



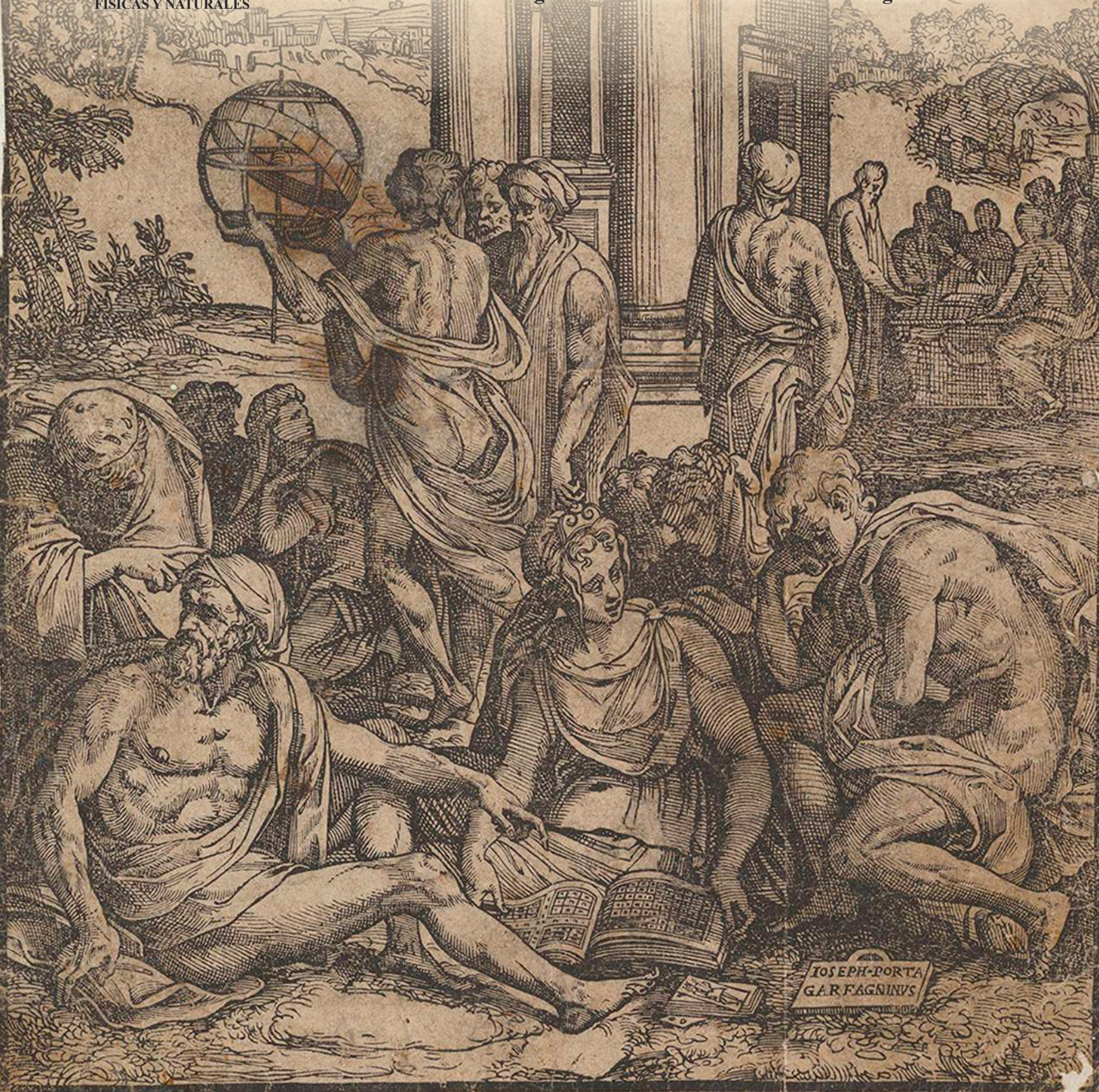
ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

85
Años
1936 - 2021

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

Vol. 46 • Número 178 • Págs. 1-304 • Enero - Marzo de 2022 • Bogotá - Colombia





ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 46 • Número 178 • Págs. 1-304 • Enero - Marzo de 2022 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

Elizabeth Castañeda, Ph. D.
editor@accefyn.org.co
Instituto Nacional de Salud,
Bogotá, Colombia

Asistente editorial Carolina Acosta

Grupo de apoyo Marta Renza, correctora de estilo
Johanna Morales, diagramadora
Bibiana Dimate, Publindex

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,
Medellín, Colombia
- Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Juanita Ángel, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- Manuel Franco, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Gloria Patricia Cardona Gómez, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Ángela Restrepo Moreno, Ph. D.
Corporación para Investigaciones Biológicas,
Medellín, Colombia
- Helena Groot de Restrepo, M.Sc.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias del Comportamiento

- Guillermo Páramo, M.Sc.
Universidad Central, Bogotá, Colombia
- Rubén Ardila, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Ana María Groot de Mahecha, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Ciencias Físicas

- Pedro Fernández de Córdoba, Ph. D.
Universidad Politécnica de Valencia, España
- Diógenes Campos Romero, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Román Eduardo Castañeda, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- María Elena Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali
- Gabriel Téllez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Jairo Roa-Rojas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

- 15 Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- 15 Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Guillermo González, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Carlos Duque, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias Naturales

- 15 José Luis Fernández Alonso, Ph. D.
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de
Investigaciones Científicas, Madrid, España
- 15 Jaime Cantera, Doctorat d'Etat
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 15 Gabriel Roldán, Dr. rer. nat.
Universidad Católica de Oriente, Rionegro,
Antioquia, Colombia
- 15 Sandra Baena Garzón, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Néstor Hernando Campos Campos, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Sede Caribe, Colombia
- 15 Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Jairo Castaño-Zapata, Ph. D.
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia
- 15 Juan Manuel Díaz Merlano, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Gerardo A. Aymard C, Ph. D.
Universidad Nacional de los Llanos Ezequiel Zamora,
Venezuela
- 15 Néstor Julio García, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Arturo Acero, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Santa Marta, Colombia
- 15 Elizabeth Hodson de Jaramillo, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 John Donato, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Martha R. Campos, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Clara Inés Orozco, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carolina Romero, M. Sc.
Herbarium, Missouri Botanical Garden, Estados Unidos
- 15 Eduardo Flórez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Ciencias Químicas

- 15 Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Myriam Sánchez de Gómez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Fernando Martínez, Docteur en Chimie
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Carmenza Duque Beltrán, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Ligia Sierra García, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Luz Marina Jaramillo Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Ciencias de la tierra

- 15 Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
- 15 José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Alexander Correa, Ph. D.
Instituto de Geología, Universidad Nacional
Autónoma de México, Mexico
- 15 Ligia Estela Urrego, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 15 Camilo Montes, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Germán Bayona, Ph. D.
Corporación Geológica Ares, Bogotá, Colombia
- 15 Hernando Dueñas Jiménez, Ph. D.
BIOSS SAS, Antioquia, Colombia

Matemáticas

- Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 15 Luis Español González, Ph. D.
Universidad de la Rioja, España
- 15 Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 15 Clara Elena Sánchez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Fernando Zalamea Traba, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carlos Enrique Mejía, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 15 Francisco Marcellán, Ph. D.
Escuela Politécnica Superior, Madrid, España

Comité científico internacional

- ⑩ Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España
- ⑩ Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile
- ⑩ Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College, Claremont, CA, EEUU
- ⑩ Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, EEUU
- ⑩ José Rubens Pirani Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brazil
- ⑩ Federico Ardila, Ph. D.
San Francisco State University, San Francisco, CA, EEUU
- Juan Alfredo Tirao, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Córdoba, Argentina
- ⑩ Pedro Romero, Ph. D.
Instituto Ludwig de la Universidad de Lausana en Suiza
- ⑩ Ulrich Paessler, Ph. D.
Academia de Ciencias de Berlín-Brandenburgo, RFA
- ⑩ Maria Sagrario Millán, Ph. D.
Universidad Tecnológica de Tarrasa, España
- ⑩ Zbigniew Jaroszewicz
Centro de Fotónica Aplicada, Instituto Tele y Radiotécnico, Instituto Nacional de Telecomunicaciones, Polonia
- ⑩ José Luis Moran López, Dr. rer. nat.
Academia Mexicana de Ciencias, México
- ⑩ Jean-Pierre Galaup
Universidad de París Saclay, Francia
- ⑩ Helena Nader, Ph. D.
Academia Brasileira de Ciencias, Brasil
- ⑩ Roberto JJ Williams, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Argentina
- ⑩ Walter Fernández Rojas, Ph. D.
Presidente Academia Nacional de Ciencias, Costa Rica
- ⑩ Alex Held, Ph. D.
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia
- ⑩ Rafael Radi, M.D.
Academia de Ciencias de Uruguay

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana
Agris
Dialnet
EBSCO
Historia Mathematica

Index Kewensis
Latindex
Mathematical Reviews
MathSciNet (on line data base)
OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA
Publindex, Colciencias
SciELO, Colombia
Zentralblatt für Mathematik
Zoological Record

Publindex, Minciencias (convocatoria 910 de 2021), categoría C

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936

Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. La Academia no es responsable de las opiniones aquí expresadas.

Reservados todos los derechos. El contenido de la presente publicación no puede ser reproducido, ni transmitido por ningún procedimiento electrónico, mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética, ni registrado por ningún sistema de recuperación de información, en ninguna forma, ni por ningún medio, sin la previa autorización por escrito del titular de los derechos de explotación de la misma.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización previa de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.



Nuestra portada

Reproducción de la portada del volumen 1, número 1, de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, publicada en diciembre de 1936.

Título: Frontispicio de Le sorti di Francesco Marcolini da Forli intitolato Giardino di Pensieri (Jardín de pensamientos)

Autor: Giuseppe Salviati (Giuseppe Porta, llamado "Il Salviati"), nacido en Castelnuovo di Garfagnana c.1520 y fallecido en Venecia c. 1575. Fecha: 1540. Dimensiones: 24.3 × 19.8 cm

Fuente: The Metropolitan Museum (The MET) New York, Autorizada su reproducción el 19 de diciembre de 2016 • Fondo: Rogers (1918) • Signatura: 18.17.3-120

URL: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/366854>



ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 46 • Número 178 • Págs. 1-304 • Enero - Marzo de 2022 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Biomédicas

Biomedical Sciences

Artículo de revisión

Métodos de obtención y aplicación de nanopartículas magnéticas en el tratamiento y diagnóstico del cáncer: una revisión

Methods for obtaining and applying magnetic nanoparticles in cancer diagnosis and treatment: A review

Yosselyn Lozano-Ocaña, Irvin Tubón-Usca, Gabriela Vaca-Altamirano, Gabriela Tubón-Usca 7

Original article

Seroreactividad a SARS-CoV-2 en individuos que asisten a un campus universitario en Bogotá, Colombia

Seroreactividad al SARS-CoV-2 en trabajadores de un campus universitario en Bogotá, Colombia

John M. Gonzalez, Juan Carlos Santos-Barbosa, Catherine Jaller, Germán Otalora, Luis J. Hernández, Marcela Guevara-Suárez, Silvia Restrepo 27

Original article

Possible new mitochondrial mechanism of vitamin C anticancer activity

Possible nuevo mecanismo mitocondrial de la actividad anticancerígena de la vitamina C

Viktor V. Lemeshko 36

Ciencias Físicas

Physical Sciences

Artículo de revisión

Hacia una estructura de investigación y educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones en Colombia

Towards the creation of a research and education structure for the prevention of accidents due to fires and explosions in Colombia

Alejandro Molina, Sebastián López, Jorge Martín Molina-Escobar, Henry Copete, David Soto, Linda Jaramillo, Astrid Blandón 50

Artículo de revisión

Encriptación de información mediante procesamiento óptico

Information encryption using optical processing

John Fredy Barrera-Ramírez 68

Ciencias Naturales

Natural Sciences

Original article

Environmental changes during the last 1800 years in the Neguanje mangrove, Tayrona National Natural Park, Colombian Caribbean

Cambios ambientales en los últimos 1800 años en el manglar de Neguanje, Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano

Yennifer García-M., J. Orlando Rangel-Ch., Alexis Jaramillo-J 90

Artículo original

Presencia confirmada del murciélago marrón de Chiriquí, *Eptesicus chiriquinus* (Chiroptera: Vespertilionidae), en el departamento de Chocó, Colombia

Confirmed presence of the Chiriquí brown bat, *Eptesicus chiriquinus* (Chiroptera: Vespertilionidae) in the department of Choco, Colombia

Victor Danilo Palacios-Mayoral, Leison Palacios-Mosquera, Jonard David Echavarría-Rentería, Alex Mauricio Jimenez-Ortega, Hugo Mantilla-Meluk 108

Original article

Assessment of the level of adjustment of three epidemiological models in the analysis of epidemics with incidences less than 100% such as the lethal wilt of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Evaluación del nivel de ajuste de tres modelos epidemiológicos en el análisis de epidemias con incidencias inferiores al 100% como la marchitez letal de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Juan Manuel López-Vásquez, Jairo Castaño-Zapata 118

Artículo original

Caracterización de drosophilidos en zona urbana de Popayán (Cauca) Colombia

Characterization of drosophilides in the urban area of the city of Popayán (Cauca), Colombia

Lorena Urbano, Yamid Arley Mera-Velasco, Jovanna Vanessa Ramos-Angulo 131

Artículo original

Estructura y composición de la ictiofauna presente en el tramo bajo del río Córdoba, Sierra Nevada de Santa Marta, Caribe colombiano

Structure and composition of the ichthyofauna present in the lower section of the Córdoba River, Sierra Nevada de Santa Marta, in the Colombian Caribbean

Carlos Blanco-Cervantes, German Blanco-Cervantes 137

Artículo original

Análisis del riesgo de invasión de malezas introducidas asociadas a cultivos de banano en el departamento del Magdalena, Colombia

Analysis of the risk of invasion of exotic weeds associated with banana crops in the department of Magdalena, Colombia

Kristinne Echávez-P, Irma Quintero-Pertuz, Eduino Carbonó-Delahoz 154

Original article

New records and a key for species of *Synarthonia* (lichenized Ascomycota: Arthoniaceae) in Colombia

