: *Eurysternus mexicanus*, *Ontherus luniciollis* y *Oxysternon conspicillatum*, mientras que la espe-

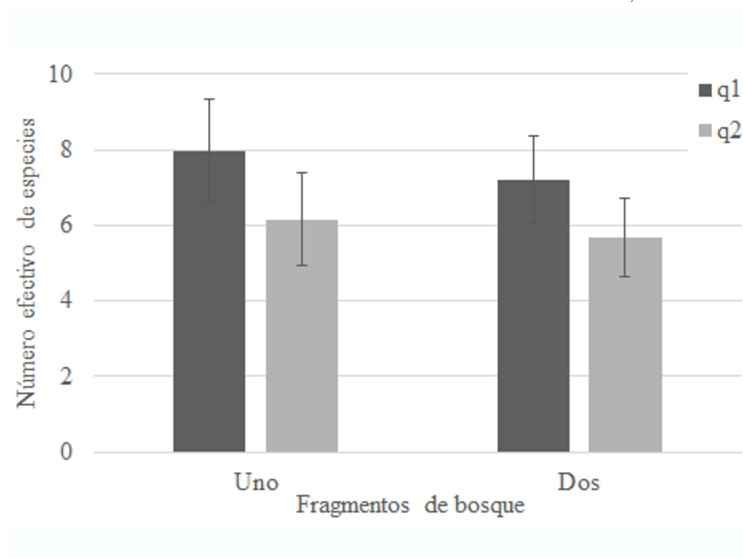


Figura 2: Diversidad verdadera en orden q1 y q2 de escarabajos coprófagos en dos fragmentos de bosque, embalse del río Porce, Antioquia. Fuente: Elaboración propia.

cie *Eurysternus foedus* sólo fue registrada en el fragmento B2. La exclusividad de poblaciones de escarabajos coprófagos puede deberse a los requerimientos de cobertura de bosque para su establecimiento, León (2015) concluye que el grado de cobertura arbórea y la densidad del dosel influyen en la presencia de un tipo específico de especies.

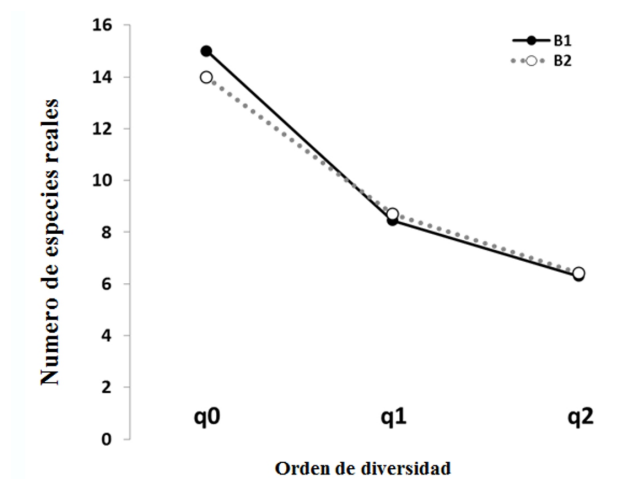


Figura 3: Diversidad alfa en los dos fragmentos de bosque B1 y B2. Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de rango abundancia muestran, para B1, la conformación de cuatro grupos de especies, donde el más abundante está conformado de mayor a menor por *Onthophagus sp.* 01H, *Canthon sp.* 01H y *Canthon subhyalinus*. Respecto a B2 está caracterizado por especies con distribuciones más



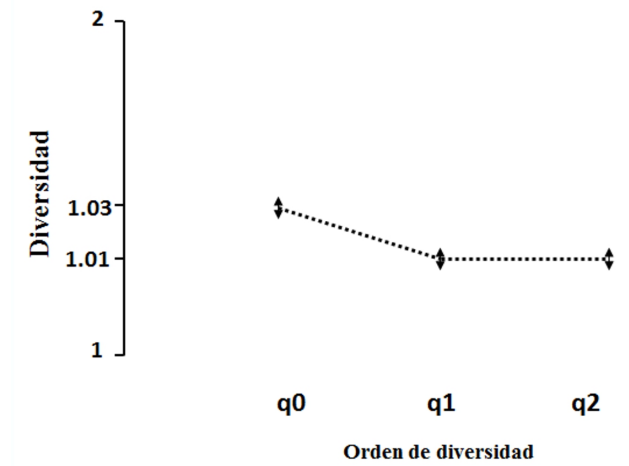


Figura 4: Diversidad beta en los dos fragmentos de bosque B1 y B2. Fuente: Elaboración propia.

homogéneas. Según Berriozábal-Islas (2012), el comportamiento de estas curvas se ve influenciado por la disponibilidad de alimento, lo que podría indicar que en este último ecosistema la distribución de los recursos es más equitativa y que probablemente exista mayor competencia. En esta zona la especie más abundante fue *Canthon sp.* 01H, que por lo general presenta altas abundancias en los sitios donde se encuentra y además está registrada principalmente en interior de bosque continuo o fragmentos de bosque y bosques de cañada (Cultid, et al., 2012).

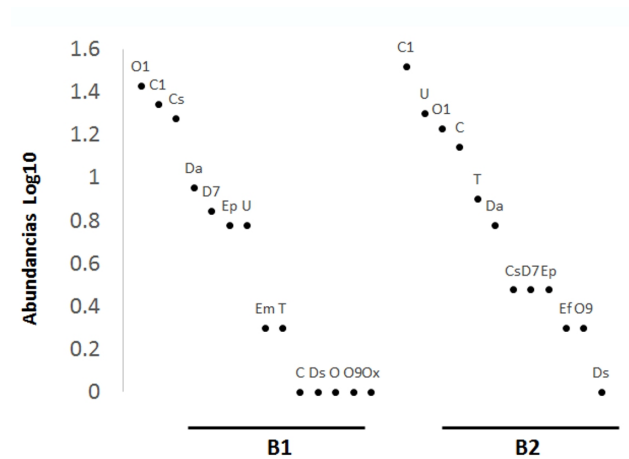


Figura 5: Curvas de whittaker: *Canthidium sp.* 05H (C), *Canthon sp.* 01H (C1), *Canthon subhyalinus* (Cs), *Dichotomius (Selenocopris) sp.* (Ds), *Dichotomius andresi* (Da), *Dichotomius sp.* 07H (D7), *Eurysternus foedus* (Ef), *Eurysternus mexicanus* (Em), *Eurysternus plebejus* (Ep), *Ontherus luniciollis* (O), *Onthophagus sp.* 01H(O1), *Onthophagus sp.* 09H (O9), *Oxysternon conspicillatum* (Ox), *Trichillidium pilosum* (T), *Uroxys sp.* 01H (U).

Fuente: Elaboración propia.

## 4. CONCLUSIONES

Esta evaluación rápida muestra que a pesar de la intensa transformación del paisaje en el embalse del río Porce y del bajo esfuerzo de muestreo, aún se encuentran fragmentos de bosques capaces de sostener ensamblajes de escarabajos coprófagos diversos, en este muestreo 217 individuos de 15 especies. Es muy probable que entre fragmentos cercanos con diferente tamaño, se registre la misma fauna debido a la movilidad que presentan las poblaciones de escarabajos en el paisaje, evidente en la poca diferencia de composición y estructura entre las comunidades. Los resultados indican que la proximidad de los fragmentos, en este caso de 200 metros permite el flujo de especies entre ellos compartiendo una misma fauna con una misma distribución de abundancias, lo que sugiere la importancia de la presencia de fragmentos de boques cercanos para el mantenimiento de poblaciones de escarabajos en un paisaje fragmentado, sin embargo, se debe tener en cuenta que el tamaño de los fragmentos puede afectar riqueza y abundancia de los gremios. Es imprescindible formular planes de monitoreo que contribuyan a fortalecer estrategias de conservación y permitan evaluar temporalmente y espacialmente la variación de las poblaciones en esta zona, ampliando el esfuerzo y área de muestreo.

## Referencias

- Arie Noriega, J., Palacio, M., Monroy-G, J. & Valencia, E. (2012). Estructura de un ensamblaje de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeinae) en tres sitios con diferente uso del suelo en Antioquia, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 34(96), 43–54.
- Berriozábal-Islas (2012). Riqueza y diversidad herpetofaunística del bosque tropical, cafetales y potreros del municipio de Huehuetla, Hidalgo, México. -Tesis
- Bustamante, R. & Grez, A. (1995). Consecuencias ecológicas de la fragmentación de los bosques nativos. *Ambiente y Desarrollo*, 11, 58–63.
- Chapman, C. A., Chapman, L. J., Vulinec, K., Zanne, A. & Lawes, M. J. (2003). Fragmentation and alteration of seed dispersal processes: An initial evaluation of dung beetles, seed fate, and seedling diversity. *Biotropica*, 35(3), 382–393.
- Cultid, C. A., Medina, C. A., Martínez, B., Escobar, A. F., Constantino, L. M. & Betancur, N. J. (2012). Escarabajos coprófagos (Scarabaeinae) del Eje Cafetero: guía para el estudio ecológico. WCS-Colombia, CENICAFÉ y Federación Nacional de Cafeteros. Villa María. Colombia.
- Estrada, A. & Coates-Estrada, R. (1991). Howler monkeys (*Alouatta palliata*), dung beetles (Scarabaeidae) and seed dispersal: ecological interactions in the tropical rain forest of Los Tuxtlas, Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 7(4), 459–474.

- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 34(1), 487–515.
- Jost, L. (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*, 88(10), 2427–2439.
- Kattan, G. H. (2002). Fragmentación: patrones y mecanismos de extinción de especies. *Ecología y conservación de bosques neotropicales*, 1, 561-582.
- León, E. J. (2015). Diversidad de escarabajos coprófagos (Scarabaeidae: Scarabaeinae) de un paisaje fragmentado de uso ganadero en el Magdalena Medio Antioqueño. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Tesis de maestría. 78p.
- Medina, C. A. & Lopera, A. (2000). Clave ilustrada para la identificación de géneros de escarabajoscoprófagos (Coleoptera: Scarabaeinae) de Colombia. *Caldasia*, 22(2), 299–315.
- Nichols, E., Spector, S., Louzada, J., Larsen, T., Amezcuita, S. & Favila, M. E. (2008). The Scarabaeinae Research Network. Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. *Biological Conservation*, 141(6), 1461–1474.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., ... & Leemans, R. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287(5459), 1770–1774.
- Vaz-de-Mello, F. Z., Edmonds, W. D., Ocampo, F. C. & Schoolmeesters, P. (2011). A multilingual key to the genera and subgenera of the subfamily Scarabaeinae of the New World (Coleoptera: Scarabaeidae). *Zootaxa*, 2854(1), 1–73.
- Villareal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M. & Umaña. A. M. (2006). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Segunda Edición, Bogotá, Colombia, 236 p.

## CONVERSATORIO CON EL PROFESOR DANIEL FRANCISCO JARAMILLO JARAMILLO <sup>a</sup>

### A CONVERSATION WITH PROFESSOR DANIEL FRANCISCO JARAMILLO JARAMILLO

**RESUMEN:** Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo es ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, especialista de Fotointerpretación aplicada a estudios de suelos, Magister en Suelos y Aguas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Ha participado como reconecedor de suelos en levantamientos realizados en varias regiones de los departamentos de Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Huila, Caldas y La Guajira, y desde hace 35 años está dedicado a la docencia, en pregrado y posgrado, como profesor en los cursos de Ciencia del suelo, Génesis y Clasificación de suelos, Levantamiento de suelos, Clasificación de tierras, Taxonomía de suelos, Fotogrametría y Fotointerpretación. Ha escrito dos libros El suelo: Origen, propiedades y espacialidad y Repelencia al agua en Andisoles de Antioquia. Tiene más de 45 artículos publicados en revistas especializadas sobre Génesis y clasificación de Suelos, Hidrofobicidad de suelos, Fisiografía y Variabilidad espacial de suelos. Sus áreas de interés son: Levantamiento de suelos, Taxonomía de suelos, Variabilidad espacial de suelos, Hidrofobicidad de suelos y Andisoles.

**ABSTRACT:** Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo is an agronomist at the National University of Colombia. He is an specialist in Photo interpretation applied to soil studies. He has a Master's degree in Soil and Water studies from the National University of Colombia, at Palmira. He has participated as a surveyor of soil in studies conducted in several regions of the Departments of Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Huila, Caldas and Guajira. For the past 35 years he has taught courses in Soil Science at the undergraduate and graduate level, as well as courses of soil genesis and soil classification, soil survey, land classification, soil taxonomy, photogrammetry and photo interpretation. He has written two books: Soil, its origin, properties and water repellency in Andisols of Antioquia. He has published over 45 articles in specialised journals on Genesis and classification of soils, soil hydrophobicity, physiography and spatial variability of soils. His areas of interest are: Soil Survey, Soil Taxonomy, spatial variability of soil, soil hydrophobicity and Andisols.

## 1. EN SU JUVENTUD

### 1.1. Profesor Daniel, cuéntenos un poco de su niñez.

*Eso está muy lejos. Nosotros no tuvimos muchos compliques en la niñez, fue una niñez normal en una familia muy típica paisa, de bastantes hijos, fuimos diez, yo soy el mayor. Lo que hacíamos*

---

<sup>a</sup>Entrevista realizada por el Comité Editorial de la Revista de la Facultad de Ciencias grabada y editada por María Eugenia Aristizábal, Secretaria Técnica del Comité. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 124–136.

*en esa época era jugar en la calle porque no había nada, no habían parques, no habían canchas, no había nada de lo que hay ahora, era jugar fútbol, corretear por todas partes, jugar con trompos, con bolas; esos eran los juegos de nosotros, y empezar a estudiar muy temprano porque en esa época era rápido, de pronto era, digo yo sin tener la certeza, como una alternativa que tenían las mamás con nosotros de bajarse un poquito la carga en la casa, porque con tantos hijos para cuidar el que pudiese salir para el colegio ya era un descanso.*

*Yo empecé a estudiar a los 5 años, a esa edad empecé kínder y en esa época no era para jugar como ahora; cuando yo terminé kínder ya sabía leer, sabía las operaciones básicas: sumar, restar, multiplicar, de manera que ya uno salía listo para estudiar en forma, y así fue, de ahí cogí el ritmo de estudiar todo el tiempo y llevo prácticamente toda la vida estudiando.*

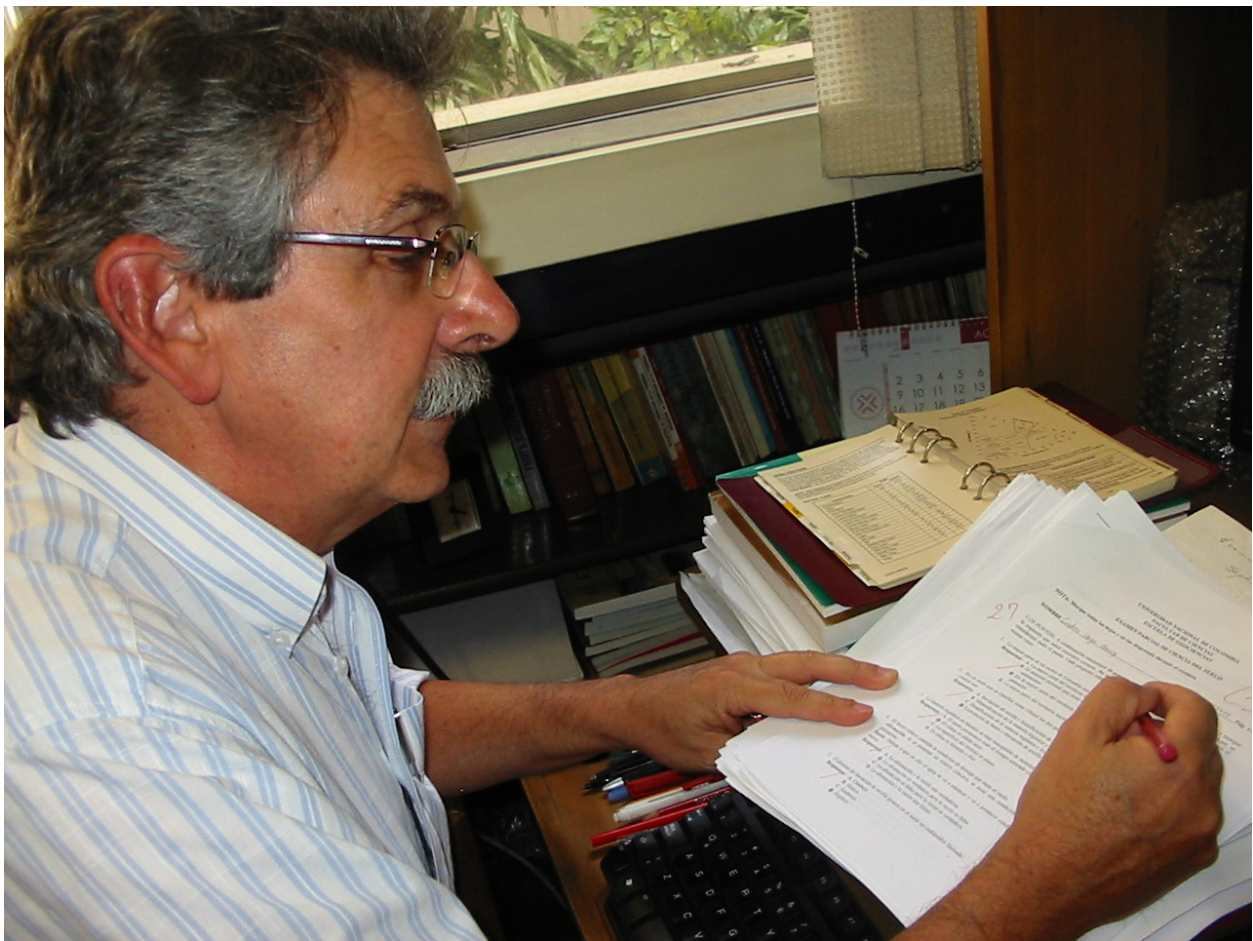


Figura 1: Profesor Daniel en su oficina

## 2. EN SU VIDA UNIVERSITARIA

### 2.1. ¿Qué lo inclinó a escoger su carrera profesional?

*La elección de mi carrera fue casi accidental por dos situaciones: 1) Mi papá trabajó toda la vida en la fábrica de medias Cristal; él empezó prácticamente como obrero y fue haciendo carrera. Al tiempo, la fábrica montó una planta nueva de texturizado de nylon para las medias: la planta estaba en el Barrio Antioquia y la pasaron para Sabaneta, el montaje de la maquinaria para esa planta lo hizo mi papá; estando él allá yo me fui a estudiar interno a Concordia. Cuando terminé tercero de bachillerato le dije a mi mamá que no quería seguir estudiando en Medellín, que yo me quería ir para otro lado; en esa época la Secretaría de Educación manejaba colegios departamentales y en muchos municipios del departamento había internado en esos liceos, allá ingresaban estudiantes de otros pueblos donde no había bachillerato completo, les daban la opción de estudiar internos en otros pueblos y ahí les pagaban todo. En 1968 terminé tercero de bachillerato y buscando colegio resultaron los internados. Cuando fuimos a averiguar, la Secretaría de Educación en ese año cerró casi todos los que tenía en el departamento, sólo quedaron dos: uno en Concordia y otro en Marinilla. En este último no había cupo, entonces me fui para Concordia. Llegué allí en 1969 a cursar cuarto de bachillerato, estuve tres años y terminé bachillerato en el Liceo Departamental Jesús de Concordia. Estando en quinto, en unas vacaciones me vine para la casa, y le dije a mi papá que me llevara a trabajar a la fábrica, y efectivamente me llevó, y quedé tan aburrido con ese trabajo que dije: ¿o no puedo estudiar algo para trabajar así, con ese ruido, ese trabajo es muy aburridor”, fue éste el primer incidente que ya me empezó a orientar a la profesión. 2) En el último año en Concordia yo me retiré del internado y me fui a vivir a una casa de familia, el señor de la casa tenía un lote de café cerca del pueblo. Él tenía un cafetal viejo y ese año lo empezó a cambiar por caturra, que era el café de moda en esa época, todos los hijos de él tenían que trabajar en eso y como yo no tenía nada más que hacer me iba a trabajar con ellos, me tocó incluso estar en la primera cosecha y eso me quedó gustando. Efectivamente dije que me iba a presentar a una carrera relacionada con el campo. Estaba averiguando carreras para estudiar y me encontré con agronomía, me presenté, pasé y me quedé.*