Nuevos registros y una clave para las especies de *Synarthonia* (Ascomycota liquenzada: Arthoniaceae) en Colombia

Edier Soto-Medina 165

Artículo original

Evaluación fitosanitaria de *Juglans neotropica* y *Quercus humboldtii* en arbolado urbano de Popayán-Cauca, Colombia

Phytosanitary evaluation of *Juglans neotropica* and *Quercus humboldtii* in an urban woodland of Popayán-Cauca, Colombia

Clara Inés Giraldo-Aristizábal, Yamid Arley Mera-Velasco, Sandra Carlina Rivas-Zúñiga, Darly Gabriela Muñoz-Lara, Lina María Acosta-Hilamo, Nathaly Pérez-Muñoz, Juan C. Villalba-Malaver, Alex Enrique Ordóñez-Hoyos 169

Artículo original

Habitats prioritarios en un humedal costero del Pacífico: propuesta de un índice basado en servicios ecosistémicos

Priority habitats of a Pacific coastal wetland: Proposal for an index based on ecosystem services

Diana Ochoa-Balbacea, Sergio Gonzales, Antony Apeño, Héctor Aponte 182

**Ciencias
Naturales**
Natural Sciences

Artículo original

Variación espacial de la comunidad de algas del perifiton en quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia

Spatial variation of the periphyton algae community in streams of the San Juan River basin, Chocó-Colombia

Lidis Maria Martínez-Cuesta, Zuleyma Mosquera-Murillo 192

Artículo original

Variación estructural de familias de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad del agua en quebradas asociadas con cultivos de café y ganadería vacuna en el sector de La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta

Structural variation of families of aquatic macroinvertebrates and their relationship with the quality of water in streams associated with coffee crops and beef cattle in La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta

Melizza Tobias-Loaiza, Cristian Guzmán-Soto 206

Original article

Diversity and antibacterial activity of endophytic fungi of the Amazonian medicinal plant sucuba [*Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson]

Diversidad y actividad antibacteriana de hongos endofíticos de la planta medicinal amazónica sucuba [*Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson]

Maria Francineide Ribeiro-Gomes, Fernanda Viana-Diniz, Atilon Vasconcelos de-Araújo, Leila Priscila-Peters, Clarice Maia-Carvalho 217

**Ciencias
Químicas**
Chemical Sciences

Artículo original

Materiales carbonosos jerarquizados derivados de la borra de café para su aplicación en supercondensadores

Hierarchical carbonaceous materials derived from spent coffee grounds for application in supercapacitors

Estefanía Arredondo-Ferrer, Robison Buitrago-Sierra, Diana López 233

**Ciencias
de la Tierra**
Earth Sciences

Artículo original

Cambios en los patrones espaciales de área quemada en Colombia, ¿qué ha pasado en las dos primeras décadas del siglo XXI?

Changes in the spatial patterns of burned area in Colombia, what happened in the first two decades of the 21st century?

Dolors Armenteras 248

Artículo original

Estimación espaciotemporal de la recarga potencial en un sistema pseudokárstico tropical

Spatio-temporal estimation of the potential recharge in a tropical pseudokarst system

Sandra M. Patiño-Rojas, Marcela Jaramillo 261

Comentario bibliográfico

Bibliographic commentary 279

Club de revistas

Journal Club 281

Cartas al editor

Letters to the editor 287

In Memoriam

Ángela Restrepo Moreno 289

Enfoque y alcance

Focus and Scope 291

Artículo de revisión

Métodos de obtención y aplicación de nanopartículas magnéticas en el tratamiento y diagnóstico del cáncer: una revisión

Methods for obtaining and applying magnetic nanoparticles in cancer diagnosis and treatment: A review

Yosselyn Lozano-Ocaña^{1,*}, Irvin Tubón-Usca², Gabriela Vaca-Altamirano³,
Gabriela Tubón-Usca⁴

¹ Carrera de Biofísica, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

² Dirección de Investigación y Desarrollo (DIDE), Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador

³ Carrera Odontología, Facultad en Ciencias Médicas, Universidad Regional Autónoma de los Andes - UNIANDES, Ambato, Ecuador

⁴ Grupo de investigación de materiales avanzados (GIMA), Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

Resumen

El cáncer es una enfermedad heterogénea con múltiples mecanismos de evasión de la respuesta inmunitaria, de resistencia, proliferación y supervivencia, cuya tasa de mortalidad, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha aumentado debido a los malos hábitos de la población (tabaco, alcohol, drogas, entre otros), por lo que, sumado a sistemas de salud deficientes e ineficientes, especialmente en los países con ingresos bajos y medios, se ha convertido en la segunda causa de muerte a nivel mundial. La nanomedicina ha permitido la investigación y desarrollo de nuevos sistemas terapéuticos con nanopartículas magnéticas. El objetivo de esta revisión bibliográfica es reportar los principales métodos de obtención de nanopartículas magnéticas y discutir brevemente su funcionalización y aplicación en el campo de la oncología, mediante una búsqueda bibliográfica en las bases de datos científicas con artículos de alto impacto y con mayor número de citaciones. Utilizando criterios de inclusión y exclusión, se establecieron indicadores específicos de las nanopartículas magnéticas y las aplicaciones biomédicas. Los resultados evidenciaron que las nanopartículas más empleadas son las de óxido de hierro superparamagnéticas (*superparamagnetic iron oxide nanoparticles*, SPION) debido a su multifuncionalidad y sus excelentes propiedades fisicoquímicas y biológicas. Además, poseen una alta citotoxicidad en células cancerígenas, produciendo así un alto porcentaje de muerte celular. Por último, los tratamientos alternativos, como la hipertermia magnética, la terapia génica y la administración de fármacos, reducen los efectos secundarios con respecto a los tratamientos convencionales, y por lo que son prometedores. Asimismo, los agentes de contraste utilizados en resonancia magnética mejoran el diagnóstico.

Palabras clave: Aplicaciones biomédicas; Cáncer; Diagnóstico; Nanopartículas magnéticas; Terapia.

Abstract

Cancer is a heterogeneous disease with multiple mechanisms of immune response evasion, resistance, proliferation, and survival. According to the World Health Organization, its mortality rate has increased due to the poor habits of the population (tobacco, low consumption of vegetables and fruits, alcohol, and drugs), which added to poor and inefficient health systems, especially in low- and middle-income countries, has turned it into the second leading cause of death worldwide. Nanomedicine has allowed the research and development of new therapeutic systems with magnetic nanoparticles. Our review aimed at reporting the main methods for obtaining magnetic nanoparticles and discussing briefly their functionalization and application in the field of oncology. Our search was carried out in indexed journals available in scientific databases. We selected high-impact articles

Citación: Lozano-Ocaña Y, Tubón-Usca I, Vaca-Altamirano G, Tubón-Usca G. Métodos de obtención y aplicación de nanopartículas magnéticas en el tratamiento y diagnóstico del cáncer: una revisión. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):7-26, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1560>

Editor: Manuel Antonio Franco Cortes

***Correspondencia:**

Yosselyn Lozano-Ocaña;
yosselyn.lozano@esPOCH.edu.ec

Recibido: 9 de septiembre de 2021

Aceptado: 11 de noviembre de 2021

Publicado en línea: 1 de febrero de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

with the highest number of citations. Through inclusion and exclusion criteria we established specific indicators for magnetic nanoparticles and biomedical applications. Our results evidenced that the most widely used are the superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPION) due to their multifunctionality, and excellent physico-chemical, and biological properties. Furthermore, they are highly cytotoxic for cancer cells, and produce a high percentage of cell death. Finally, alternative treatments such as magnetic hyperthermia, gene therapy, and drug administration reduce side effects as compared with conventional treatments positioning them as promising treatments. In addition, contrast agents used in magnetic resonance imaging improve diagnosis.

Keywords: Biomedical applications; Cancer; Diagnosis; Magnetic nanoparticles; Therapy.

Introducción

Según los últimos datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cáncer es fue responsable de 10 millones de muertes en el 2020, convirtiéndose en la segunda causa de muerte a nivel mundial. Debido a la letalidad de la enfermedad, la probabilidad de supervivencia aumenta con una detección temprana y eficaz. Sin embargo, los métodos diagnósticos actuales no proporcionan una detección oportuna; por ejemplo, los análisis de sangre pueden proporcionar resultados erróneos, como falsos positivos o falsos negativos, lo que conlleva un exceso de estudios y procedimientos más profundos y costosos. La resonancia magnética puede mejorar la visibilidad de células afectadas, cuando se suministran agentes que potencian el contraste de la imagen de los tejidos y facilitan información detallada sobre la ubicación exacta y la extensión de la enfermedad, mientras que el diagnóstico mediante imágenes tradicionales (radiografía, tomografía, rayos x), en ocasiones no proporcionan un buen enfoque y contraste (**International Day of Radiology-IDoR**, 2012; **Instituto Nacional del Cáncer**, 2012; **Organización Mundial de la Salud-OMS**, 2021).

Por otra parte, los tratamientos tradicionales que se suministran ampliamente a los pacientes a nivel mundial, como la quimioterapia y la radioterapia, no son suficientemente efectivos, ya que provocan daños considerables a los órganos y tejidos sanos y limitan la distribución de la dosis terapéutica, además de que son invasivos y tóxicos, lo que provoca que el paciente presente efectos adversos como alopecia, pérdida de apetito, vómito, cansancio y cambios en la piel, entre otros (**Blasto & Caballero**, 2019; **Yigit, et al.**, 2012).

Con el desarrollo de “nanoterapias” dirigidas específicamente a los órganos y tejidos enfermos, se ha podido focalizar el tratamiento en la zona afectada y se logra proteger la integridad de las células sanas, reduciendo notablemente los efectos nocivos de los tratamientos actuales y brindando una mejor calidad de vida a los pacientes (**Lechuga**, 2011).

Las nanopartículas magnéticas (NPM) se han probado recurrentemente en varias aplicaciones y estudios en nanomedicina; debido a su pequeño tamaño (10 – 100 nm) y su gran relación de superficie y volumen son medios resistentes, versátiles y reactivos, propiedades que potencian su acción en los sistemas biológicos, mejorando los problemas de solubilidad y estabilidad química de los medicamentos anticancerígenos e incrementando la captación y administración de medicamentos poco solubles, ya que actúan como nanoportadores hidrófilos (**Cardoso, et al.**, 2018; **Farzin, et al.**, 2020; **Wicki, et al.**, 2015).

En términos de terapéutica, las NPM se diseñan para la administración selectiva de fármacos a órganos y tejidos específicos. También pueden utilizarse para tratar el daño genético oculto reemplazando o desactivando genes supresores de tumores en las células cancerosas. Además, pueden inducir la muerte de células cancerosas por hipertermia magnética mediante la aplicación de un campo magnético externo, en tanto que en el diagnóstico las NPM se emplean como agentes de contraste que permiten una mejor visualización del tejido tumoral mediante imágenes de resonancia magnética (IRM) (**Gobbo, et al.**, 2015; **Ramos & Castillo**, 2011; **Zaimy, et al.**, 2017).

En este artículo de revisión se discute el uso de diferentes nanopartículas magnéticas en nanomedicina y sus principales aplicaciones, especialmente en el tratamiento y detección temprana del cáncer. Se individualizaron cuatro categorías principales: agentes

terapéuticos, agentes de contraste para imágenes en resonancia magnética, hipertermia magnética y terapias genéticas características que pueden emplearse en sistemas teragnósticos (diagnóstico y tratamiento simultáneo de la enfermedad). Por último, se discuten las ventajas y desventajas de este tipo de tratamientos halladas en los estudios *in vivo* e *in vitro* reportados, así como sus perspectivas.

Materiales y métodos

Se hizo un estudio descriptivo y comparativo de los reportes científicos con alto factor de impacto en el área de medicina, nanomedicina y nanopartículas magnéticas. Como se muestra en la **figura 1**, la búsqueda de la literatura especializada se efectuó en las bases de datos Google Scholar, Scopus, Elsevier, PubMed, Zlibrary, Springer y Medline empleando el rango de tiempo de la década del 2010 al 2020. Se seleccionaron 128 artículos y, mediante los criterios de inclusión y exclusión, se escogieron indicadores como el tipo y el tamaño de las nanopartículas magnéticas para describir los métodos de obtención. Para describir las propiedades magnéticas se seleccionaron los indicadores de anisotropía magnética (K), potencia de pérdida específica (*specific loss power*, SLP), magnetización de saturación (Ms) y coercitividad (Hc). En cuanto a las aplicaciones biomédicas se incluyeron indicadores como la toxicidad, la biocompatibilidad y la captación para evaluar el funcionamiento de las nanopartículas en los sistemas biológicos. Se excluyeron artículos duplicados y artículos originales que no contenían los indicadores propuestos y de este universo se seleccionaron, analizaron y discutieron 61 artículos. En la **tabla 1** se muestra el porcentaje de citación de cada indicador.

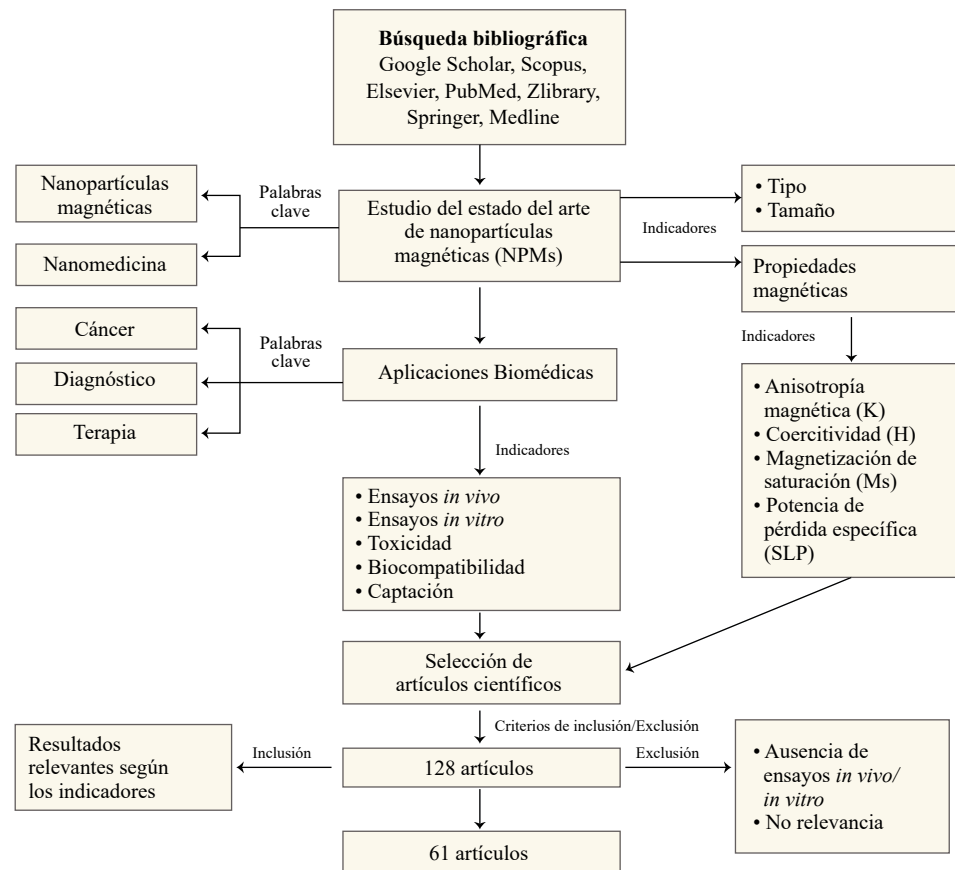
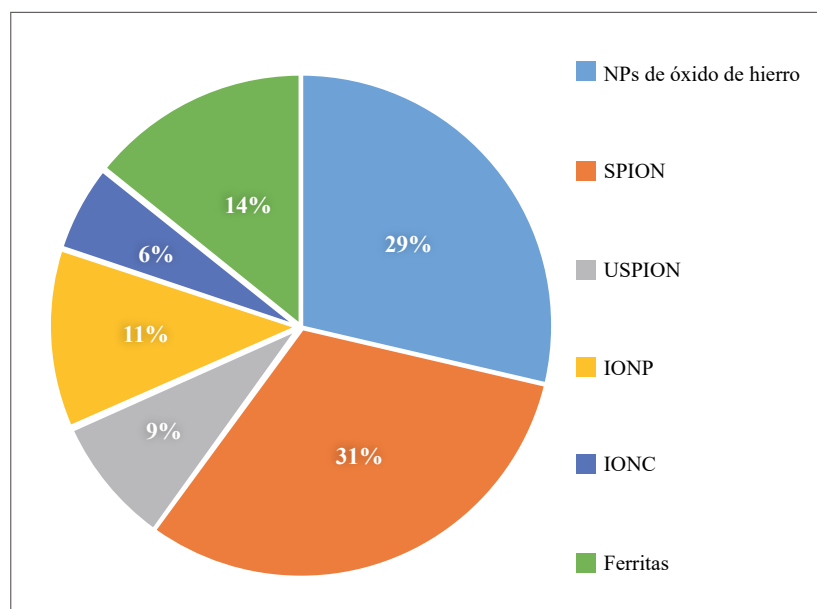


Figura 1. Diagrama de flujo de la revisión del estado del arte para el estudio y selección de artículos científicos a ser discutidos

Tabla 1. Porcentaje de citación de cada indicador en el análisis de las NPM

Indicadores	Porcentaje de citación (%)
Anisotropía magnética	9
Potencia de pérdida específica	8
Magnetización de saturación	11
Coercitividad	12
Toxicidad	25
Biocompatibilidad	16
Captación	19

**Figura 2.** Porcentaje de citación de las NPM a partir de un universo de 61 artículos estudiados en la revisión

Con base en el tipo y el tamaño de las nanopartículas, en los 61 artículos analizados se detectaron seis tipos: óxido de hierro, citado en el 29 % de los artículos, óxido de hierro superparamagnéticas (SPION), en el 31 %, óxido de hierro superparamagnéticas ultrapequeñas (*Ultra-small superparamagnetic iron oxide*, USPIO), en el 9 %, óxido de hierro (*iron oxide nanoparticle*, IONP) en el 11 %, nanoclusters de óxido de hierro (*iron oxide nanoclusters*, IONC) en el 6 % y, por último, ferritas en el 14 % (**Figura 2**). Además, en la discusión y los resultados se definieron diferentes tipos de siglas y acrónimos para facilitar la lectura, información que se incluye en el **material suplementario S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1560/3183>.

Resultados y discusión

Métodos de producción de las NPM

Los métodos químicos de coprecipitación, descomposición térmica, hidrotermal y microemulsión son los más frecuentemente empleados para producir nanopartículas biocompatibles de buena calidad, pues proporcionan una síntesis simple, efectiva, fácil de manejar y económica con control del tamaño y la forma durante la síntesis (**Rahim, et al., 2020**).

Coprecipitación. Es probablemente el método más sencillo para la fabricación de nanopartículas solubles en agua, ya que no se requiere una gran cantidad de reactivos. Básicamente consiste en agregar una disolución salina de iones de hierro (Fe^{2+}) y (Fe^{3+}) en forma de sulfatos, cloruros o nitratos y percloratos disueltos en agua. Al utilizar el reactivo diluyente Diaton (CD), el FeCl_3 y el FeCl_2 (**Tabla 2**), se produce magnetita de ~ 9 nm después de 6 h de agitación continua a temperatura ambiente. Al incrementar la temperatura a 70°C con agitación magnética, el tiempo de reacción disminuye a 30 min, pero el diámetro de las magnetitas obtenidas se incrementa a tamaños entre 31 y 40 nm (**Coral & Mera, 2017; Yallapu, et al., 2012**).

Tabla 2. Resumen de los métodos de síntesis de las NPM y de su recubrimiento y funcionalización según los resultados estudiados

NPM	Método de síntesis	Reactivos	Tamaño del núcleo (nm)	Recubrimiento	Funcionalización	Tamaño hidrodinámico (nm)	Ref.
SPION	Co-precipitación	CD, FeCl_3 , FeCl_2 , NH_4OH	~ 9	β -ciclodextrina (CD200) y polímero plurónico (F127)	SPION-CUR	123	Yallapu, et al., 2012
Fe	Descomposición térmica	$\text{Fe}(\text{CO})_5$, $\text{C}_{18}\text{H}_{36}$, $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$, C_6H_{14}	12 ± 1	Fe_3O_4 y Polietilglicol (PEG)	Fe- Fe_3O_4 -PEG-5-FU	-	Gómez-Sotomayor, et al., 2015
SPION	Microemulsión	C_7H_8 , CTAB, FeCl_3 , FeCl_2 , $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$, NH_4OH	19	Oro (Au)	SPIONs@Au-MUC-1	25	Azhdarzadeh, et al., 2016
ZnF_2O_4	Descomposición térmica	$\text{Fe}(\text{acac})_3$, ZnCl_2 , FeCl_2 , $\text{C}_{24}\text{H}_{51}\text{N}$, $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$, $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$, $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_2$	$18 \pm 1,6$	Polietilenimina (PEI)	MCNP-PEI/plásmido	$117,2 \pm 37$	Yin, et al., 2016
IONC	Descomposición térmica	$\text{Fe}(\text{oleato})_3$, $\text{H}_{18}\text{H}_{36}\text{O}$, $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}$	2	PEG	-	12	Lu, et al., 2017
IONP	-	-	10	PEG	AFT-PEG-IONP BSA-PEG-IONP	~ 25	Gao, et al., 2017
SPION	Co-precipitación	FeCl_3 , FeCl_2 , $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$, NH_4^+	9	SiO_2	Polímero termoresistente (TRP)	160	Guisasola, et al., 2018
IONP	Co-precipitación	FeCl_3 , FeCl_2 , NaOH	6 – 20	QTS	-	8 – 15	Hauksdóttir & Webster, 2018
	Descomposición térmica	$\text{Fe}(\text{acac})_3$, $\text{C}_{16}\text{H}_{34}\text{O}_2$, $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$, $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$, bencí-l-éter	5 – 10	QTS	-	5 - 12	
USPION	Hidrotermal	$\text{Fe}(\text{acac})_3$, $\text{C}_{16}\text{H}_{34}\text{O}_2$, $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$, $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$	$10 \pm 2,6$	PEG	sLe ^x	$53,35 \pm 16,99$	Liu, et al., 2019
Magnetita	Co-precipitación	FeSO_4 , FeCl_3 , NH_4OH	31 - 40	PEG	-	-	Paresque et al., 2019
IONP	Co-precipitation	FeSO_4 , FeCl_3	8,6	Dextrano (DEX)	AF@ Fe_3O_4	22	Soleymani, et al., 2020

Por otra parte, bajo condiciones oxidantes, la magnetita (Fe_3O_4) obtenida previamente se oxida formando maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), con un tamaño que oscila entre 10 y 40 nm y una mayor biocompatibilidad. Por ejemplo, en un estudio reciente las magnetitas se oxidaron a una temperatura de 100 °C durante 5 h bajo un ambiente de nitrógeno (N_2), produciendo maghemitas de 8,8 nm altamente estables (Baba, *et al.*, 2012; Barrow, *et al.*, 2018; Frimpong & Hilt, 2010; Paresque, *et al.*, 2019).

En otro estudio se reportó que al agitar la mezcla durante aproximadamente 3 h se podían producir IONP de dimensiones entre los 6 y los 20 nm con un potencial zeta de 25,01 mV (Hauksdóttir & Webster, 2018).

Además, al usar isopropanolamina (MIPA) o diisopropanolamina (DIPA) como bases combinadas con los reactivos $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, después de 2 h de agitación mecánica a 100 °C se produjeron ferritas de CoFe_2O_4 y MnFe_2O_4 con tamaños de distribución estrecha que variaban entre 4,2 y 4,8 nm y 9,3 y 11,7 nm, respectivamente, en tanto que al utilizar como base hidróxido de sodio (NaOH), se obtuvieron nanopartículas entre 18,6 y 59,5 nm. Por consiguiente, puede inferirse que las bases tienen un papel fundamental en cuanto al tamaño, la composición química y las propiedades. Al aplicar NaOH como base se produjeron nanopartículas significativamente más grandes que aquellas obtenidas al emplear MIPA y DIPA, lo que proporciona nuevos horizontes en la síntesis de ferritas mediante un método de precipitación versátil y fácil de manejar (Pereira, *et al.*, 2012).

También se han obtenido ferritas de cobalto (CoFe_2O_4) de tamaño reducido, ~ 6 nm, en una reacción única añadiendo dietilglicol y dietanolamina con CoCl_2 y FeCl_3 y aproximadamente 2 h de agitación vigorosa a una temperatura de 180 a 240 °C (Wu, *et al.*, 2011).

La principal ventaja de este método es que puede considerarse una síntesis verde, debido al uso de reactivos económicos que son amigables con el medioambiente y brindan tiempos de reacción cortos. Sin embargo, su principal desventaja es el control del tamaño de las nanopartículas, ya que la precipitación rápida conduce a obtenerlas de gran tamaño, aunque para disminuir este efecto pueden emplearse tensoactivos (Valencia-Barrón, 2013).

Durante la última década se ha demostrado que varios agentes biológicos pueden reemplazar los reactivos tóxicos para lograr una síntesis verde mediante la biorremediación de microorganismos y plantas (Gómez-Garzón, 2018).

Descomposición térmica. Para la producción de nanopartículas a partir de este método se requieren precursores metálicos orgánicos como el pentacarbonilo de hierro, el oleato de hierro, o el acetilacetato de hierro, entre otros. La reacción se produce en presencia de ligandos (ácido oleico y oleilamina) junto con disolventes de alto punto de ebullición y agentes reductores; esta mixtura se calienta a 180 °C bajo una atmósfera controlada de N_2 debido a esta elevada temperatura. La síntesis ocurre en 30 min y las nanopartículas obtenidas presentan dimensiones de 12 ± 1 nm, las cuales son altamente estables y dispersables en agua (Gallo, *et al.*, 2013; Gómez-Sotomayor, *et al.*, 2015).

Asimismo, se reporta que el uso de reactivos como $\text{Fe}(\text{acac})_3$, ZnCl_2 y FeCl_2 en la preparación de ferritas de zinc produce nanopartículas de $18,93 \pm 1,6$ nm con un alto grado de monodispersión. Para sintetizar IONP de dimensiones reducidas (5 a 10 nm), la reacción se conduce a una temperatura superior a los 200 °C bajo una atmósfera controlada de N_2 durante aproximadamente una hora, es decir que cuanto mayor sea la temperatura, menor será el tiempo de reacción. Además, el uso de una atmósfera controlada de N_2 evita la aglomeración de nanopartículas durante la síntesis y les otorga mejores propiedades, lo que las convierte en materiales magnéticos prometedores para aplicaciones biomédicas (Hauksdóttir & Webster, 2018; Yin, *et al.*, 2016).

En otro estudio se obtuvieron IONC de 4,2 y 5,8 nm mediante descomposición térmica a alta temperatura. Lo interesante es que estas sirvieron más tarde como precursores o semillas para producir IONC de 7,9 y 9,8 nm, respectivamente, hasta alcanzar dimensiones de hasta 22,5 nm. Este método de crecimiento mediado por semillas ofrece una ventaja, ya que se obtienen nanopartículas de diferentes tamaños a partir de las ya sintetizadas. De manera similar, al mezclar oleato de hierro y alcohol oleico con difenil durante 30 min a 200 °C, se pueden obtener IONC muy pequeñas, de ~2 nm (Jeun, *et al.*, 2012; Lu, *et al.*, 2017).