*Empecé la carrera en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, el primer semestre de 1972 y la terminé el segundo semestre de 1978. Me orienté por suelos desde que empecé a ver los primeros cursos: el primero que veíamos en esa época era Geología general. Luego veíamos el primer curso de suelos, que en esa época era Suelos IA, hoy se llama Ciencias de Suelo, y de ahí pasé al curso de suelos IIA, que hoy se llama Fertilidad de Suelos. Al semestre siguiente me presenté, y gané la monitoría del curso Suelos IIA con el Doctor Francisco Herrón, que hoy está jubilado de la Universidad Nacional de Colombia, estuve tres años con la monitoría, ahí me encarreté del todo: hice todas mis electivas, mi seminario y mi tesis en suelos.*

*Al terminar la carrera me dieron una beca para cursar una especialización en Bogotá y allí estuve un año haciendo la especialización de Levantamiento de suelos en el Centro Interamericano de Fotointerpretación. El instituto ofrecía especializaciones en fotointerpretación aplicadas a diferentes ciencias: suelos, ingeniería forestal, ingeniería civil, estudios regionales, geografía, geología. Los cursos duraban un año de tiempo completo y presencial, nos daban el título de Especialista en fotointerpretación aplicada al tema que uno había trabajado.*

*Cuando terminé la especialización en Bogotá, trabajé en fotointerpretación como contratista con la Federación de Cafeteros: ellos empezaron a hacer el censo cafetero y fui jefe de comisión en el nordeste antioqueño, con sede en Yolombó y en Amalfi: cubriendo los municipios de Yolombó, Amalfi, Yalí, Remedios, Segovia y Vegachí. Cuando terminamos en Antioquia seguimos en el Magdalena Medio de Cundinamarca: teníamos sede en La Palma. Me llamaron después a participar como fotointérprete para suelos en un proyecto que acababa de firmar el CIAF con el Ministerio de Agricultura para hacer un estudio integral de la cuenca del río Bogotá; ahí estuve trabajando un año en la cuenca del río Bogotá, desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Magdalena.*

*Después de ese trabajo me presenté a una convocatoria en la Universidad Sur Colombiana en Neiva, y la gané. Allí tenían el programa de ingeniería agrícola y en su pensum ofrecían las asignaturas de Fotogrametría y de Fotointerpretación y les habían llegado unos equipos de fotointerpretación por medio de la Federación de Cafeteros, pero no tenían profesor para organizar y dictar las materias. Estuve como profesor en esta Universidad hasta mediados de 1984 que salió la convocatoria en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, para un profesor en suelos. En las vacaciones de mitad de año me vine a Medellín e ingresé aquí el 23 de julio de 1984 y hasta hoy he estado en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

*En 1990 pensé que debía avanzar un poquito en la formación académica y darle forma a la parte de investigación, porque esto era una cosa que estaba haciendo muy empíricamente. Primero me presenté para estudiar en Brasil para hacer la maestría. Lo que fueron notas, calificaciones, experiencia, todo estaba muy bien, pero de allá me pedían presentar un proyecto de investigación financiado y me tocó desistir. Luego me presenté a la sede Palmira y me aceptaron en la Maestría en Suelos y Aguas. Hice esa maestría en año y medio, porque llevaba mucho trabajo adelantado: había empezado a hacer unos trabajos a finales de 1980. Varios profesores del departamento de Ciencias de la Tierra nos empezamos a organizar como grupo de investigación y haciendo un proyecto en Piedras Blancas trabajé con unos suelos difíciles de humedecer, ahí me encontré con el tema de hidrofobicidad de suelos del cual no tenía idea. Me puse a estudiar ese tema y me fui por esta área, de modo que cuando fui a Palmira a estudiar ya venía trabajando en ese tema e hice la tesis en él. En Palmira tampoco tenían idea de lo que yo estaba hablando. El primer semestre tenía el proyecto aprobado y empecé a trabajarlo desde el segundo semestre. Cuando terminé el segundo*



Figura 2

*semestre, terminé todas las materias y me regresé a Medellín, esos últimos meses de comisión los dediqué a hacer el trabajo de campo y laboratorio, y al terminar el semestre ya tenía el informe listo, lo mandé con el director, el profesor Herrón.*

## **2.2. ¿Cómo hizo para encontrar referencias bibliográficas si el tema era poco conocido?**

*No habían tantas, pero uno se iba orientando. La verdad es que ese también es un tema que se conocía en otras partes hacía rato, pero se tenía la creencia de que no se presentaba en zona tropical, que era un problema de latitudes medias y de zonas desérticas o semidesérticas, y nadie le había prestado atención en zonas húmedas, pero encontré artículos de 1945 hablando ya del tema, en la zona seca por ejemplo del sur de Estados Unidos. Me encontré un artículo de 1947 o 1948 de trabajos hechos en terrenos secos de Australia. El primer reporte que se hizo sobre hidrofobicidad de suelos en zonas húmedas en el mundo, fue el artículo que nosotros escribimos de la tesis.*



### 2.3. ¿Qué profesor lo marcó en su carrera?

*Con el profesor Herrón me terminé de “encarretar” en suelos en el pregrado, y un profesor en Bogotá, en la especialización, Leónidas Mejía me orientó en lo que me he dedicado después de que entré aquí, que es en Génesis y clasificación de suelos.*

### 2.4. ¿Qué diferencias encuentra entre el estudiante universitario de su época con el actual?

*Lo que más me llama la atención a mí es que estos muchachos hoy tienen tantos recursos que desperdician mucho, no se les ve ganas de hacer las cosas, no se les ve interés por avanzar en las cosas que uno dice. Todo lo quieren fácil y sin esfuerzo. En la época de nosotros, como era complicado hacer tantas cosas, había que estudiar todo el tiempo, no teníamos días de fiesta, aquí nos encontrábamos los sábados hasta tarde y los domingo estábamos en la casa de algún compañero trabajando, pero ahora, a estos muchachos no se les ve el interés que uno tenía en esa época por hacer las cosas, y por hacer las cosas bien hechas. El problema no es sólo de los estudiantes de ahora, ese problema se ha manifestado en todas las actividades humanas actuales: a la gente se le olvidó trabajar, a la gente se le olvidó hacer las cosas bien hechas, las hacen porque toca, porque no hay más que hacer, y uno lo ve en todo: ponga a hacer algo y el resultado no era lo que usted se imaginaba, es hecho a la brava, lo único que les interesa es la plata, ese gusto por el trabajo bien hecho es el que se ha estado perdiendo. La gente debería haber tomado la otra ruta: si tienen más facilidades utilícenlas para mejorar sus cosas, no le dejen todo a la tecnología porque le dejamos a la máquina, a la herramienta y estamos descargando la responsabilidad en esa ayuda y nos escudamos en que ella es capaz de hacerlo todo y no le prestamos atención al cuento.*

## 3. DE SU ACTIVIDAD DOCENTE E INVESTIGATIVA

### 3.1. ¿De su producción académica qué lo hace sentirse más orgulloso?

*Para mí hay dos cosas que me dan mucha satisfacción: la primera es el libro que tenemos hoy para los estudiantes de ciencias agrarias: *El suelo: origen, propiedades, espacialidad*. Creo que lo hice con la convicción de que era un documento que iba a ser importante para que los estudiantes y egresados tuviesen una fuente de información asequible y fácil de entender, con ilustraciones de las cosas que tenemos aquí. Aparentemente un buen porcentaje de ese objetivo se ha cumplido, por los comentarios que me llegan de la gente que lo ha utilizado; y el segundo es un libro que me publicó la Editorial de la Universidad en Bogotá, sobre lo que ha sido mi trabajo de investigación más fuerte: *Repelencia al agua en Andisoles de Antioquia*. Se publicó en el 2011, se hizo una edición en una serie de publicaciones muy especializadas de la Universidad, para un público muy restringido,*

*es para un grupo de personas muy pequeño pero tiene la ventaja de que tuvo divulgación a nivel mundial. La Editorial le hizo una divulgación en internet muy importante a la edición digital, yo he recibido comentarios de autores que han consultado el libro. Esas dos cosas me han dado mucha satisfacción en la parte académica.*



Figura 3: Profesor Daniel frente al Yarumo

### **3.2. ¿Qué recomendación le hace a la Universidad desde su experiencia?**

*Yo pensaría que hay muchas cosas que hay para recomponer, teniendo la retrospectiva de lo que fue en las generaciones de nosotros. Yo creo que la Universidad no debería perder de vista la misión docente que tiene, se le debería dar más énfasis a esta actividad. Yo veo que se está avanzando en la dirección en que si la persona termina su ciclo de formación en el pregrado de hoy, no tiene una posibilidad laboral amplia porque si no hace posgrado puede estar fuera del mercado. Entonces, yo pienso que la capacitación a esos niveles altos la va pidiendo el mismo entorno, el desarrollo que éste va teniendo. Pero es que yo me pongo a ver, ¿cuál es el desarrollo que tenemos en el país?, ¿en qué vamos a utilizar cien o doscientos doctores que graduamos al año?, no tenemos que ponerlos a hacer, estamos frustrando cien doctores al año que no van a salir a un mercado laboral, que no*