Método hidrotermal. Al igual que la descomposición térmica, este método requiere altas temperaturas y presiones en la reacción, con la diferencia de que se hace en condiciones acuosas, lo que evita la manipulación de disolventes orgánicos tóxicos y proporciona nanopartículas con una distribución de tamaño estrecha. Sin embargo, en términos de rendimiento y calidad son inferiores a aquellas obtenidas con los métodos ya descritos. Por ejemplo, para producir USPIO de $10 \pm 2,6$ nm, se utilizan precursores de hierro como el $\text{Fe}(\text{acac})_3$ en presencia de ácido oleico ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) y oleilamina ($\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$), la mezcla se lleva a altas temperaturas, entre 200 y 265 °C, y se centrifuga a temperatura ambiente y el tiempo de reacción es de aproximadamente 2 h, con lo que se obtienen nanopartículas con una distribución uniforme y gran ‘dispersabilidad’ (Frimpong & Hilt, 2010; Liu, *et al.*, 2019), es decir, su tamaño depende principalmente del tiempo y la temperatura de la reacción.

Microemulsión. El método de microemulsión consiste en formar dos soluciones precursoras, A y B, donde A contiene tolueno, bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) y una solución de hierro, en tanto que en B se sustituye la solución de hierro por hidróxido de amonio. Las dos soluciones precursoras se mezclan por separado y, posteriormente, B se añade a A bajo agitación para ser homogenizada. Mediante este método se pueden obtener las SPION de un tamaño promedio de alrededor de 19 nm (Tabla 2), monodispersas y con un potencial zeta de -13 mV, por lo que se considera un método sencillo que no requiere equipos especiales y costosos, pero que no es muy eficaz, puesto que utiliza grandes cantidades de disolventes para producir pequeñas cantidades de NPM (Azhdarzadeh, *et al.*, 2016; Banerjee, *et al.*, 2010; Valencia-Barrón, 2013).

En cuanto a los diferentes métodos de sintetización, puede decirse que la descomposición térmica presenta una síntesis un tanto más compleja que la coprecipitación, puesto que requiere altas temperaturas, atmosferas controladas y reactivos más invasivos, perjudiciales y costosos, en tanto que con el método hidrotermal se genera una solución menos invasiva para el experimentador, ya que se puede conducir la reacción en soluciones acuosas minimizando el empleo de disolventes tóxicos. Asimismo, el método de microemulsión ofrece una alternativa sencilla para la sintetización de las NPM, aunque su relación costo-beneficio repercute directamente en el rendimiento.

Recubrimiento y funcionalización de nanopartículas magnéticas

El recubrimiento y la funcionalización son pasos fundamentales para que las NPM puedan utilizarse en aplicaciones biomédicas una vez son sintetizadas. Para ello, su superficie debe modificarse con recubrimientos orgánicos o inorgánicos, con el fin de funcionalizarlas con moléculas específicas que les permitan unirse a células cancerosas para interactuar de manera localizada (Figura 3).

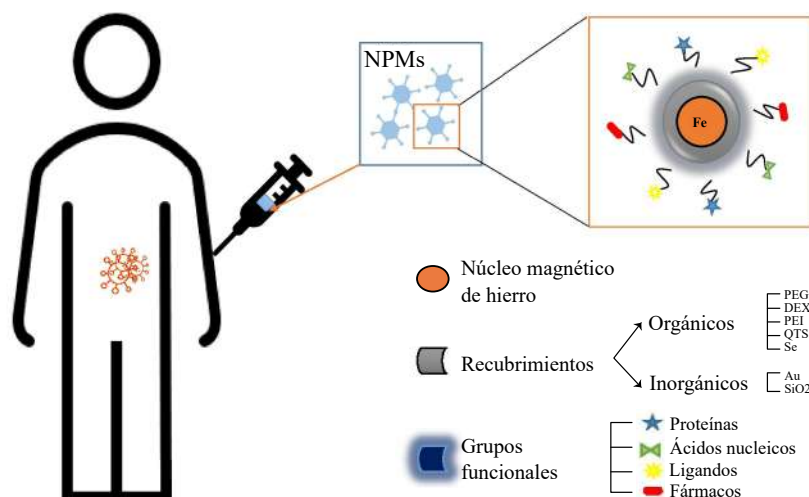


Figura 3. Esquema detallado de la estructura de una NPM y su funcionalización

Los recubrimientos orgánicos más comunes incluyen polímeros como el polietilenglicol (PEG), el dextrano (DEX), la polietilenimina (PEI), o el quitosano (QTS). Su principal función es recubrir la superficie de las nanopartículas para proteger el núcleo de Fe, evitando la aglomeración y oxidación al momento de ser sintetizadas, lo que las convierte en herramientas adaptables que pueden ser modificadas para que detecten compartimentos biológicos característicos como los de los ganglios linfáticos, los grupos sanguíneos, el hígado, etc. (Yigit, *et al.*, 2012).

Entre todos los recubrimientos sobresale el polietilenglicol (PEG). Es el más empleado y proporciona un revestimiento eficaz que mejora la adhesión a las células cancerosas y la reduce frente a células normales. Además, mejora la biocompatibilidad de las nanopartículas y les da mayor estabilidad en ciclos de circulación sanguínea más largos. Asimismo, el PEG se emplea a menudo como vector genético para administrar plásmidos y ácidos nucleicos, incluidos los ARN de interferencia pequeños (ARNip) (Hu, *et al.*, 2018; Liu, *et al.*, 2019; Yin, *et al.*, 2016).

Por otro lado, los recubrimientos inorgánicos, como la sílice (SiO₂) y el oro (Au), también se emplean ampliamente, pues poseen la capacidad de estabilizar el núcleo magnético y reducir la corrosión y degradación de las nanopartículas. Uno de los beneficios adicionales del recubrimiento de oro es que no solo tiene una reactividad química muy baja, sino que también facilita la unión de fármacos y puede reducir la citotoxicidad (Azhdarzadeh, *et al.*, 2016).

La funcionalización con proteínas como la triptorelina, una hormona liberadora de luteinizante, proporciona una adhesión 14 veces mayor a las células del cáncer de mama comparada con la de las células normales y facilita aún más la focalización celular específica (Hu, *et al.*, 2018).

La alfafetoproteína (AFT) y la proteína de suero bovino (BSA) proporcionan una buena estabilidad y focalización, aunque la AFT presenta una mayor focalización hacia las células tumorales, con lo que se obtienen mejores resultados en el tratamiento del cáncer de páncreas (Gao, *et al.*, 2017).

Por otra parte, entre los ligandos más empleados cabe mencionar el carbohidrato de E-selectina sialyl Lewis X (sLe X), que generalmente se usa para la detección temprana de metástasis, ya que marca y reconoce células cancerosas. Por último, el ácido fólico (AF) es uno de los candidatos preferidos para el direccionamiento activo de las nanopartículas. Este complejo de vitamina B con fuerte afinidad por el receptor de folato (RF) permite una funcionalización que mejora la captación de las nanopartículas en la superficie de las células cancerosas (Liu, *et al.*, 2019; Soleymani, *et al.*, 2020).

Principales propiedades magnéticas de las nanopartículas usadas en el tratamiento y el diagnóstico de cáncer

En la **tabla 3** se presenta un resumen de las principales propiedades magnéticas: magnetización de saturación (Ms), coercitividad (Hc), anisotropía magnética (K) y potencia de pérdida específica (SLP).

Según Lee, *et al.* (2011), la magnetización de saturación reportada para las nanopartículas sin recubrimiento alcanza un valor de 104 emu/g, pero con la combinación entre las ferritas de cobalto y manganeso (**Tabla 3**) este parámetro disminuye a 110 emu/g, provocando una disminución en la magnetización de saturación.

Por otra parte, se ha reportado que la coercitividad con el CoFe₂O₄ presenta un valor máximo de 11600 Oe a una temperatura de 5 K, en tanto que al combinar con CoFe₂O₄@MnFe₂O₄, este parámetro varía, ubicándose en 2530 Oe, lo que implica que se encuentran acopladas magnéticamente por intercambio.

En cuanto a la pérdida de potencia específica, en la combinación Fe₃O₄@CoFe₂O₄ se reporta un valor evidentemente alto, de 1,8 x 10⁴ W/g, como se observa en la **tabla 3**. Esto implica que al combinar ferrita y cobalto se puede elevar significativamente la potencia de pérdida específica, lo que permite optimizar el tiempo de calentamiento de las nanopartículas para garantizar una destrucción eficaz de las células tumorales en un corto período de tiempo.

Tabla 3. Principales propiedades magnéticas de las NPM discutidas en la presente revisión

NPM	Tamaño (nm)	Magnetización de saturación (emu/g)	Anisotropía magnética (J/m ³)	Coercitividad (Oe)	Potencia de pérdida específica (W/g)	Referencia	
CoFe ₂ O ₄	9	77	2,0x10 ⁵	11600	160		
MnFe ₂ O ₄	15	125	3,0x10 ³	0	414		
CoFe ₂ O ₄ @MnFe ₂ O ₄	15	110	1,5x10 ⁴	2530	1710	Lee, <i>et al.</i> , 2011	
MnFe ₂ O ₄ @CoFe ₂ O ₄	15	108	1,7x10 ⁴	-	3034		
Fe ₃ O ₄ @CoFe ₂ O ₄	15	104	1,8x10 ⁴	-	1,8x10 ⁴		
AF@Fe ₃ O ₄ (A)	8,6	10,4	-	11	-	Soleymani, <i>et al.</i> , 2020	
AF@Fe ₃ O ₄ (B)	21,1	43	-	65	-		
IONC-DMSA	SPION	9,8	-	-	0,3	28	
	FMION	14	-	-	10	201	Jeun, <i>et al.</i> , 2012
	SPION + FMION	22,5	-	-	10	322	

En lo que concierne a la anisotropía magnética, los valores obtenidos para las tres combinaciones oscilan entre 1,5x10⁴ y 1,8x10⁴ J/m³ y se encuentran dentro del rango óptimo para aplicaciones biomédicas (Lee, *et al.*, 2011).

Soleymani, *et al.* (2020) reportan que tras haber sido sintetizadas, las nanopartículas AF@Fe₃O₄ (A) fueron sometidas a un tratamiento hidrotermal que indujo el crecimiento de las AF@Fe₃O₄ (B), con lo que se logró que las propiedades magnéticas, el tamaño y la eficacia del calentamiento aumentaran y mejoraran.

Después del tratamiento hidrotermal, las nanopartículas se alejan del régimen superparamagnético, lo que conlleva un aumento de la coercitividad, lográndose alcanzar un máximo valor en el estado ferromagnético de dominio único para luego disminuir. De ahí que cuando los valores magnetización de saturación y coercitividad aumentan, las nanopartículas se convierten en nanomateriales útiles para aplicaciones teranósticas, como en el caso de la combinación de la hipertermia (THM) y la resonancia magnética (IRM). Por ejemplo, las NPM con valores altos de coercitividad y magnetización de saturación generan una mayor intensidad de señal en las IRM (Soleymani, *et al.*, 2020).

Las IONC recubiertas con ácido dimercaptosuccínico (IONC-DSMA) pueden crecer a partir de semillas, con lo que se obtienen diferentes tamaños y tres fases magnéticas diferentes: SPION puras, la fase ferrimagnética (FMION) y la combinación de ambas (Tabla 3). Las SPION puras tienen un valor de coercitividad cercano al 0 Oe, por ende, su pérdida de potencia específica también es baja, lo que limita críticamente la aplicación de hipertermia magnética (THM) debido a una menor pérdida de bucle de histéresis, en tanto que las FMION presentan un gran incremento de la coercitividad, lo que implica una fase ferrimagnética y una pérdida de potencia específica por encima de los 300 W/g, con un incremento frente a la fase anterior convirtiéndolas en ideales para aplicaciones biomédicas. Por último, en la fase mixta formada de SPION puras y FMION se presenta una potencia de pérdida específica ligeramente más baja (> 250 W/g), por lo que se concluye que a medida que aumenta el tamaño de la nanopartícula también lo hace su potencia de pérdida específica, dotándola de una capacidad de calentamiento ideal para la THM (Jeun, *et al.*, 2012).

Tomando en cuenta que las propiedades magnéticas dependen de la composición química de las nanopartículas y del recubrimiento, cuando se añade un recubrimiento de liposomas poliméricos (PL) a las SPION se provoca una pérdida de magnitud de saturación, y sus bucles de histéresis aparecen insignificantes. Por otra parte, una nanopartícula de óxido de hierro sin recubrimiento presenta una magnetización de saturación de 77,5 emu/g, que al añadir un recubrimiento de PL, disminuye a 61,3 emu/g, en tanto que con un doble recubrimiento de polímero el valor es de 58,2 emu/g. Este es un claro ejemplo de la pérdida de magnetización de saturación debida a los recubrimientos, disminución que se ve compensada por la generación de nanopartículas más uniformes y la mejoría de las alteraciones de la superficie. Muchas de las formulaciones de nanopartículas de óxido de hierro estabilizadas con polímeros no presentan histéresis, lo que indica la naturaleza superparamagnética de los nanomateriales (Gómez-Sotomayor, *et al.*, 2015; Liao, *et al.*, 2011; Yallapu, *et al.*, 2011).

En resumen, las propiedades magnéticas dependen del tamaño de la nanopartícula; cuanto más grande sea el núcleo, mejores serán sus propiedades magnéticas, lo que es deseable en los tratamientos, ya que estas aumentan de tamaño con su funcionalización sin que se alteren sus propiedades magnéticas, manteniendo el superparamagnetismo y, aunque su SLP y Ms disminuyen, ambas propiedades pueden seguir utilizándose en los tratamientos. Sin embargo, las nanopartículas de núcleos grandes no son adecuadas para el diagnóstico porque al ser funcionalizadas aumentan su tamaño, con lo cual disminuyen varias de sus capacidades magnéticas y se corre el riesgo de que sean capturadas por el sistema retículo endotelial o se vea comprometido su paso por el sistema circulatorio.

Aplicaciones biomédicas

El cáncer se considera una enfermedad maligna en la que se produce un desarrollo incontrolado de células anormales y la consiguiente formación de tumores capaces de diseminarse por todo el cuerpo y, en consecuencia, afectar las células y tejidos sanos. En Ecuador la tasa de incidencia es de 154,6 por cada 100.000 habitantes, lo que representa costos económicos sumamente altos para el sistema de salud (Bray, *et al.*, 2018; Pointer, *et al.*, 2021).

Actualmente los principales tratamientos utilizados son la cirugía, la radioterapia y la quimioterapia. Para la erradicación de cánceres locales, la elección principal es la cirugía y la radioterapia, seguida en algunos casos de compuestos quimioterapéuticos, sin embargo, estos adolecen de una falta de especificidad que da lugar a efectos secundarios graves debido a la destrucción simultánea e incontrolada de células sanas (Pérez-Herrero & Fernández-Medarde, 2015). En este contexto, las nanopartículas magnéticas dirigidas pueden proporcionar una mejor selectividad tumoral.

Las aplicaciones biomédicas de las NPM frecuentemente utilizadas son los óxidos de hierro, las ferritas de espinela y los metales puros como el hierro (Fe). En los artículos analizados sobresalen óxidos de hierro como la magnetita (Fe_3O_4) y la maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) por sus propiedades magnéticas, buena biocompatibilidad y su fácil degradación en el organismo (Banerjee, *et al.*, 2010; Farzin, *et al.*, 2020; Ramos & Castillo, 2011).

Las nanopartículas más pequeñas se emplean para las IRM y la administración de fármacos, en tanto aquellas con núcleos más grandes se utilizan en la terapia de hipertermia magnética (THM).

Las NPM poseen una amplia gama de aplicaciones biomédicas, pero esta revisión se centró en cuatro de ellas (Figura 4) por sus resultados prometedores en la lucha contra el cáncer durante la última década. Además, el diagnóstico y la terapia se pueden combinar en una misma plataforma para lograr una mayor eficacia y menor toxicidad en los tratamientos (teragnosis). En la tabla 4 se presentan los resultados de los ensayos *in vitro* e *in vivo* de estas cuatro aplicaciones.

Hipertermia magnética (THM). Esta técnica se emplea mayormente como terapia adyuvante para prevenir la reaparición del cáncer. En el caso de las SPION y las IONC, su notable capacidad calorífica les permite convertir energía en calor, alterando los dominios

dentro de sus núcleos y creando una reacción exotérmica que provoca apoptosis y necrosis en las células cancerosas, ya que estas son sensibles al calor (Fernández, 2013; Jeun, et al., 2012; Kossatz, et al., 2015).

En un estudio realizado con SPION recubiertas de DMSA, a las cuales unieron un pseudopéptido multivalente (N6L) y doxorubicina (DOX), para determinar la capacidad destructiva y selectiva en un adenocarcinoma mamario en células MDA-MB-231 en ratones hembra desnudos atímicos, se observó que tras la aplicación de un campo magnético alterno (*alternating magnetic field*, AMF), se produjo un 85 % de muerte celular debido al mayor potencial de calentamiento generado, así como un 40 % de disminución de la masa tumoral mamaria. Además, la biocompatibilidad y la captación específica en el tejido tumoral fueron excelentes, lo que significa que es una terapia tolerable y eficaz con poca captación en el hígado (Kossatz, et al., 2014, 2015).

En otro estudio se aplicaron $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{MnFe}_2\text{O}_4$ y DOX en ratones desnudos con células de glioblastoma (U87MG), lo que resultó en la ablación del tumor después de 18 días de inducir la THM, en tanto que el área tratada solo con DOX mostró una disminución significativa del volumen tumoral pero a los 18 días volvió a crecer (Lee, et al., 2011).

Asimismo, las nanopartículas de sílice mesoporosas causan una inhibición significativa del crecimiento tumoral con bajas dosis magnéticas 48 horas después de aplicar la THM sin un aumento general de la temperatura (Guisasola, et al., 2018).

Administración de fármacos. El diseño de nanoportadores permite una ruta de administración específica hacia el tejido tumoral de fármacos quimioterapéuticos como la doxorubicina (DOX), la dapagliflozina (DAPA), la artemisinina, la β -lapachona (β -lap) y el 5-fluorouracilo (5-FU), evitando o reduciendo la cantidad de fármaco absorbido por las células sanas. Comúnmente, las IONP cargadas de fármacos inhiben significativamente el

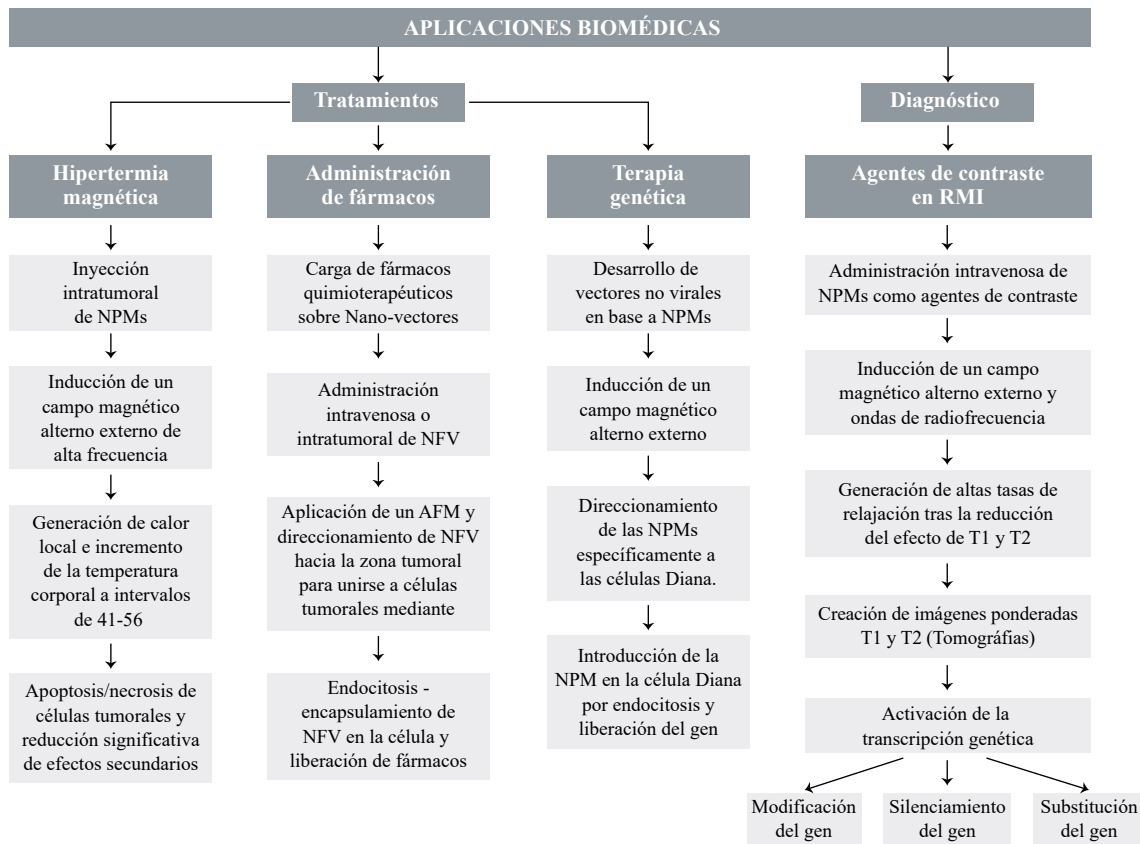


Figura 4. Procedimiento y administración de nanopartículas magnéticas en las principales aplicaciones biomédicas reportadas

Tabla 4. Principales resultados en ensayos *in vivo* e *in vitro* sobre la administración de NPM en aplicaciones biomédicas

NPMs	Recubrimiento	Funcionalización	Tamaño (nm)	Tipo de tratamiento	Tipo de ensayo	Mecanismo	Resultados	Referencia
CoFe ₂ O ₄ @MnFe ₂ O ₄	Polímero termosensible	DOX	15	THM	<i>In vivo</i>	(f= 500 kHz; H= 37,3 kA/m) durante 10 min en ratones hembra BALB/c	Ablación del tumor 18 días después del tratamiento	Lee, <i>et al.</i> , 2011
SPION	CD200 y F17	SPION-CUR	123	Teragnosis (IRM + administración de fármacos)	<i>In vitro</i>	Cultivo celular de A2780CP, MDA-MB-231, PC-3	Mejor calidad de las imágenes Inhibición de la proliferación celular	Yallapu, <i>et al.</i> , 2011, 2012
SPION	PAA-PEI	-pADN _{GFP}	~101	Terapia genética	<i>In vitro</i>	Cultivo celular de B16F1, SK-MEL-28 humano, MeT-5 y L929	Alta viabilidad celular	Prijic, <i>et al.</i> , 2012
SPION	PEG	Ácido fólico	18,5 ±3,4	IRM	<i>In vivo</i>	Inyección intravenosa de NPs en ratones machos A/J	Imágenes con mejor contraste	Yoo, <i>et al.</i> , 2012
SPION-DMSA	dimercaptosuccínico (DMSA)	-	15 ± 2	THM	<i>In vivo</i>	AMF (H=15,4 kA/m, f=435 KHz) durante 1 h en ratones hembra desnudos atímicos	Reducción del volumen de ambos tumores	Kossatz, <i>et al.</i> , 2014
SPIONs-MF66		Pseudopéptido multivalente	12 ± 3					
ZnF ₂ O ₄	mSi	Plásmido	117,2 ± 37	Teragnosis (THM + Terapia genética)	<i>In vitro</i> <i>In vivo</i>	Cultivo de células AD-MSCs. THM a 41 °C	Activación del vector genético; reducción del volumen tumoral	Yin, <i>et al.</i> , 2016
Magnetita	QTS	Artemisinina	238.7	Administración de fármacos	<i>In vivo</i>	Administración del fármaco en ratones BALB/c	Buena liberación y encapsulación del fármaco	Natesan, <i>et al.</i> , 2017
IONC	PEG	-	12	RMI	<i>In vivo</i>	Administración de NP en perros y macacos	Imágenes y angiografías con alta calidad	Lu, <i>et al.</i> , 2017
SPION	SiO ₂	TRP	160	THM	<i>In vivo</i>	AMF (105 kHz, 18 KA/m) durante 30 min en ratones C57/BL6	Inhibición del crecimiento tumoral	Guisasola, <i>et al.</i> , 2018
SPION	PMAA-g-PEGMA	-	~70	Administración de fármacos	<i>In vitro</i>	Cultivo de células de cáncer pulmón (A549)	Capacidad de carga del 10, 75 % El AMF mejora la captación de NPs	Angelopoulou, <i>et al.</i> , 2018
IONC	Glucosa	Folato	91.2 ± 20.8 nm.	Administración de fármacos	<i>In vitro</i> <i>In vivo</i>	Cultivo de células de cáncer de ovario Administración de DOX en ratones CD-1	Mayor citotoxicidad del fármaco Inhibición del crecimiento tumoral	Ak, <i>et al.</i> , 2018
IONP	DEX	AF@Fe ₃ O ₄ (B)	50 – 110	Teragnosis (THM+IRM)	<i>In vivo</i>	AMF (f= 150 kHz, H = 12.5 mT) en ratones BALB/c durante 72 h	La progresión del crecimiento del tumor disminuye	Soleymani, <i>et al.</i> , 2020

desarrollo de los tumores pancreáticos sin toxicidad. Debido a su pequeño tamaño (<50 nm), la retención en el peritoneo antes de ingresar a la circulación sistémica a través del sistema linfático es relativamente más prolongada y pueden ser eliminadas en 24 a 48 h (Gao, *et al.*, 2017; Yigit, *et al.*, 2012).

Un estudio con cultivos de células de cáncer de pulmón A549 evidenció que las nanopartículas con un núcleo de óxido de hierro magnético y un poli-injerto en poli (ácido metacrílico y metacrilato de etilenglicol, PMAA-g-PEGMA) sin fármaco tuvieron una citotoxicidad <10 %, lo que demuestra una buena biocompatibilidad, en tanto que cargadas con el fármaco dapagliflozina (PMAA-g-PEGMA-DAPA) presentaron una citotoxicidad dependiente de la concentración del fármaco. Al inducir un AMF debajo de la placa celular, la citotoxicidad aumentó frente a las células A549, puesto que este induce una mayor tasa de captación de PMAA-g-PEGMA-DAPA por parte de las células cancerosas, produciendo un 10 % de apoptosis adicional (**Angelopoulou, et al., 2018**).

Por otra parte, las micelas de SPION produjeron una acción sinérgica con β -lap, un nuevo fármaco contra el cáncer, por el estrés oxidativo que se genera cuando se liberan iones de hierro dentro de las células de cáncer de mama. Sin embargo, dicho efecto sinérgico no dio lugar a citotoxicidad significativa y más del 80 % de las micelas de SPION se localizaron en endosomas tardíos y lisosomas (**Huang, et al., 2013**).

En un estudio reciente, un nanoportador compuesto por Fe_3O_4 (GNP) y cargado con DOX (DGNP), recubierto de glucosa y funcionalizado con ligandos de folato, se dirigió específicamente al RF sobreexpresado en células de cáncer de ovario (A2780, SKOV3 y OVCAR3), lo que permitió una liberación controlada del fármaco con mayor citotoxicidad en las células cancerosas. En el mismo estudio se inoculó DOX y DGNP en ratones hembras desnudos CD-1 con células de cáncer de ovario (SKOV3) y se observó una inhibición del 86 % del crecimiento tumoral. Por la focalización magnética y la unión específica al RF, este resultó ser un importante tratamiento tumoral, reduciendo drásticamente los efectos secundarios, pues el fármaco se acumuló específicamente en la zona tumoral y, por lo tanto, la captación de DGNP en el hígado y el pulmón disminuyó, a diferencia de lo reportado para el grupo tratado solo con DOX, que presentó una focalización deficiente con acumulación principalmente en el bazo, el hígado y los pulmones (**Ak, et al., 2018**).

En otro estudio se diseñó un nanoportador formado por quitosano y magnetita y cargado con artemisinina, un fármaco antipalúdico y anti-angiogénico, para apuntar a las células de cáncer de mama (4T1) en ratones BALB/c mediante la aplicación de un AMF. El nanoportador ofreció una encapsulación del 55 al 62,5 % y una liberación controlada del fármaco del 62 al 78 % en el tumor, con baja toxicidad para las células sanas, pues se evitó la acumulación inespecífica gracias al campo aplicado (**Natesan, et al., 2017**).