*se van a ubicar porque están sobredimensionados para ciertos trabajos y no le pueden pagar lo que deberían ganar por la capacitación que tienen, eso lo he visto con familiares míos, donde los han sacado de convocatorias porque tienen más de lo que el empleador necesita. Pero el profesional que estamos graduando no es capaz de desempeñarse en lo que debería hacer en su profesión, porque le quitamos un mundo de materias para montar los posgrados. Aquí se hizo la reforma académica eliminando las líneas de profundización que se habían creado con Antanas Mockus y con eso se montaron los posgrados que tiene ahora la Universidad, las maestrías de hoy ¿qué son?, son las líneas de profundización que tenían los pregrados antes.*



Figura 4: Profesor Daniel en Guatapé

*Yo terminé mi carrera con un nivel superior a un Magister de ahora. Con el pregrado de hoy, con toda seguridad yo tuve mucha mejor preparación que la que puede tener hoy un Magister por los contenidos y por la práctica. Yo estudié aquí y no teníamos ningún problema para hacer prácticas de campo, nadie preguntaba nada. Los buses de la Universidad estaban para hacer salidas, porque la Universidad contrataba transporte para llevar y recoger a los trabajadores y estudiantes y hacían cuatro rutas al día por los barrios, incluyendo a Envigado. La Universidad tenía un convenio con los buses de Robledo, ellos se parqueaban aquí y los buses de la Universidad eran para salidas de campo. Hoy se va a solicitar una salida y todo se complica, entonces claro, nosotros conocíamos el campo, hablábamos con los campesinos, manejábamos tractores, eso no lo veo hoy.*

*Yo digo que mientras la Universidad no cambie la necesidad de estarse autofinanciando, es imposible mejorar la parte académica. La investigación no le está enseñando a la Universidad porque es iniciativa de cada uno, o viene de otra parte, y la Universidad no pone plata para la investigación.*

## Referencias

- Jaramillo Jaramillo, D. F., Álvarez Mejía, F. & González Sánchez, H., (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada. *Revista Ces Medicina Veterinaria Y Zootecnia*, 3(2), 10–19.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1990). Áreas homogéneas agropecuarias de tercer orden. *Boletín de Ciencias De La Tierra*, 9, 12–25.
- Duque Zapata, J. R., Arbeláez Mesa, S. P., Jaramillo Jaramillo, D. F., León Peláez, J. D. (2004). Hidrofobicidad en Andisoles bajo robleal (*Quercus humboldtii*) y plantaciones forestales (*Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*) en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 57(2), 2423–2434.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2005). Humedad crítica y repelencia al agua en Andisoles Colombianos bajo cobertura de *Pinus Patula* Schltl y Cham. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 58(2), 2893–2906.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2005). Efectos de la Variabilidad Sistemática en Experimentos de Fertilización con Frijol. Primera Siembra. *Revista Facultad Nacional De Agronomía - Medellín*, 58(1), 2717–2732.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2006). Repelencia al agua en suelos una síntesis. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30(115), 215–232.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2006). Efecto de la variabilidad sistemática de la producción de frijól en experimentos de fertilización. Segunda siembra. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 59(1), 3147–3165.
- Jaramillo Jaramillo, D. F., Parra Sánchez, L. N., Florez Molina, M. T. (2006). Caracterización de un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, Colombia. *Revista Suelos Ecuatoriales*, 36(1), 61–71.
- Florez Molina, M. T., Parra Sánchez, L. N., Jaramillo Jaramillo, D. F. (2006). Los fitolitos como herramienta pedogenética en un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Colombia. *Revista Suelos Ecuatoriales*, 36(1), 43–51.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. & Vanegas Villa H. A., (2007). Efecto de la temperatura de secado sobre el grado y la variabilidad espacial de la repelencia al agua en Andisoles de Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 60(2), 4025–4035.

- Jaramillo Jaramillo, D. F. & Caballero Mejía, B. B. (2007). Humedad crítica y repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Cupressus lusitanica* y *Quercus humboldtii* en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 60(2), 4001–4024.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1990). Relación fisiografía suelos en la parte plana del Valle del Cauca, en el sector de Buga-Sonso. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 9, 1–11.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. & González Santamaría, L. H. (1990). Relación fisiografía-suelo en la zona aledaña a la autopista Medellín- Bogotá, entre río Claro y el río Magdalena. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 9, 26–38.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1989). Relación fisiografía-suelos en el cañón del río Porce, entre las quebradas La Violeta y La Ahuyamera (Antioquia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 42(1), 45–71.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. & González Santamaría, L. H. (1991). Análisis fisiográfico para el estudio de las comunidades vegetales. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 10, 23–40.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. & Herron, F. (1991). Evaluación de la repelencia al agua de algunos Andisoles de Antioquia bajo cobertura de *Pinus patula*. *Acta Agronómica*, 41(1), 79–85.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1992). Relación fisiografía-suelos en el valle del río Riachón y paisajes adyacentes. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 11, 105–126.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. & Parra Sánchez, L. N. (1993). Aspectos biofísicos generales del páramo de Frontino. *Revista del I.C.N.E. - Instituto De Ciencias Naturales Y Ecología*, 4(2), 81–96 .
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1995). Efecto de la extracción con solventes orgánicos en Andisoles repelentes al agua de Antioquia. *Revista del I.C.N.E. - Instituto de Ciencias Naturales y Ecología*, 6, 65–78.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1996). Estudio de una cronosecuencia de suelos en el Bajo Cauca (Antioquia). *Revista Facultad Nacional De Agronomía - Medellín*, 49(1-2), 53–64.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1997). Relación fisiografía-suelos en las áreas colinadas bajas de la zona comprendida entre La Pintada y el río Poblano (Antioquia). *Revista del I.C.N.E. - Instituto de Ciencias Naturales y Ecología*, 6(2), 43–51.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1997). Relación fisiografía-suelos en los alrededores de la cabecera municipal de Amagá, suroeste antioqueño. *Revista del I.C.N.E. - Instituto de Ciencias Naturales y Ecología*, 6(2), 53–61.

- Jaramillo Jaramillo, D. F., Ortiz, C., Pelaez, C. A., Zapata, R. A. & Uribe, C. (1997). Extracción de sustancias hidrofóbicas de Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño, con solventes polares. *Revista Facultad Nacional De Agronomía - Medellín*, 50(2), 19–43.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (1999). Caracterización química de Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 52(2), 657–673.
- Jaramillo Jaramillo, D. F., Hendrickx, J. M. H., Dekker, L. W. & Ritsema, C. J. (2000). Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology*, 231-23(433-434), 105–111.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2000). Caracterización preliminar de los compuestos hidrofóbicos removidos de Andisoles repelentes al agua de Antioquia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín* 53(1), 801–821.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2000). Clasificación taxonómica de los suelos del altiplano de San Félix, departamento de Caldas. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 53(2), 1059–1077.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2000). Efecto del secado de las muestras sobre la extracción selectiva de Fe y Al activos en Andisoles del norte de la cordillera central Colombiana. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 53(2), 1077–1090.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. & Acevedo, N. (2001). El componente sistemático de la variabilidad de algunos parámetros de producción en palma africana adulta (*Elaeis guineensis* Jacq) en Casanare. *Revista Facultad Nacional De Agronomía - Medellín*, 54(1-2), 1241–1249.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2001). Evaluación del método MED para medir el grado de repelencia al agua de Andisoles del oriente antioqueño. *Revista del I.C.N.E. - Instituto De Ciencias Naturales y Ecología*, 7(1), 51–62.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2001). Evaluación del método WDPT para medir el grado de repelencia al agua de Andisoles del oriente antioqueño. *Revista del I.C.N.E. - Instituto de Ciencias Naturales y Ecología*, 7(1), 63–70.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2001). Efecto de la repelencia al agua sobre la estructura en los Andisoles. *Revista del I.C.N.E. - Instituto de Ciencias Naturales y Ecología*, 7(1), 71–88.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2008). Variabilidad espacial de rango largo de algunas propiedades químicas de Andisoles repelentes al agua de Antioquia. *Suelos Ecuatoriales*, 38(1), 60–74.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2008). Variabilidad espacial de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del oriente antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional De Agronomía - Medellín*, 61(2), 4588–4599.

- Restrepo Osorno, Y. C., Jaramillo Jaramillo, D. F., Patiño Hoyos, L. F., Castañeda, D. A., (2008). Efecto de los namátodos en la cantidad y calidad de raíces y métodos de evaluación. *Revista Politécnica*, 4(7), 47–57.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del oriente antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 62(1), 4907–4921.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. & Caballero Mejía, B. B. (2014). Variabilidad espacial del grado de repelencia al agua en un Andisol de Antioquia bajo cobertura de pinus patula. *Revista Politécnica*, 10(18), 47–56.
- Florez Molina, M. T., Parra Sánchez L. N. & Jaramillo Jaramillo, D. F. (2009). Diferencias pedogenéticas a partir de los fitolitos entre dos perfiles de suelos: Humedal Jaboque - cuenca de Piedras Blancas. *Suelos Ecuatoriales*, 39(1), 88–94.
- Jaramillo Jaramillo, D. F., Castañeda, D. A. & Cotes Torres, J. M. (2010). Componentes de la variabilidad espacial en el manejo por sitio específico en banano. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 45(8), 836–845.
- Jaramillo Jaramillo, D. F., Restrepo Mona, C. A., Álvarez Mejía, F., Anaya Gómez, M. L. & González Sánchez, H. (2011). Variables físicas que explican la variabilidad de un suelo aluvial y su comportamiento espacial. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 46(12), 1707–1715.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2011). Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(134), 23–33.
- Posada Restrepo, W. A. & Jaramillo Jaramillo, D. F. (2011). Procesos antrópicos y procesos naturales a escala de sitio. Un caso de geoarqueología en el municipio de Frontino, noroccidente colombiano. *Arqueología del Área Intermedia*, 8, 121–158.
- Jaramillo Jaramillo, D. F., Sadegan, S. & Lince, L. A. (2013). Variabilidad espacial de las bases en un Andisol de la zona cafetera central colombiana. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 33, 111–124.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2012). Variabilidad espacial de algunas propiedades de un mollisol de clima cálido seco de Antioquia (Colombia). *Agronomía*, 20(2), 7–17.
- Jaramillo Jaramillo, D. F., Pareja, J., Molina, A., Hahn, D. W. & Lopez, S. (2013). Laser ablationlaser induced breakdown spectroscopy for the measurement of total elemental concentration in soils. *Applied Optics*, 52(11), 2470–2477.