Por otra parte, para transportar magnéticamente 5-FU y DOX se empleó un nuevo diseño de nanopartículas consistente en un núcleo de Fe cubierto con una capa de magnetita y PEG ($\text{Fe-Fe}_3\text{O}_4$ -PEG). Los estudios de rendimiento indicaron que después de 43 h se liberó el 90 % de DOX en el área del tumor con un efecto quimioterapéutico satisfactorio incluso en bajas concentraciones, en tanto que el 5-FU se liberó más lentamente, por debajo del 13 %, durante el mismo periodo de tiempo, lo cual se debe a la atracción hidrófoba entre las cadenas de PEG y DOX, ya que DOX posee una carga positiva y 5-FU negativa, es decir, es un ácido débil (**Gómez-Sotomayor, et al., 2015**).

Agentes de contraste en imágenes de resonancia magnética

En la detección del cáncer por imagen, las nanopartículas están emergiendo como potentes agentes de contraste, ya que reducen la relajación longitudinal (T_1) y transversal (T_2), produciendo imágenes ponderadas en T_1 (tejidos blandos y grasas) y T_2 (tumores e inflamaciones) con buena resolución espacial y mejor contraste que los agentes quelantes de gadolinio, lo que permite la diferenciación entre tejidos sanos y enfermos (**Banerjee, et al., 2010**). Por ejemplo, gracias a sus propiedades superparamagnéticas, la SPION presenta una alta relaxividad, generando así un fuerte contraste T_2 que mejora la visualización de cualquier anomalía (tumores, ganglios linfáticos y metástasis) (**Azhdarzadeh, et al., 2016**).

Por otra parte, las USPIO se han ensayado de manera segura como agentes de contraste en ensayos *in vivo* gracias a su pequeño tamaño, cerca de 50 nm, que hace difícil su captación por el sistema retículo endotelial, con un tiempo de circulación sanguínea de hasta 24 h (**Lim, et al., 2011; Liu, et al., 2019**).

A continuación, se presentan diversos estudios *in vitro* e *in vivo* en los que se han ensayado varias combinaciones de nanopartículas para obtener una mejor y más eficiente visualización de células y masas tumorales.

En uno se evidenció que al emplear nanopartículas de SPION unidas a liposomas poliméricos (PLs) y ligandos de folato (SPION-PLs-folato) como agentes de contraste en cultivos de células de carcinoma cervical (HeLa), se obtuvieron imágenes ponderadas de alta calidad. Además, la funcionalización con folato permitió obtener ligandos que reconocieron las proteínas de unión sobreexpresadas en la superficie de las células HeLa, y un tropismo más directo con una mejor interacción celular, así como una baja citotoxicidad para las células sanas y una alta biocompatibilidad (Liao, *et al.*, 2011).

En otro estudio un recubrimiento de Au funcionalizado con aptámeros de oligonucleótidos modificados con tiol (MUC-1), utilizado como agente blanco permitió que la SPION tuviera un alto potencial como agente de contraste, proporcionando una mejora significativa del contraste *in vitro* a partir del cultivo de células de cáncer de colon (HT-29), con baja citotoxicidad, alta captación celular y mayor viabilidad en bajas concentraciones (Azhdarzadeh, *et al.*, 2016).

En el estudio se formaron nanopartículas de PEG unidas a SPION (PEG-SPION) conjugadas con folato (AF-PEG-SPION), las cuales se inocularon como agentes de contraste en ratones macho A/J. Se observó que las imágenes con mejor contraste se lograban con las AF-PEG-SPION, ya que la captación intracelular se vio fuertemente inhibida por la endocitosis mediada por el receptor de ácido fólico (Yoo, *et al.*, 2012).

Asimismo, para la detección de metástasis de xenoinjertos de carcinoma nasofaríngeo en ratones desnudos BALB/C se empleó USPIO-PEG como agente de contraste, la cual al fusionarse con un ligando sialyl Lewis X (sLe X), mejoró el contraste negativo en las imágenes, ya que el sLe X permitió la detección temprana del carcinoma nasofaríngeo, así como una determinación más precisa del estadio y un mejor seguimiento del tratamiento (Liu, *et al.*, 2019).

Con el objetivo de determinar la seguridad y la biocompatibilidad, se realizaron estudios *in vivo* en una población de conejos, perros Beagle y macacos, a los cuales se les administraron por vía intravenosa nanopartículas PEG-IONC. Como resultado, se obtuvieron imágenes ponderadas de alta calidad y angiografías arteriales de todo el cuerpo en conejos y perros Beagle, en tanto que en los macacos fue posible obtener una angiografía del sistema vascular de la parte superior del cuerpo con alta resolución espacial. Es decir que las nanopartículas de PEG-IONIC arrojaron imágenes mejoradas de la IRM, así como hipoperfusión y restricción de la difusión; además, tuvieron menos efectos secundarios que los agentes de contraste de gadolinio (Gd^{+3}), los cuales suponen un riesgo para personas que sufren de insuficiencia renal grave (Lu, *et al.*, 2017).

Terapia genética

El desarrollo de vectores no virales a base de nanopartículas ha permitido solucionar los problemas de toxicidad y focalización que presentan actualmente los vectores virales, ya que las nanopartículas proporcionan un transporte seguro y la transferencia de genes específica y controlada a las células diana. Específicamente las SPION y las ferritas se diseñan frecuentemente como nanoportadores que brindan protección al gen y permiten una transfección eficiente al aplicar un AMF. Además, las ferritas de zinc ($ZnFe_2O_4$) con alta magnetización de saturación se emplean a menudo para activar células madre en el cáncer de ovario (Lee, *et al.*, 2012; Yin, *et al.*, 2016; Zaimy, *et al.*, 2017).

En un estudio realizado con SPION recubiertas con una bicapa polimérica compuesta de ácido poliacrílico y polietilenimina (PAA y PEI) en combinación con ADN plasmídico que codifica la proteína verde fluorescente (GFP) (SPIONs-PAA-PEI-pDNA^{GFP}), la magnetofección estudiada en cuatro líneas celulares fue superior a los *kits* de SPION comerciales en términos de eficacia de transfección. Además, se evaluó la citotoxicidad en las líneas celulares mencionadas con SPIONs-PAA-PEI y SPIONs-PAA-PEI-pDNA^{GFP}, y se encontró que reducían la supervivencia celular en un 80 y un 70 %, respectivamente (Prijic, *et al.*, 2012).

Por otra parte, con la terapia genética se obtuvieron células madre derivadas del tejido adiposo (AD-MSC) mediante cultivo celular aplicando hipertermia con una placa magnética de Nd-Fe-B. Estas células se encontraban unidas a nanopartículas formadas por ferrietas de Zn, recubiertas por sílice mesoporosa (MCNP) y unidas a PEI (MCNP-PEI), lo que les confiere la capacidad de administrar y activar un vector genético inducible por calor que codifica una forma secretable del ligando generador de apoptosis (TRAIL). El recubrimiento de la nanopartícula con PEI facilitó la complejación con el plásmido formado, redujo la citotoxicidad, mejoró la eficacia de transfección y aumentó la biocompatibilidad. Además, después de la transfección de AD-MSC con complejos MCNP-PEI/plásmido, las células de cáncer de ovario (A2780) expuestas a una THM leve (41 °C) mostraron una disminución del 40 % en la viabilidad celular debido a la secreción de TRAIL y se produjo la apoptosis al unirse a receptores de muerte celular, como el DR4 y el DR5, expresados en la superficie de las células. Más aun, el volumen tumoral se redujo en un 50 % (Yin, *et al.*, 2016).

En otro estudio se desarrollaron SPION térmicamente reticuladas (TL) unidas a PEI (bPEI-TCL-SPION) para la liberación del gen supresor de tumores p53 en células HUVEC por magnetofección. El gen P53 se liberó en las células y se activó iniciando un programa de transcripción mediado por una señal de estrés que le permitió inducir apoptosis mediante transactivación genética. Simultáneamente, se rastrearon mediante IRM en las que es evidente que el contraste negativo mejoró al aumentar la concentración de bPEI-TCL-SPION en las células tratadas. Se demostró así que este nanoportador puede emplearse de manera eficiente en el suministro de genes supresores (Lee, *et al.*, 2012).

Las nanopartículas multifuncionales pueden formar sistemas teranósticos. Por ejemplo, la SPION con recubrimiento de β -ciclodextrina (CD200) y polímero plurónico (F127) permite verificar mediante IRM la eficacia de la administración de fármacos como la curcumina (CUR), la cual mejora la capacidad de carga farmacéutica y captación en las células tumorales gracias a los recubrimientos empleados. Se mejora, asimismo, la capacidad de la CUR de controlar la proliferación del cáncer ovárico, del mamario y el prostático (Yallapu, *et al.*, 2011, 2012).

También se encontró que la combinación de THM e IRM con AF@F₃O₄ dirigidos a células de cáncer mamario en ratones BALB/c permitió mejorar el contraste en la IRM, en tanto que el tratamiento en los tumores después de aplicar la THM produjo un ligero aumento del volumen en comparación con los no expuestos a THM (Soleymani, *et al.*, 2020).

Ventajas y desventajas de las nanopartículas magnéticas en el tratamiento y diagnóstico del cáncer

En cuanto al tratamiento del cáncer, los estudios reportan una ventaja importante relacionada con el tamaño de la nanopartícula, siendo un factor fundamental para el tiempo de circulación medio en la sangre, pues las más pequeñas tienen un mayor tiempo de circulación sanguínea, además de que el tamaño desempeña un papel determinante en sus propiedades físicoquímicas y biológicas. Además, aquellas suficientemente pequeñas se convierten en superparamagnéticas, con capacidad de magnetizarse solamente en presencia de un AMF. Sin embargo, un tamaño muy pequeño puede ser una desventaja, ya que la nanopartícula puede perderse fácilmente al ingresar al organismo o ser filtrada directamente por los riñones, de ahí que se haya establecido un rango óptimo que oscila entre 10 y 100 nm para aplicaciones biomédicas *in vivo* (Lim, *et al.*, 2011; Ramos & Castillo, 2011).

Otra desventaja se relaciona con la administración de la inyección intravenosa de nanopartículas, ya que únicamente alrededor del 1 % del material magnético alcanza el área de interés, por lo que se requieren altas dosis para liberar suficiente calor, por ejemplo cuando se emplea la THM, por lo que en la mayoría de estudios se inyectan directamente las nanopartículas en la zona tumoral para aprovecharlas al máximo. Cuando se analiza el ligando generador de apoptosis, el TRAIL, se ve que las nanopartículas aún tienen dificultad para entregar plásmido al tumor, más aun cuando se ha producido metástasis,

por lo que todavía no se puede considerar una terapia efectiva para probarla en ensayos en humanos en el marco de los sistemas de salud convencionales (Guisasola, *et al.*, 2018; Yin, *et al.*, 2016).

Conclusión

En la actualidad las NPM en el campo médico tienen varias aplicaciones, entre las que se destacan cuatro como las principales: la hipertermia magnética, la administración de fármacos, los agentes de contraste y la terapia genética, cuyos avances se centran en un uso combinado de las terapias (teragnosis) que han demostrado ser eficaces contra el cáncer.

Por sus propiedades superparamagnéticas y su baja toxicidad, las SPION son las más investigadas, representando el 31 % de los estudios aquí analizados, ya que poseen la capacidad de magnetizarse en presencia de un campo magnético externo alterno, son excelentes nanoportadores para la administración de fármacos quimioterapéuticos y suministro de genes y, además, su capacidad de calentamiento produce altas tasas de muerte en células cancerosas reduciendo drásticamente el volumen tumoral.

Asimismo, se han utilizado con éxito como agentes de contraste que mejoran significativamente las imágenes ponderadas en resonancia magnética. Por otra parte, la eficacia terapéutica de estos tratamientos está relacionada con la toxicidad de las nanopartículas cuando ingresan al sistema biológico, de ahí la importancia de los recubrimientos. Sin embargo, tras el análisis de los resultados, no se reportaron riesgos significativos relacionados con las pruebas *in vivo*. En cuanto a los beneficios más significativos, se pueden mencionar la disminución de los efectos secundarios, una mejor focalización, pues son tratamientos guiados hacia la zona tumoral, la necesidad de menos dosis de los fármacos terapéuticos y un menor tiempo de duración del tratamiento.

A pesar de los buenos resultados, es importante continuar la investigación para dar solución a problemas como la dificultad de controlar el tamaño de las nanopartículas durante la síntesis; la necesidad de encontrar o mejorar algún método que permita obtenerlas de un solo tamaño, lo que mejoraría significativamente la eficacia de los tratamientos debido a que todas tendrían las mismas propiedades, y una mayor efectividad y menor toxicidad en los tratamientos actuales de cáncer con el diseño de nuevas nanopartículas que permitan su uso en la medicina convencional. De hecho, las nuevas tecnologías de síntesis de nanopartículas Janus pueden llegar a ser las más utilizadas, pues poseen más de un compartimento, lo que las hace versátiles a la hora de la aplicación de diferentes tratamientos de cáncer y son las favoritas para futuras investigaciones (Feng, *et al.*, 2019; Lattuada & Hatton, 2011).

Agradecimiento

A las instituciones educativas que han colaborado en la redacción y edición de este estudio.

Información suplementaria

Material suplementario S1. Glosario. Ver Material suplementario S1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1560/3183>.

Contribución de los autores

YL: revisión del estado del arte en NPM, resultados comparativos, discusión y composición; IT: composición, sintaxis y redacción del cuerpo completo del artículo; GV: redacción y discusión del estado del arte en ensayos *in vivo* e *in vitro* de tratamientos de cáncer y estudios complementarios; GT: diseño y propuesta de la metodología, redacción, resultados y discusión en torno a las NPM.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Ak, G., Yilmaz, H., Güneş, A., Hamarat-Sanlier, S.** (2018). In vitro and *in vivo* evaluation of folate receptor-targeted a novel magnetic drug delivery system for ovarian cancer therapy. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*. **46** (sup1): 926-937. <https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1439838>
- Angelopoulou, A., Voulgari, E., Kolokithas-Ntoukas, A., Bakandritsos, A., Avgoustakis, K.** (2018). Magnetic Nanoparticles for the Delivery of Dapagliflozin to Hypoxic Tumors: Physicochemical Characterization and Cell Studies. *AAPS PharmSciTech*. **19** (2): 621-633. <https://doi.org/10.1208/s12249-017-0874-2>
- Azhdarzadeh, M., Atyabi, F., Saei, A. A., Varnamkhasti, B. S., Omid, Y., Fateh, M., Ghavami, M., Shانهsazzadeh, S., Dinarvand, R.** (2016). Theranostic MUC-1 aptamer targeted gold coated superparamagnetic iron oxide nanoparticles for magnetic resonance imaging and photothermal therapy of colon cancer. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. **143**: 224-232. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.02.058>
- Banerjee, R., Katsenovich, Y., Lagos, L., McIntosh, M., Zhang, X., Li, C.-Z.** (2010). Nanomedicine: Magnetic Nanoparticles and their Biomedical Applications. *Current Medicinal Chemistry*. **17** (27): 3120-3141. <http://www.eurekaselect.com/openurl/content.php?genre=article&issn=0929-8673&volume=17&issue=27&page=3120>
- Blasto, A. & Caballero, C.** (2019). Toxicidad de los tratamientos oncológicos—SEOM: Sociedad Española de Oncología Médica © 2019. Organización Española de Oncología Médica. <https://seom.org/guia-actualizada-de-tratamientos/toxicidad-de-los-tratamientos-oncologicos?showall=1>
- Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R. L., Torre, L. A., Jemal, A.** (2018). Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. **68** (6): 394-424. <https://doi.org/10.3322/caac.21492>
- Cardoso, V. F., Francesco, A., Ribeiro, C., Bañobre-López, M., Martins, P., Lanceros-Méndez, S.** (2018). Advances in Magnetic Nanoparticles for Biomedical Applications. *Advanced Healthcare Materials*. **7** (5): 1700845. <https://doi.org/10.1002/adhm.201700845>
- Coral, D. F. & Mera, J. A.** (2017). Una guía para el estudio de nanopartículas magnéticas de óxidos de hierro con aplicaciones biomédicas. Parte II. Ingeniería y Ciencia. **13** (26): 207-232. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.8>
- Farzin, A., Etesami, S. A., Quint, J., Memic, A., Tamayol, A.** (2020). Magnetic Nanoparticles in Cancer Therapy and Diagnosis. *Advanced Healthcare Materials*. **9** (9): 1901058. <https://doi.org/10.1002/adhm.201901058>
- Feng, Z.-Q., Yan, K., Li, J., Xu, X., Yuan, T., Wang, T., Zheng, J.** (2019). Magnetic Janus particles as a multifunctional drug delivery system for paclitaxel in efficient cancer treatment. *Materials Science and Engineering: C*. **104**: 110001. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110001>
- Fernández, K. C.** (2013). Síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas. UNAM. León, Guanajuato. p. 31-32. <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/559/1/15611.pdf>
- Frimpong, R. A. & Hilt, J. Z.** (2010). Magnetic nanoparticles in biomedicine: Synthesis, functionalization and applications. *Nanomedicine*. **5** (9): 1401-1414. <https://doi.org/10.2217/nnm.10.114>
- Gallo, J., Long, N. J., Aboagye, E. O.** (2013). Magnetic nanoparticles as contrast agents in the diagnosis and treatment of cancer. *Chemical Society Reviews*. **42** (19): 7816. <https://doi.org/10.1039/c3cs60149h>
- Gao, N., Bozeman, E. N., Qian, W., Wang, L., Chen, H., Lipowska, M., Staley, C. A., Wang, Y. A., Mao, H., Yang, L.** (2017). Tumor Penetrating Theranostic Nanoparticles for Enhancement of Targeted and Image-guided Drug Delivery into Peritoneal Tumors following Intraperitoneal Delivery. *Theranostics*. **7** (6): 1689-1704. <https://doi.org/10.7150/thno.18125>
- Gobbo, O. L., Sjaastad, K., Radomski, M. W., Volkov, Y., Prina-Mello, A.** (2015). Magnetic Nanoparticles in Cancer Theranostics. *Theranostics*. **5** (11): 1249-1263. <https://doi.org/10.7150/thno.11544>
- Gómez-Garzón, M.** (2018). Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*. **27** (2): Article 2. <https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191>
- Gómez-Sotomayor, R., Ahualli, S., Viota, J. L., Rudzka, K., Delgado, Á. V.** (2015). Iron/Magnetite Nanoparticles as Magnetic Delivery Systems for Antitumor Drugs. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. **15** (5): 3507-3514. <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.9856>

- Guisasola, E., Asín, L., Beola, L., de la Fuente, J. M., Baeza, A., Vallet-Regí, M.** (2018). Beyond Traditional Hyperthermia: *In Vivo* Cancer Treatment with Magnetic-Responsive Mesoporous Silica Nanocarriers. *ACS Applied Materials & Interfaces*. **10** (15): 12518-12525. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02398>
- Hauksdóttir, H. L. & Webster, T. J.** (2018). Selenium and Iron Oxide Nanocomposites for Magnetically-Targeted Anti-Cancer Applications. *Journal of Biomedical Nanotechnology*. **14** (3): 510-525. <https://doi.org/10.1166/jbn.2018.2521>
- Hu, J., Youssefian, S., Obayemi, J., Malatesta, K., Rahbar, N., Soboyejo, W.** (2018). Investigation of adhesive interactions in the specific targeting of Triptorelin-conjugated PEG-coated magnetite nanoparticles to breast cancer cells. *Acta Biomaterialia*. **71**: 363-378. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.02.011>
- Huang, G., Chen, H., Dong, Y., Luo, X., Yu, H., Moore, Z., Bey, E. A., Boothman, D. A., Gao, J.** (2013). Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles: Amplifying ROS Stress to Improve Anticancer Drug Efficacy. *Theranostics*. **3** (2): 116-126. <https://doi.org/10.7150/thno.5411>
- International Day of Radiology-IDoR.** (2012). Haciendo visible el cáncer El rol del diagnóstico por imágenes en oncología. ESR – Sociedad Europea de Radiología. <https://es.scribd.com/document/437698237/IDOR-2012-OncologyImaging-Spanish-pdf>
- Instituto Nacional del Cáncer.** (2012). Aspectos generales de los exámenes de detección del cáncer (PDQ®)—Versión para pacientes—Instituto Nacional del Cáncer (nciglobal,ncienterprise) (PdqCancerInfoSummary). Instituto Nacional del Cáncer. <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/deteccion/aspectos-generales-deteccion-paciente-pdq>
- Jeun, M., Lee, S., Kyeong Kang, J., Tomitaka, A., Wook Kang, K., Il Kim, Y., Takemura, Y., Chung, K.-W., Kwak, J., Bae, S.** (2012). Physical limits of pure superparamagnetic Fe₃O₄ nanoparticles for a local hyperthermia agent in nanomedicine. *Applied Physics Letters*. **100** (9): 092406. <https://doi.org/10.1063/1.3689751>
- Kossatz, S., Grandke, J., Couleaud, P., Latorre, A., Aires, A., Crosbie-Staunton, K., Ludwig, R., Dähring, H., Ettelt, V., Lazaro-Carrillo, A., Calero, M., Sader, M., Courty, J., Volkov, Y., Prina-Mello, A., Villanueva, A., Somoza, Á., Cortajarena, A. L., Miranda, R., Hilger, I.** (2015). Efficient treatment of breast cancer xenografts with multifunctionalized iron oxide nanoparticles combining magnetic hyperthermia and anti-cancer drug delivery. *Breast Cancer Research*. **17** (1): 66. <https://doi.org/10.1186/s13058-015-0576-1>
- Kossatz, S., Ludwig, R., Dähring, H., Ettelt, V., Rimkus, G., Marciello, M., Salas, G., Patel, V., Teran, F. J., Hilger, I.** (2014). High Therapeutic Efficiency of Magnetic Hyperthermia in Xenograft Models Achieved with Moderate Temperature Dosages in the Tumor Area. *Pharmaceutical Research*. **31** (12): 3274-3288. <https://doi.org/10.1007/s11095-014-1417-0>
- Lattuada, M. & Hatton, T. A.** (2011). Synthesis, properties and applications of Janus nanoparticles. *Nano Today*. **6** (3): 286-308. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2011.04.008>
- Lechuga, L. M.** (2011). Nanomedicina: aplicación de la nanotecnología en la salud. Grupo 5. <https://digital.csic.es/handle/10261/44635>
- Lee, H. J., Nguyen, Y. T. C., Muthiah, M., Vu-Quang, H., Namgung, R., Kim, W. J., Yu, M. K., Jon, S., Lee, I. K., Jeong, Y. Y., Park, I. K.** (2012). MR Traceable Delivery of p53 Tumor Suppressor Gene by PEI-Functionalized Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles. *Journal of Biomedical Nanotechnology*. **8** (3): 361-371. <https://doi.org/10.1166/jbn.2012.1407>
- Lee, J.-H., Jang, J., Choi, J., Moon, S. H., Noh, S., Kim, J., Kim, J.-G., Kim, I.-S., Park, K. I., Cheon, J.** (2011). Exchange-coupled magnetic nanoparticles for efficient heat induction. *Nature Nanotechnology*. **6** (7): 418-422. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.95>
- Liao, Z., Wang, H., Lv, R., Zhao, P., Sun, X., Wang, S., Su, W., Niu, R., Chang, J.** (2011). Polymeric Liposomes-Coated Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles as Contrast Agent for Targeted Magnetic Resonance Imaging of Cancer Cells. *Langmuir*. **27** (6): 3100-3105. <https://doi.org/10.1021/la1050157>
- Lim, S.-W., Kim, H.-W., Jun, H.-Y., Park, S.-H., Yoon, K.-H., Kim, H.-S., Jon, S., Yu, M. K., Juhng, S.-K.** (2011). TCL-SPION-enhanced MRI for the Detection of Lymph Node Metastasis in Murine Experimental Model. *Academic Radiology*. **18** (4): 504-511. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2010.10.017>
- Liu, L., Liu, L., Li, Y., Huang, X., Gu, D., Wei, B., Su, D., Jin, G.** (2019). Ultrasmall superparamagnetic nanoparticles targeting E-selectin: Synthesis and effects in mice *in vitro* and *in vivo*. *International Journal of Nanomedicine*. **14**: 4517-4528. <https://doi.org/10.2147/IJN.S199571>

- Lu, Y., Xu, Y.-J., Zhang, G., Ling, D., Wang, M., Zhou, Y., Wu, Y.-D., Wu, T., Hackett, M. J., Hyo Kim, B., Chang, H., Kim, J., Hu, X.-T., Dong, L., Lee, N., Li, F., He, J.-C., Zhang, L., Wen, H.-Q., Zou, D.-H. (2017). Iron oxide nanoclusters for T1 magnetic resonance imaging of non-human primates. *Nature Biomedical Engineering*. **1** (8): 637-643. <https://doi.org/10.1038/s41551-017-0116-7>
- Natesan, S., Ponnusamy, C., Sugumaran, A., Chelladurai, S., Shanmugam Palaniappan, S., Palanichamy, R. (2017). Artemisinin loaded chitosan magnetic nanoparticles for the efficient targeting to the breast cancer. *International Journal of Biological Macromolecules*. **104**: 1853-1859. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.137>
- Organización Mundial de la Salud-OMS. (2021). Cáncer. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
- Pereira, C., Pereira, A. M., Fernandes, C., Rocha, M., Mendes, R., Fernández-García, M. P., Guedes, A., Tavares, P. B., Grenèche, J.-M., Araújo, J. P., Freire, C. (2012). Superparamagnetic MFe₂O₄ (M = Fe, Co, Mn) Nanoparticles: Tuning the Particle Size and Magnetic Properties through a Novel One-Step Coprecipitation Route. *Chemistry of Materials*. **24** (8): 1496-1504. <https://doi.org/10.1021/cm300301c>
- Pérez-Herrero, E. & Fernández-Medarde, A. (2015). Advanced targeted therapies in cancer: Drug nanocarriers, the future of chemotherapy. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. **93**: 52-79. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2015.03.018>
- Pointer, K. B., Pitroda, S. P., Weichselbaum, R. R. (2021). Radiotherapy and immunotherapy: Open questions and future strategies. *Trends in Cancer*. **8** (1): 9-20. Elsevier, Chicago. <https://doi.org/10.1016/j.trecan.2021.10.003>
- Prijic, S., Prosen, L., Cemazar, M., Scancar, J., Romih, R., Lavrencak, J., Bregar, V. B., Coer, A., Krzan, M., Znidarsic, A., Sersa, G. (2012). Surface modified magnetic nanoparticles for immuno-gene therapy of murine mammary adenocarcinoma. *Biomaterials*. **33** (17): 4379-4391. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.02.061>
- Rahim, S., Jan Iftikhar, F., Malik, M. I. (2020). Biomedical applications of magnetic nanoparticles. In *Metal Nanoparticles for Drug Delivery and Diagnostic Applications* (pp. 301-328). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816960-5.00016-1>
- Ramos, M. & Castillo, C. (2011). Aplicaciones biomédicas de las nanopartículas magnéticas. *Ide@s CONCYTEG*. **6** (72): 629-646. <http://oa.upm.es/13652/>
- Soleymani, M., Khalighfard, S., Khodayari, S., Khodayari, H., Kalhori, M. R., Hadjighassem, M. R., Shaterabadi, Z., Alizadeh, A. M. (2020). Effects of multiple injections on the efficacy and cytotoxicity of folate-targeted magnetite nanoparticles as theranostic agents for MRI detection and magnetic hyperthermia therapy of tumor cells. *Scientific Reports*. **10** (1): 1695. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58605-3>
- Valencia Barrón, J. P. (2013). *Síntesis y caracterización de cristales de oxiclورو de bismuto por métodos Hidrotermal y Solvotermal en presencia de diferentes agentes estabilizantes* Maestría, Universidad Iberoamericana. <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/015743/015743.pdf>
- Wang, R., Billone, P. S., Mullett, W. M. (2013). Nanomedicine in Action: An Overview of Cancer Nanomedicine on the Market and in Clinical Trials. *Journal of Nanomaterials*. **2013**: 1-12. <https://doi.org/10.1155/2013/629681>
- Wicki, A., Witzigmann, D., Balasubramanian, V., Huwyler, J. (2015). Nanomedicine in cancer therapy: Challenges, opportunities, and clinical applications. *Journal of Controlled Release*. **200**: 138-157. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.12.030>
- Wu, H., Liu, G., Wang, X., Zhang, J., Chen, Y., Shi, J., Yang, H., Hu, H., Yang, S. (2011). Solvothermal synthesis of cobalt ferrite nanoparticles loaded on multiwalled carbon nanotubes for magnetic resonance imaging and drug delivery. *Acta Biomaterialia*. **7** (9): 3496-3504. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.05.031>
- Yallapu, M. M., Othman, S. F., Curtis, E. T., Bauer, N. A., Chauhan, N., Kumar, D., Jaggi, M., Chauhan, S. C. (2012). Curcumin-loaded magnetic nanoparticles for breast cancer therapeutics and imaging applications. *International Journal of Nanomedicine*. **7**: 1761-1779. <https://doi.org/10.2147/IJN.S29290>
- Yallapu, M. M., Othman, S. F., Curtis, E. T., Gupta, B. K., Jaggi, M., Chauhan, S. C. (2011). Multi-functional magnetic nanoparticles for magnetic resonance imaging and cancer therapy. *Biomaterials*. **32** (7): 1890-1905. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.11.028>
- Yigit, M. V., Moore, A., Medarova, Z. (2012). Magnetic Nanoparticles for Cancer Diagnosis and Therapy. *Pharmaceutical Research*. **29** (5): 1180-1188. <https://doi.org/10.1007/s11095-012-0679-7>