- Jaramillo Jaramillo, D. F., Florez Molina, M. T., Jaramillo, J. M. & Parra Sánchez, L. N. (2013). Paleosuelos del mioceno en el desierto de la tatacoa". Paleosuelos del mioceno en el desierto de la tatacoa. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(143), 229–244.
- Jaramillo Jaramillo, D. F., Castañeda, D. A. & Cotes Torres, J. M. (2014). Selección de propiedades del suelo espacialmente relacionadas con producción en el cultivo del banano. *Ciencia Del Suelo* - *Revista De La Asociación Argentina De La Ciencia Del Suelo*, 32(1), 73–83.



# GRUPOS DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE CIENCIAS<sup>a</sup>

**RESUMEN:** Esta sección tiene como objetivo dar a conocer los grupos de investigación de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. En esta edición se relacionan los grupos de investigación de la Escuela de Física con la información de los últimos dos años (nombre del grupo de investigación, líder del grupo, integrantes, proyectos vigentes y publicaciones recientes asociadas al grupo, entre otros aspectos).

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la Escuela de Física tiene cinco grupos de investigación clasificados en Colciencias en las categorías A1 (uno grupo) y B (tres grupos).

## 2. MATERIALES CERÁMICOS Y VÍTREOS

La información de este grupo en Colciencias se puede encontrar en el siguiente vínculo:

<http://scienti.colciencias.gov.co:8080/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000001583>

Clasificado en Colciencias en la categoría B. Liderado por la profesora Claudia Patricia García García. Entre los objetivos del grupo está: Desarrollar y difundir el conocimiento y la investigación en el área de materiales cerámicos y vítreos y de sus materias primas; apoyar los programas de doctorados y maestrías de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, que incluyan la línea de investigación de los materiales cerámicos y vítreos; incidir con los resultados de la investigación en los campos de investigación y desarrollo proyectados en el medio productivo nacional.

### 2.1. Líneas de investigación

Entre las líneas de investigación de este grupo se encuentran: Biomateriales, caracterización de materiales, cerámica avanzada, cerámica tradicional, materiales vítreos y vitrocerámicos, procesamiento cerámico, recubrimientos.

---

<sup>a</sup> *Revista de la Facultad de Ciencias*, 5 (2), 137–151.

## 2.2. Profesores y estudiantes asociados al grupo

Los siguientes profesores integran este grupo de investigación: Claudia Patricia García García, Carlos Guillermo Paucar Álvarez, Pilar García Cardona, Jair de J. Gaviria Arango, Jairo Humberto Marín Cadavid, Oswaldo Morán Campaña, Marlon Rincón Fulla, Wilmer de Jesús Saldarriaga Agudelo, Víctor Hugo Zapata Sánchez y Néstor Ricardo Rojas Reyes.

También hacen parte del grupo los siguientes estudiantes: José Alejandro Bedoya Villada, Juan Fernando Calle Herrera, Estefanía Correa Muñoz, Daniel Fonnegra García, Esteban Gutiérrez Correa, Jorge Luis Izquierdo Núñez, Natalia Isabel Jaramillo Gómez, Alex Arbey Lopera Sepúlveda, Ángela Yulieth Marín Gómez, Daniel Enrique Mercado Borja, Paula Alejandra Ospina Gómez, Jhon Alexander Ramírez Idárraga, Sebastián Sierra Pérez, Yoder Alberto Suaza Tabares, Mónica María Taborda, Lina Constanza Villa Vargas, José Gregorio Doria Andrade, Leandro Gómez Plata, Adrián Gómez Zapata.

## 2.3. Publicaciones en revistas especializadas (2014–2015):

Gómez, L., Galeano, V., Parra, R., Michel, C. R., Paucar, C., & Morán, O. (2015). Carbon dioxide gas sensing properties of ordered oxygen deficient perovskite  $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$  (Ln= La, Eu). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 1455–1460.

Izquierdo, J. L., Bolaños, G., & Morán, O. (2015). Effect of the Al-doping on the electrical and thermoelectric response of  $\text{TbMnO}_3$  polycrystalline samples: Evidence of polaronic transport. *Journal of Alloys and Compounds*, 652, 292–297.

García, C., Toro, A. (2015). Bioactive sol gel coatings applied by pneumatic spray onto aisi 316l stainless steel: *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* ISSN: 0255-6952, 2015 vol:36 fasc.: 2 págs. 1–6.

Betancur, C., Hernández, V., Restrepo, N., Villegas, P., García, C. P., & Arroyave, J. C. (2015). Evaluación del efecto citotóxico de un nanomaterial compuesto de alúmina y nanotubos de carbono funcionalizado con APTS en células Vero. *Biotecnología Aplicada*, 32(4), 4241–4246.

Gómez, A., Galeano, A., Saldarriaga, W., Arnache, O., & Morán, O. (2015). Deposition of  $\text{YBaCo}_4\text{O}_{7+\delta}$  thin films on (001)- $\text{SrTiO}_3$  substrates by dc sputtering. *Vacuum*, 119, 7–14.

Gómez, A., Izquierdo, J. L., Astudillo, A., Martínez, J., Bolaños, G., Meza, J. M.,... & Morán, O. (2015). Structural and mechanical properties of  $\text{YBaCo}_4\text{O}_{7+\delta}$  thin films deposited on c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

3 substrates by dc magnetron sputtering. *Ceramics International*, 41(10), 12686–12692.

Suaza, Y. A., Fulla, M. R., Posada-Rudas, J. G., & Marín, J. H. (2015). Off-axis magneto-donor impurity in a non-uniform height quantum ribbon. *Superlattices and Microstructures*, 87, 64–70.

Correa, R., Gutiérrez, W., Mikhailov, I., Fulla, M. R., & Marín, J. H. (2015). Dimensionality effect on two-electron energy spectrum: A fractional-dimension-based formulation. *Physics Letters A*, 379(22), 1457–1463.

Marín C., J. H., Rincón F., M., Suaza T., Y. (2015). Hydrostatic pressure, temperature and aluminum concentration effects on the ground state of coupled donors in a GaAsGa  $1-x$  Al  $x$  As quantum well: *Physica Status Solidi (B): Basic Research* ISSN: 1521–3951, vol:252 fasc: 4 pages: 678–682.

Astudillo, A., Izquierdo, J. L., Gómez, A., Bolaños, G., & Morán, O. (2015). Ferromagnetism at room temperature in Co-doped KNbO<sub>3</sub> bulk samples. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 373, 86–89.

Izquierdo, J. L., Astudillo, A., Bolaños, G., Zapata, V. H., & Morán, O. (2015). Dielectric response of Al-substituted multiferroic TbMnO<sub>3</sub> at high temperatures. *Ceramics International*, 41(1), 1285–1296.

Izquierdo, J. L., Astudillo, A., Bolaños, G., Gómez, A., Arnache, O., Parra, C., & Morán, O. (2015). Evidence of Ferromagnetic Response of TbMnO<sub>3</sub> Thin Films at High Temperatures. *Journal of Low Temperature Physics*, 179(1–2), 48–54.

Izquierdo, J. L., Forero, A., Bolanos, G., Zapata, V. H., & Morán, O. (2014). Role of aluminum ions on the dielectric and conducting properties of multiferroic Tb  $1-x$  Al  $x$  MnO<sub>3</sub>: Study at high temperatures. *Solid State Sciences*, 38, 62–68.

Izquierdo, J. L., Bolaños, G., Zapata, V. H., & Morán, O. (2014). Dielectric relaxation and ac conduction in multiferroic TbMnO<sub>3</sub> ceramics: Impedance spectroscopy analysis. *Current Applied Physics*, 14(11), 1492–1497.

Suaza, Y. A., Rincón Fulla, M., & Marín, J. H. (2014). Hydrostatic pressure and magnetic field effects on the energy structure of D-ion confined in a toroidal quantum ring. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (71), 213–220.

Suaza, Y. A., Rincón Fulla, M., & Marín, J. H. (2014). Hydrostatic pressure and magnetic field

effects on the energy structure of D-ion confined in a toroidal quantum ring. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (71), 213–220.

Rincón-Fulla, M., Humberto-Marín, J., & Alberto-Suaza, Y. (2014). Two-electron energy levels in coupled nanorings: the hydrostatic pressure and magnetic field effects. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (73), 166–175.

R-Fulla, M., Marín, J. H., Suaza, Y. A., Duque, C. A., & Mora-Ramos, M. E. (2014). States of an on-axis two-hydrogenic-impurity complex in concentric double quantum rings. *Physics Letters A*, 378(30), 2297–2302.

Lopera, A., Ramírez, M. A., García, C., Paucar, C., & Marín, J. (2014). Influence of Sm 3+ doping on the dielectric properties of CaCu 3 Ti 4 O 12 ceramics synthesized via autocombustion. *Inorganic Chemistry Communications*, 40, 5–7.

Vallejos, E., Galeano, V., Gómez, L., Izquierdo, J. L., Montoya, J. F., Mera, J.,... & Morán, O. (2014). Magnetic response of polycrystalline YBaCo 4 O 7+  $\delta$  synthesized through the physical and chemical route: The role of phase inhomogeneities. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 360, 59–66.

Vallejos, E., Galeano, V., Gómez, L., Mera, J., Córdoba, C., Gómez, A.... & Morán, O. (2014). On the Magnetic Behavior of Polycrystalline Single-Phase YBaCo4O7+  $\delta$  Obtained by Soft Chemical Synthesis. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 27(6), 1435–1442.

Gómez, L., Galeano, V., Vallejo, E., Gómez, A., Paucar, C., & Morán, O. (2014). On the magnetic behavior of polycrystalline RBaCo205+  $\delta$  synthesized by solid state and wet chemical routes. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 480, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.

Vallejos, E., Galeano, V., Gómez, L., Izquierdo, J. L., Montoya, J. F., Mera, J.,... & Morán, O. (2014). Magnetic response of polycrystalline YBaCo 4 O 7+  $\delta$  synthesized through the physical and chemical route: The role of phase inhomogeneities. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 360, 59–66.

Rincón-Fulla, M., Humberto-Marín, J., & Alberto-Suaza, Y. (2014). Two-electron energy levels in coupled nanorings: the hydrostatic pressure and magnetic field effects. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (73), 166–175.

Fullaa, M. R., Marínb, J. H., Gutiérrezc, W., Duqued, C. A., & Mora-Ramosd, M. E. (2014). 2

Molecular Complex in Ring-Like Nanostructures: Hydrostatic Pressure and Electromagnetic Field Effects.

Lopera, A., Ramirez, M. A., García, C., Paucar, C., & Marín, J. (2014). Influence of Sm<sup>3+</sup> doping on the dielectric properties of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ceramics synthesized via autocombustion. *Inorganic Chemistry Communications*, 40, 5–7.

Jaramillo, N., Paucar, C., & García, C. (2014). Influence of the reaction time and the Triton x-100/Cyclohexane/Methanol/H<sub>2</sub>O ratio on the morphology and size of silica nanoparticles synthesized via sol-gel assisted by reverse micelle microemulsion. *Journal of Materials Science*, 49(9), 3400–3406.

Vallejos, E., Galeano, V., Gómez, L., Mera, J., Córdoba, C., Gómez, A.... & Morán, O. (2014). On the Magnetic Behavior of Polycrystalline Single-Phase YBaCo<sub>4</sub>O<sub>7+δ</sub> Obtained by Soft Chemical Synthesis. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 27(6), 1435–1442.

R-Fulla, M., Marín, J. H., Gutiérrez, W., Mora-Ramos, M. E., & Duque, C. A. (2014). Essential properties of a molecular complex confined in ring-like nanostructures under external probes: Magnetic field and hydrostatic pressure. *Superlattices and Microstructures*, 67, 207–220.

Mora-Ramos, M. E., & Duque, C. A. (2014). Essential properties of a D<sup>2+</sup> molecular complex confined in ring-like nanostructures under external probes: Magnetic field and hydrostatic pressure. *Superlattices and Microstructures*, 67, 207–220.

### 3. INSTRUMENTACIÓN CIENTÍFICA E INDUSTRIAL

La información de este grupo en Colciencias se puede encontrar en el siguiente vínculo:

<http://scienti.colciencias.gov.co:8080/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000002051>

Clasificado en Colciencias en categoría B. Liderado por el profesor Alcides De Jesús Montoya Cañola. Entre los objetivos del grupo está: Diseñar y construir instrumentos usando software, equipos mecánicos y electrónicos útiles en la solución de problemas del medio y la apropiación de tecnología por parte del país. Trabajar en áreas de Programación orientada a objetos, ingeniería de software e instrumentación virtual, desarrollando productos de software. Desarrollar investigaciones en el área de redes de sensores, donde se integra la instrumentación y las medidas de variables físicas, con las redes y sistemas distribuidos. Trabajar en la creación de la línea de profundización en Instrumentación científica con el fin de apoyar las labores académicas propias del pregrado y postgrado de la

Escuela de Física. Desarrollar soluciones de software, hardware y redes de sensores para solución de problemas en Agricultura de precisión y medio ambiente. Apoyar la labor de diseño de elementos y componentes electrónicos para los otros grupos de investigación existentes en la Escuela de Física y la Universidad. Apoyar los proyectos de la Escuela de Física y los laboratorios en los aspectos concernientes a la instrumentación.

### **3.1. Líneas de investigación**

Las siguientes son las líneas de investigación adscritas al grupo: desarrollo de software especializado en instrumentación., electrónica aplicada y herramientas: proyecto Mecano, instrumentación virtual, instrumentación y sensores para agricultura de precisión, procesamiento opto-digital de señales, redes de sensores, sistemas embebidos.

### **3.2. Profesores asociados al grupo**

Los siguientes profesores integran este grupo de investigación: Alcides De Jesús Montoya Cañola, Wilmer De Jesús Saldarriaga Agudelo, Rodrigo Acuña Herrera, Diego Luis Aristizábal Ramírez, Juan Fernando Botero Cadavid, Jorge Iván García Sucerquia, Fredy Edimer Hoyos Velasco, Nerio Andrés Montoya Giraldo, Ittalo Francisco Pezzotti Escobar, Sigifredo Solano González y Luis Gonzalo Vargas Quiroz.

### **3.3. Publicaciones en revistas especializadas (2015–2016)**

Garcés Gómez, Y. A., Toro García, N., & Hoyos, F. E. (2016). New Application's Approach to Unified Power Quality Conditioners for Mitigation of Surge Voltages. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2016.

Velasco, H., Edimer, F., Casanova Trujillo, S., & Vergara Pérez, D. D. C. (2016). Dinámica de un convertidor boost con inclusión de resistencias parásitas controlado con ZAD. *Ingeniería Energética*, 37(2), 144–153.

Acuña, R., Múnera, N. (2015) Study of Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber Intrated with Carbon Disulde Using Super-Mode Theory. *Proceedings of Spie, The International Society for Optical Engineering* ISSN: 0277-786X, 2015 vol: 9634 fasc: N/A págs: 96347A–1–96347A–4.

Toro-García, N., Garcés-Gómez, Y. A., & Hoyos-Velasco, F. E. (2015). Voltage regulation in a power inverter using a quasi-sliding control technique. *Dyna*, 82(192), 52–59.

Hoyos Velasco, F. E., García, N. T., & Garcés Gómez, Y. A. (2015). Adaptive Control for Buck Power Converter Using Fixed Point Inducting Control and Zero Average Dynamics Strategies. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 25(04), 1550049.

Meneses, E., Arango, G., Correa, G., Ruíz, O., Vargas, L. G., & Pérez, J. C. (2015). Detection of *Eurhizococcus colombianus* (Hemiptera: Margarodidae) in blackberry plants by near-infrared spectroscopy. *Acta Agronómica*, 64(3), 280–288.

Areiza, Y. A., Garcés, S. I., Santa, J. F., Vargas, G., & Toro, A. (2015). Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International*, 82, 274–279.

### 3.4. Proyectos vigentes

- Modelo de Detección y Seguimiento de Anomalías en Entornos Monitoreados por Agentes Robóticos Inteligentes. 2012/6 – Actual.
- Programa nacional de fotónica para el desarrollo de sensores ópticos y sistemas de medición en el rango micro y nanométrico. 2012/2 – Actual.
- Dispersive Wave generation in Fiber optics. 2011/10 – Actual.
- Supercontinuum Generation and Dispersive Wave in a highly birefringent fiber optics 2010/6 – Actual.
- Design of High-Sensitivity Fiber Optic Surface Plasmon Resonance Sensor 2009/2 – Actual.
- Optical Sensing Network for Power System Fault Detection and Electrical Current sensor based on Fiber Optics. 2009/2 – Actual.
- Sensores basados en redes de Bragg a fibras ópticas. 2002/2 – Actual.

## 4. FOTÓNICA Y OPTO-ELECTRÓNICA

La información de este grupo en Colciencias la encuentra en el siguiente vínculo:

<http://scienti.colciencias.gov.co:8080/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000000930>

Clasificado en Colciencias en la categoría B. Liderado por el profesor Pedro Ignacio Torres Trujillo. Hacen parte del grupo los siguientes profesores: Rodrigo Acuña Herrera, Juan Fernando Botero Cadavid, Jorge Iván García Sucerquia, William Ernesto Rodríguez Córdoba y Sigifredo Solano González.

#### 4.1. Líneas de investigación

Las siguientes son las líneas de investigación del grupo: Dispositivos, subsistemas y sistemas para comunicaciones ópticas y sensores fotónicos, Fotónica No-lineal, materiales fotónicos y optoelectrónicos, nanofotónica.

#### 4.2. Publicaciones en revistas especializadas (2015–2016)

Jaramillo, C., Morales, R., Rodríguez, W. (2016). Absorption and Emission Spectra of Anthracene-9-Carboxylic Acid in Solution within the Polarizable Continuum Model: A Long-Range Corrected Time Dependent Density Functional Study. *Advances in Quantum Chemistry* ISSN: 0065–3276, 2016 vol: 72 fasc: N/A págs: 61–94.

Ortiz, N. M., Alvarez, C. A., & Herrera, R. A. (2015). Study of supercontinuum generation in photonic crystal fiber infiltrated with carbon disulfide using super-mode theory. In *International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)* (pp. 96347A–96347A). International Society for Optics and Photonics.

Hurtado, C., Herrera, R. A., & Torres, P. (2015). Nonlinear acousto-optics coupling in fiber optics: model based on local bending for LP cladding modes. In *International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)* (pp. 963479-963479). International Society for Optics and Photonics.

Torres, P. (2015) Fiber Bragg grating strain sensor for hard rocks. *Proceedings of Spie, The International Society for Optical Engineering* ISSN: 0277–786X, 2015 vol: 9634, fasc: N/A págs: 9634491–9634494.

Castro-Caicedo, A., Nieto-Callejas, M. J., & Torres, P. (2015). Fiber Bragg grating strain sensor for hard rocks. In *International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)* (pp. 963449-963449). International Society for Optics and Photonics.

Velásquez-Botero, F., Reyes-Vera, E., & Torres, P. (2015). Some refractometric features of dual-core chirped microstructured optical fibers. In *International Conference on Optical Fibre Sensors*



Herrera, R. A., Rodríguez, C. A., & Torres, P. (2015). Generation of optical super-Gaussian pulses using tapered fibers. In International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24) (pp. 96347B-96347B). International Society for Optics and Photonics.

Herrera, R. A. (2015). Nonlinear pulse propagation in wavelength dependence of birefringence fiber optics. *Applied Optics*, 54(13), 3933–3936.

Hurtado, C., Herrera, R. A., & Torres, P. (2015). Nonlinear acousto-optics coupling in fiber optics: model based on local bending for LP cladding modes. In International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24) (pp. 963479-963479). International Society for Optics and Photonics.

### 4.3. Proyectos activos

- Dispositivo completamente de fibra óptica basado en fibra de cristal fotónico con electrodos integrados e infiltrada selectivamente con cristal líquido (All-fiber device based on photonic crystal fiber with integrated electrodes and selectively infiltrate. 2013/10 – Actual.
- Dispersive Wave generation in Fiber optics. 2011/10 – Actual.
- Técnicas Q-switching para el desarrollo de láseres pulsados completamente a fibra óptica (“Active Q-switch techniques for developing all-fiber pulsed lasers”) 2011/8 – Actual.
- Supercontinuum Generation and Dispersive Wave in a highly birefringent fiber optics. 2010/6 – Actual.
- Design of High-Sensitivity Fiber Optic Surface Plasmon Resonance Sensor. 2009/2 – Actual.
- Optical Sensing Network for Power System Fault Detection and Electrical Current sensor based on Fiber Optics. 2009/2 – Actual.

## 5. LÁSER Y ESPECTROSCOPIA ÓPTICA

La información de este grupo en Colciencias se puede ver en el vínculo:

<http://scienti.colciencias.gov.co:8080/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=0000000004383>

Liderado por el profesor Álvaro Efraín Bastidas Gustín. Entre los objetivos del grupo están: Fortalecer la capacidad científica y tecnológica humana del país a través de los programas de estudio de

las instituciones educativas a nivel de formación universitaria. Contribuir al conocimiento tecnológico del país a través de la transferencia de tecnología. Contribuir a la formación de una cultura científica en la sociedad colombiana a través de la divulgación y difusión del conocimiento científico universal. Promover acciones para captar fondos de diversas fuentes para el financiamiento de las actividades propuestas por el grupo. Mantener buen nivel académico e investigativo que permitan crear espacios para la capacitación, la motivación, y la eficiencia. Reconocer y promover de manera continua, valores como la equidad, el respeto a las personas y a su trabajo, la capacidad creativa y la libertad con responsabilidad.

Hacen parte de este grupo lo siguientes estudiantes: Camila Rodríguez Gómez y Juan Esteban Vélez Álvarez.

### 5.1. Líneas de investigación

Las siguientes líneas son desarrolladas por el grupo: Espectroscopía, Láseres y Aplicaciones, Óptica Atmosférica y LIDAR.

### 5.2. Publicaciones en revistas especializadas (2015–2016)

Guerrero-Rascado, J. L., da Costa, R. F., Bedoya, A. E., Guardani, R., Alados-Arboledas, L., Bastidas, Á. E., & Landulfo, E. (2014). Multispectral elastic scanning lidar for industrial flare research: characterizing the electronic subsystem and application. *Optics express*, 22(25), 31063–31077.

Guerrero-Rascado, J. L., Landulfo, E., Antuña, J. C., Barbosa, H. M. J., Barja, B., Bastidas, A. E., Gouveia, D. A. (2014). Towards an instrumental harmonization in the framework of LALINET: dataset of technical specifications. In *SPIE Remote Sensing* (pp. 92460O–92460O). International Society for Optics and Photonics.

Nisperuza, D. J., Bedoya, A. E., Alegría, D. L., Múnera, M., Jiménez, J. F., Zapata, C. E., & Bastidas, Á. (2014). Lidar measurements and wavelet covariance transform method to estimate the atmospheric boundary layer heights in Medellín, Colombia. *Opt. pura Apl*, 47(2), 123–130.

Barbosa, H. M. J., Lopes, F. J. S., Silva, A., Nisperuza, D., Barja, B., Ristori, P. R.,... & Landulfo, E. (2014). The first ALINE measurements and intercomparison exercise on lidar inversion algorithms. *Optica pura y aplicada*, 47(2), 99–108.

Nisperuza, D. J. (2011). Development of a tropospheric LIDAR for observations of the Planetary Boundary Layer above Medellin, Colombia. *Journal of Physical Science and Application*, 1(3), 163.

Botero, G., Gómez, D., Nisperuza, D., & Bastidas, A. (2011). Design and performance of a sealed CO<sub>2</sub> laser for industrial applications. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 274, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.

Montoya, J. F., Izquierdo, J. L., Causado, J. D., Bastidas, A., Nisperuza, D., Gómez, A.,... & Morán, O. (2011). Optical characterization of sputtered YBaCo<sub>4</sub>O<sub>7+δ</sub> thin films. *Solid State Sciences*, 13(2), 310–313.

### 5.3. Proyectos vigentes

- Desarrollo instrumental de técnicas espectralradiométricas para estudios de la relación radiación solar y calidad del aire. Convocatoria para conformar bancos de elegibles para formación de alto nivel para Ciencia, Tecnología e Innovación No. 617 en el cap. 2014/5 – Actual.
- Desarrollo experimental de un espectralradiómetro solar. 2011/8 – Actual.
- Diseño de un sistema multispectral solar. 2011/8 – Actual.
- Nasa-Aeronet Colombia Project: Exploratory and long-term aerosol remote sensing in the Tropical Andes, and remote sensing of tropical aerosols at Medellín, Colombia. 2011/7 – Actual.
- Desarrollo de un proyector láser x-y. 2011/7 – Actual.
- Exploratory and long-term aerosol remote sensing in the Tropical Andes, and remote sensing of tropical aerosols at Medellín, Colombia. 2011/7 – Actual.
- Sensado Remoto de Aerosoles Atmosféricos en el Valle de Aburrá. 2011/2 – Actual.
- Implementación de un Lidar Troposférico a dos Longitudes de Onda. 2011/1 – Actual.
- Diseño y acople de la óptica de emisión y de detección para un Lidar Troposférico a dos longitudes de onda. 2010/8 – Actual.
- Optimización de un algoritmo de simulación de hologramas para la solución del efecto de proximidad; y Desarrollo de un holograma capaz de transformar un haz láser para aplicaciones de soldadura de microcontroladores y circuitos integrados. 2008/9 – Actual.

- Desarrollo de un LIDAR Troposférico. 2008/8 – Actual.
- Diseño y construcción de un Láser Industrial de Clase IV. 2008/1 – Actual.
- Desarrollo de un Microscopio Holográfico. 2007/7 ?– Actual.
- Diseño de un Espectrofotómetro ATR y un Láser IR para tratamiento térmico de textiles. 2007/4 – Actual.
- Implementación y Montaje de un Sistema de Visión Artificial para Realizar el Control de Calidad de Materiales Productivos. 2002/9 – Actual.
- Implementación de la Técnica de Espectroscopia de Fotoluminiscencia para caracterización Óptica de Materiales. 2002/1 – Actual.

## 6. ÓPTICA Y PROCESAMIENTO OPTO-DIGITAL

La información de este grupo en Colciencias la puede encontrar en el vínculo:

<http://scienti.colciencias.gov.co:8080/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=0000000001539>

Clasificado en Colciencias en categoría A1. Liderado por el profesor Jorge Iván García Sucerquia. Hacen parte de este grupo los profesores: Román Castañeda Sepúlveda, Juan Fernando Botero Cadavid.

Entre los objetivos del grupo están: Profundizar en los conocimientos e iniciar el desarrollo de destrezas investigativas en el campo de la Óptica. Dar soporte académico a los Programas Curriculares de la Sede y de las instituciones con las que la Sede tenga convenios vigentes o alianzas estratégicas en las áreas de ingeniería y ciencias exactas y naturales. Preparar a los estudiantes para adelantar trabajos de grado y continuar estudios de posgrado que incluyan el área de Óptica. Proporcionar formación avanzada en tópicos de Metrología Óptica, Instrumentación Óptica, Fibras Ópticas, Procesamiento de imágenes y Coherencia Óptica, Fotónica, Optoelectrónica.. Vincular estudiantes a los proyectos de investigación del Grupo de Óptica. Dirigir los Trabajos de Grado desarrollados por los estudiantes vinculados a la línea.

### 6.1. Líneas de investigación

A continuación se listan las líneas de investigación desarrolladas por el grupo: Holografía digital, metrología óptica, microscopia holográfica digital, modelamiento de campos ópticos, óptica y teoría de coherencia óptica.

**6.2. Publicaciones en revistas especializadas (2015-2016)**

Castañeda, R., Toro, W., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). Evaluation of the limits of application for numerical diffraction methods based on basic optics concepts. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(24), 5963–5970.

Garcia-Sucerquia, J. (2015). Microscopía holográfica digital sin lentes con resolución micrométrica y fuentes multispectrales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39, 20–28.

Castañeda, R., Hincapie, D., Bedoya, S., Herrera-Ramírez, J., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). Estudio del efecto de la relación de intensidades relativas entre la onda de referencia y la onda objeto en holografía digitalonda de referencia y la onda objeto en holografía digital. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39, 29–37.

Medina-Estrada, F., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). La luz a Antioquia llegó desde Austria y perdura. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39, 93–97.

Doblas, A., Sánchez-Ortiga, E., Martínez-Corral, M., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). Study of spatial lateral resolution in off-axis digital holographic microscopy. *Optics Communications*, 352, 63–69.

Trujillo, C., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). Comparative analysis of the modified enclosed energy metric for self-focusing holograms from digital lensless holographic microscopy. *Applied optics*, 54(16), 5102–5108.

Doblas, A., Hincapie-Zuluaga, D., Saavedra, G., Martínez-Corral, M., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). Physical compensation of phase curvature in digital holographic microscopy by use of programmable liquid lens. *Applied optics*, 54(16), 5229–5233.

Castañeda, R., Toro, W., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). Evaluation of the limits of application for numerical diffraction methods based on basic optics concepts. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(24), 5963–5970.

Hincapie, D., Herrera-Ramírez, J., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). Single-shot speckle reduction in numerical reconstruction of digitally recorded holograms. *Optics letters*, 40(8), 1623–1626.

Piedrahita-Quintero, P., Castañeda, R., & Garcia-Sucerquia, J. (2015). Numerical wave propagation in ImageJ. *Applied optics*, 54(21), 6410–6415.

Herrera-Ramirez, J., Vilaseca, M., Burgos, F. J., Font, L., Senserrich, R., & Pujol, J. (2015). Art-work imaging from 370 to 1630 nm using a novel multispectral system based on light-emitting diodes. *Color Research & Application*, 40(4), 398–407.

Trujillo, C. A., & Garcia-Sucerquia, J. (2014). Automatic method for focusing biological specimens in digital lensless holographic microscopy. *Optics letters*, 39(9), 2569–2572.

Herrera-Ramírez, J., Vilaseca, M., & Pujol, J. (2014). Portable multispectral imaging system based on light-emitting diodes for spectral recovery from 370 to 1630 nm. *Applied optics*, 53(14), 3131–3141.

Monroy-Ramirez, F., & Garcia-Sucerquia, J. (2014). Monitoring micro-mechanical changes in electronic circuit boards with digital holographic interferometry. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 125(9), 2113–2116.

Doblas, A., Sánchez-Ortiga, E., Martínez-Corral, M., Saavedra, G., & Garcia-Sucerquia, J. (2014). Accurate single-shot quantitative phase imaging of biological specimens with telecentric digital holographic microscopy. *Journal of biomedical optics*, 19(4), 046022–046022.

Sánchez-Ortiga, E., Doblas, A., Saavedra, G., Martínez-Corral, M., & Garcia-Sucerquia, J. (2014). Off-axis digital holographic microscopy: practical design parameters for operating at diffraction limit. *Applied optics*, 53(10), 2058–2066.

Sánchez-Ortiga, E., Martínez-Corral, M., Saavedra, G., & Garcia-Sucerquia, J. (2014). Enhancing spatial resolution in digital holographic microscopy by biprism structured illumination. *Optics letters*, 39(7), 2086–2089.

Botero-Cadavid, J. F., Wild, P., & Djilali, N. (2014). Temperature response and durability characterization of an optical fiber sensor for the detection of hydrogen peroxide. *Electrochimica Acta*, 129, 416–424.

Castañeda, R. (2014). Three-dimensional micro-diffraction modeling. *Applied optics*, 53(9), 1782–1793.

Sánchez-Ortiga, E., Doblas, A., Martínez-Corral, M., Saavedra, G., & Garcia-Sucerquia, J. (2014). Aberration compensation for objective phase curvature in phase holographic microscopy: comment. *Optics letters*, 39(3), 417–417.

### **6.3. Proyectos vigentes**

- Microscopia holográfica digital en eje con luz de banda ancha. Aplicaciones. 2012/9 – Actual.
- Caracterización palinológica por medio de microscopía holográfica digital. 2011/5 – Actual.

# INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

Aprobados por el Comité Editorial  
Acta No.6 de 21 de marzo de 2012

## ALCANCE Y POLÍTICA DE LA REVISTA

La Revista de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, es una publicación oficial de la Facultad de Ciencias con periodicidad semestral, cuya misión es la divulgación del pensamiento científico y del quehacer investigativo en los diversos campos de las ciencias exactas y naturales. Publica artículos originales e inéditos seleccionados por el Comité Editorial y evaluados por pares nacionales e internacionales. La responsabilidad por los juicios, opiniones y puntos de vista expresados en los artículos publicados corresponde exclusivamente a sus autores.

## RESERVA DE DERECHOS

La selección de los artículos sometidos y su publicación en la Revista está a cargo del Comité Científico de la Revista y del Comité Editorial de la Facultad de Ciencias. La recepción de un trabajo no implica el compromiso de su publicación, pues todo manuscrito será sometido a revisión por pares. Así mismo, el Comité se reserva el derecho de realizar las modificaciones editoriales necesarias para la publicación en la revista. Los artículos serán publicados en orden estricto de aprobación.

## CLASIFICACIÓN DE LOS ARTÍCULOS

La revista de la Facultad de Ciencias publicará las siguientes clases de artículos:

- Artículos de investigación
- Comunicaciones - Artículos cortos
- Revisiones
- Cartas al editor
- Reseñas bibliográficas

Cabe señalar que para las modalidades de artículos completos, comunicaciones y revisiones existe la posibilidad de que éstos sean presentados por un autor invitado. Las temáticas de los artículos deben estar incluidas dentro de las siguientes áreas **temáticas**: Ciencias Naturales, Estadística, Física, Matemáticas, Biotecnología, Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales y temas afines.

## PRESENTACIÓN DE MANUSCRITOS

Se aceptarán manuscritos tanto en español como en inglés que se ajusten a los requerimientos y especificaciones de la plantilla adjunta. El manuscrito, bajo formatos Word 2007 o formato Tex, junto con el formato de información del artículo y de los autores y con la carta de aceptación de las condiciones de la revista deberán ser enviados por este medio a las siguientes direcciones electrónicas: [revistafc\\_med@unal.edu.co](mailto:revistafc_med@unal.edu.co) y [editorialfc\\_med@unal.edu.co](mailto:editorialfc_med@unal.edu.co)



## **ARTÍCULOS COMPLETOS**

Presentan, de manera detallada, los resultados originales de trabajos de investigación, finalizados que no hayan sido publicados previamente. El artículo completo debe presentar los apartados establecidos en la plantilla de la revista. Se sugiere una extensión máxima de 12 páginas.

## **COMUNICACIONES - ARTÍCULOS CORTOS**

Éstos presentan resultados originales, preliminares o parciales, de una investigación científica o tecnológica, que requieren de una pronta difusión, cuya importancia justifique que se tenga información sobre el tema. Se sugiere una extensión máxima de 4 páginas, conservando los apartados del artículo completo.

## **REVISIONES**

Son documentos donde se analizan, sistematizan e integran, resultados de investigaciones sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar a conocer los avances y tendencias de desarrollo en él. Son realizados por expertos en el tema, que presentan una descripción del campo de interés, con una evaluación crítica de su desarrollo. La estructura de las revisiones queda a criterio del autor, si bien el Comité Editorial puede sugerir cambios que mejoren la edición.

## **CARTAS AL EDITOR**

Son notas donde se hacen comentarios, sugerencias y/o recomendaciones sobre artículos publicados en la revista, o se refutan procedimientos o interpretaciones de los resultados presentados.

## **RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

Son comentarios sobre libros ya publicados, donde se conceptúa el aporte, novedad e impacto de los mismos al medio al cual está dirigido con base en una revisión minuciosa del documento.

## **NORMAS DE ESTILO PARA LOS ARTÍCULOS**

Tablas y figuras: Cada artículo puede ser complementado con tablas y/o figuras, previamente referidas en el texto, cuya presentación y características son señaladas en la plantilla. Las figuras incluyen gráficos, ilustraciones, fotografías, dibujos, mapas y estructuras, limitándose en número y procurando yuxtaponer aquellas que, sin perjuicio de la claridad, pueden referirse al mismo sistema de coordenadas. Cuando las tablas y figuras no son creación del autor, se debe indicar la fuente de donde han sido tomadas, utilizando referencias bibliográficas de manera similar a las citadas en el texto.

Símbolos y unidades: El autor debe utilizar las normas del Sistema Internacional de Magnitudes (ISO/IEC 80000), en lo referente a unidades, símbolos y abreviaturas.

Descripción de equipos, instrumentos y reactivos: Se debe indicar el nombre, marca y serie de los equipos e instrumentos utilizados en los experimentos, así como las condiciones experimentales en que ellos fueron utilizados. Para reactivos y medios de cultivo se deben indicar la marca, la presentación, la concentración y, entre paréntesis, el país de procedencia.

Nombres científicos: Los nombres científicos (Género y especie) deberán indicarse en cursiva, con mayúscula inicial en el género. Deben indicarse las cepas y las variaciones de la especie, si es relevante para el trabajo.

Referencias bibliográficas: Deben presentarse según las recomendaciones anexas en la plantilla del artículo.

### **REVISIÓN DE ORIGINALES**

El Comité Editorial revisará los documentos originales recibidos y se asesorará, cuando lo requiera, de personal calificado para hacerlo. Devolverá a los autores aquellos documentos cuyo contenido no se ajuste a las presentes normas, solicitando, en caso de que sea posible, las modificaciones que estime oportunas.

### **SELECCIÓN**

El Comité Editorial remitirá todos los artículos que cumplan las normas editoriales, como mínimo, a dos árbitros, quienes deben emitir su concepto por escrito en el formato establecido para ello. Si los árbitros sugieren correcciones, los autores deberán remitir la nueva versión corregida en un plazo máximo de 48 horas a partir de la fecha de envío, pasado el cual perderá su turno de publicación. Después de la corrección de pruebas de impresión final, que deberá realizarse con gran atención, no se admitirán modificaciones al texto original.

### **LICENCIAMIENTO DE LA OBRA**

Una vez publicados en la Revista de la Facultad de Ciencias, los artículos científicos y revisiones se encontrarán disponibles, de manera libre, para consulta de todo el público, tanto en el sitio Web de la Revista como en los diferentes sistemas de indexación y bases de datos a los que está suscrita la revista. Así mismo, los autores deben ceder, sin derecho a retribuciones económicas, a la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Revista Facultad de Ciencias, los Derechos Patrimoniales sobre la publicación y sus diferentes medios de difusión por el tiempo que establezca la normatividad vigente, mediante el formato carta de presentación y cesión de derechos de autor propuesto para tal fin. La documentación requerida para presentar los artículos, los formatos y copia de las instrucciones pueden ser descargados del sitio web: <http://www.medellin.unal.edu.co/~revistafc/> y enviar sus trabajos al correo: [revistafc\\_med@unal.edu.co](mailto:revistafc_med@unal.edu.co)