-
- Yin, P. T., Shah, S., Pasquale, N. J., Garbuzenko, O. B., Minko, T., Lee, K.-B.** (2016). Stem cell-based gene therapy activated using magnetic hyperthermia to enhance the treatment of cancer. *Biomaterials*. **81**: 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.11.023>
- Yoo, M.-K., Park, I.-K., Lim, H.-T., Lee, S.-J., Jiang, H.-L., Kim, Y.-K., Choi, Y.-J., Cho, M.-H., Cho, C.-S.** (2012). Folate-PEG-superparamagnetic iron oxide nanoparticles for lung cancer imaging. *Acta Biomaterialia*. **9**: 3006-3013.
- Zaimy, M. A., Saffarzadeh, N., Mohammadi, A., Pourghadamyari, H., Izadi, P., Sarli, A., Moghaddam, L. K., Paschepari, S. R., Azizi, H., Torkamandi, S., Tavakkoly-Bazzaz, J.** (2017). New methods in the diagnosis of cancer and gene therapy of cancer based on nanoparticles. *Cancer Gene Therapy*. **24** (6): 233-243. <https://doi.org/10.1038/cgt.2017.16>

Original article

Seroreactivity to SARS-CoV-2 in individuals attending a university campus in Bogotá, Colombia

Serorreactividad al SARS-CoV-2 en trabajadores de un campus universitario en Bogotá, Colombia

John M. Gonzalez^{1,*}, Juan Carlos Santos-Barbosa¹, Catherine Jaller², Germán Otalora², Luis J. Hernández³, Marcela Guevara-Suárez⁴, Silvia Restrepo⁵

¹ Grupo de Ciencias Básicas Médicas, Facultad de Medicina, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

² Departamento Médico y Salud Ocupacional, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

³ Facultad de Medicina, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

⁴ Grupo de Genómica Aplicada, Vice-rectoría de Investigación y Creación, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

⁵ Laboratorio de Micología y Fitopatología (LAMFU), Departamento de Ingeniería Química y de Alimentos, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

Abstract

Most community-specific serological surveys for SARS-CoV-2 antibodies have been performed in healthcare workers and institutions. In this study, IgG antibodies specific to the virus were evaluated in individuals working at a university campus in Bogotá, Colombia. Our aim was to determine previous exposure to SARS-CoV-2 in those attending the campus during city lockdown. A total of 237 individuals including 93 women and 144 men were evaluated using chemiluminescent detection of IgG anti-N-viral protein between November and December 2020. There were 32 positive individuals, i.e., a seroprevalence of 13.5% (10 women and 22 men) mostly asymptomatic (68.75%); we identified three clusters of seropositive individuals. Only 13 of the seropositive individuals had previous positive detection of SARS-CoV-2 RNA by RT-qPCR performed on average 91 days before the serological test. Seropositive individuals did not come from the boroughs with higher percentages of SARS-CoV-2 cases in the city. The survey was carried out after the first peak of SARS-CoV-2 transmission in the city and before the preparedness to reopen the campus for students in 2021, which demonstrates a low seroprevalence in a high percentage of asymptomatic individuals. These results will help to evaluate some of the strategies established to control virus spread on the campus or other similar communities.

Key words: Coronavirus; SARS-CoV-2; Covid-19; serology.

Resumen

La mayoría de las evaluaciones serológicas comunitarias específicas para los anticuerpos de SARS-CoV-2 se han realizado en instituciones y en trabajadores de la salud. En este estudio, se evaluaron anticuerpos IgG específicos para el virus en personas que trabajaban en una universidad de Bogotá, Colombia. El objetivo fue determinar la exposición previa a SARS-CoV-2 en los asistentes al campus durante el cierre de la ciudad. Se evaluaron 237 personas, incluidas 93 mujeres y 144 hombres, mediante la detección quimioluminiscente de anticuerpos IgG anti-proteína N viral entre noviembre y diciembre de 2020. Se encontraron 32 individuos positivos, es decir, una seroprevalencia del 13,5 % (10 mujeres y 22 hombres), en su mayoría asintomáticos (68,75 %) y se determinaron tres grupos de individuos seropositivos. Solo 13 de los individuos serorreactivos tenían una detección positiva previa del ARN del SARS-CoV-2 mediante RT-qPCR realizada, en promedio, 91 días antes de la prueba serológica. Los individuos seropositivos no provenían de las localidades con los porcentajes más altos de casos de SARS-CoV-2 en la ciudad. La encuesta se realizó después del primer pico de transmisión del SARS-CoV-2 en la ciudad y antes de la preparación para la reapertura del campus a estudiantes en el 2021, y demostró una baja seroprevalencia con un alto porcentaje de asintomáticos. Estos resultados ayudarán a evaluar algunas de las estrategias establecidas para controlar la propagación del virus en instituciones educativas u otras comunidades similares.

Palabras clave: Coronavirus; SARS-CoV-2; Covid-19; Serología.

Citation: Gonzalez JM, Santos-Barbosa JC, Jaller C, *et al.* Seroreactivity to SARS-CoV-2 in individuals attending a university campus in Bogotá, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):27-35, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1590>

Editor: Luis Fernando García

***Corresponding autor:**

John M. González;
johgonza@uniandes.edu.co

Received: October 29, 2021

Accepted: December 8, 2021

Published on line: February 1, 2022



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

Introduction

Covid-19 caused by SARS-CoV-2 emerged in China in 2019 (Zhu, *et al.*, 2020). Due to the pandemic by the dissemination of the virus, several control and restricted community-based measures have been adopted worldwide (Ebrahim, *et al.*, 2020). Coronavirus is transmitted directly from person to person or by contamination with fluids from infected individuals; wearing facemasks and hand washing are the most commonly used personal protective measures to avoid infection spread (Morawska & Cao, 2020; Roshan, *et al.*, 2020).

The recommended test during acute infection is the nucleic acid amplification test (NAAT) using reverse transcriptase polymerase chain reaction (RT-qPCR) for the detection of viral RNA in secretions from the respiratory tract, mainly nasopharyngeal and oropharyngeal swabs (World Health Organization-WHO, 2020). Serological tests are used to determine previous exposure to microbial agents; they are usually faster, cheaper, and some can be used as point-of-care (POC) tests. Serological assays to measure SARS-CoV-2 specific antibodies are useful for surveillance studies and to determine the rate of exposure (Lisboa-Bastos, *et al.*, 2020). There are different methods available including lateral flow immuno-chromatography (LFI), ELISA, and chemiluminescence (CLIA) with a wide brand offer (González, *et al.*, 2020). Among other variables, serological tests can differ from antigens used for antibody detection and performance characteristics such as sensibility and specificity (Lisboa-Bastos, *et al.*, 2020; Müller, *et al.*, 2021). A recent study has shown that the humoral immune response against SARS-CoV-2 is driven primarily by the spike (S) and nucleocapsid (N) viral proteins (Shrock, *et al.*, 2020).

IgA and IgM-specific antibodies can appear 5 days post-infection (pi) on average. IgG can be detected at day 14 pi (Guo, *et al.*, 2020) and most people have already seroconverted between day 15 to 21 pi (Guo, *et al.*, 2020; Zhao, *et al.*, 2020). IgG-specific antibodies against N (nucleocapsid) protein or S (spike) protein can be detected as far as eight months after acute infection (Dan, *et al.*, 2021).

Most epidemiological and serological-specific population studies have been conducted in high-risk communities such as health workers and institutions (Houlihan, *et al.*, 2020; Lumley, *et al.*, 2021). Reopening university campuses represents a challenge due to several factors including population commuting from different places, people socialization and gatherings, and indoor activities such as lectures, laboratories, and workshops which help the virus to spread. In this context, our goal was to assess the SARS-CoV-2 seroprevalence in individuals attending the *Universidad de Los Andes* campus in Bogotá, Colombia, before its reopening in 2021 and after the first peak of SARS-CoV-2 transmission in the city during 2020.

Materials and Methods

Ethics

The *Universidad de Los Andes* Ethical Committee approved the protocol and informed consent forms (Act No 1192-2020). Volunteers signed the informed consent before participation. The study followed the national regulations and the Helsinki Protocol.

Type of study and population

We conducted a cross-sectional study at the *Universidad de Los Andes* located in Bogotá, Colombia, which has a population of 15,581 students, 1,808 teaching staff, and 2,333 employees (Universidad de Los Andes, 2021). The participants were working at the campus during city lockdown while teaching was mostly remote. Individuals working in place were categorized and characterized according to their age and the presence of comorbidities; neither they nor the members of their households had a risk of complications due to SARS-CoV-2 (age over 65 years, risk of contagion, and COVID-19-related risk comorbidities). Risk characterization of individuals was based on the regulations of the Colombian health authority (resolution 666 and communication # 30, 2020).

Blood sampling

Sampling was carried out between the last week of November and the first week of December 2020. Blood samples were drawn from the antecubital vein using a vacutainer without anticoagulants (BD, Franklin Lakes, NJ, USA). We centrifuged blood at 2,500 rpm for 5 min, separated the sera, and stored them at 4°C until their use for antibody detection the following day.

IgG anti-SARS-CoV-2 antibody detection

We used the Abbott IgG Architect SARS-CoV-2 chemiluminescence assay (Abbott, Abbott Park IL, USA) following the manufacturer's instructions. For antibody detection, we used the nucleocapsid protein (N) from SARS-CoV-2 as the antigen. Serology results were determined following the manufacturer's instructions: index S/C units (sample/cut-off point). We considered as positive an index value of >1.40.

SARS-CoV-2 detection by molecular biology

Nasopharyngeal swabs were collected in a viral transport medium (containing Hanks balanced salt solution, heat-inactivated FBS-fetal bovine serum, gentamicin sulfate, and amphotericin B) (Gibco, NY, USA). The specimens were obtained from individuals attending the campus registered in the programs *Comunidad Segura* (epidemiological surveillance system for Covid-19 at the university) and COVIDA (free SARS-CoV-2 testing project). We conducted a retrospective analysis of molecular test results. Not all the individuals participating in the study had previous RT-qPCR. We used automated extractors (Genolution Nextractor® NX-48S, Seoul, Korea) and nucleic acid reagents (Hamilton MicroLab Starlet MagEx STARline, Washington DC, USA), as well as the Quick-DNA/RNA Viral MagBead extraction kit (Zymo Research, Orange, CA, USA) for RNA purification. The RT-qPCR test was performed to determine the presence of SARS-CoV-2 RNA using the U-TOP COVID-19 detection kit which targets two SARS-CoV-2 regions: ORF-1ab and N (SeaSun Biomaterial Inc., Daejeon, South Korea), using the RNase P as the internal control gene. The assay was run following the manufacturer's instructions. A cycle threshold (Ct) below 38 was considered as a positive result.

Population's sociodemographic characteristics

We registered data on age and gender, commuting or residence boroughs, and type of work at the university. Individuals were asked for the presence of symptoms or signs associated with Covid-19 and contact with SARS-CoV-2 positive persons in the previous week. We used a questionnaire to evaluate the following symptoms: fever, cough, headache, expectoration, loss of smell, sneezing or running nose, shortness of breath, and muscular or joint pain.

Data presentation and analysis

Data were registered as percentages, mean or median, and their respective standard deviation (SD) or interquartile ranges (IQR). A normality test (Shapiro-Wilk) was used for quantitative variables while the U Mann Whitney test was used for non-parametric data and the t-Student test for parametric data. Statistical analyses were done using the PAST version 2.17c software (http://priede.bf.lu.lv/ftp/pub/TIS/datu_analiize/PAST/2.17c/download.html).

Results

A total of 237 individuals participated in the study; their age average was 36.14 years (\pm SD 9.66); 93 participants (30.44%) were females with an age average of 33.8 years (SD 7.97) while males' age average was 38.06 years (\pm SD 9.83) (**Table 1**); no statistical differences were observed ($p=0.17$). Of the total 237 participants, 213 lived in 19 of the 20 boroughs in Bogotá with the exception of Sumapaz, the only rural locality of the city; the remaining 24 individuals came from other metropolitan municipalities (**Figure 1**) (**Table 2**). As regards their activities at the university, 96 (40.5%) worked in laboratories

Table 1. Characteristics of the population and summary of results

	Age	N	Seropositives	RT-qPCR+ [#]	Seroprevalence %	Symptomatic* Number and percentage
Men	38.0	144	22	9	10.8	7 (31.8)
Women	33.8	93	10	4	15.3	3 (30.0)
Total	36.1 ^{&}	237	32	13	13.5	10 (31.25)

* Based on seropositive individuals

[&] No statistical difference, p: 017 *t- student*

[#] Positives by RT-qPCR according to the Ct

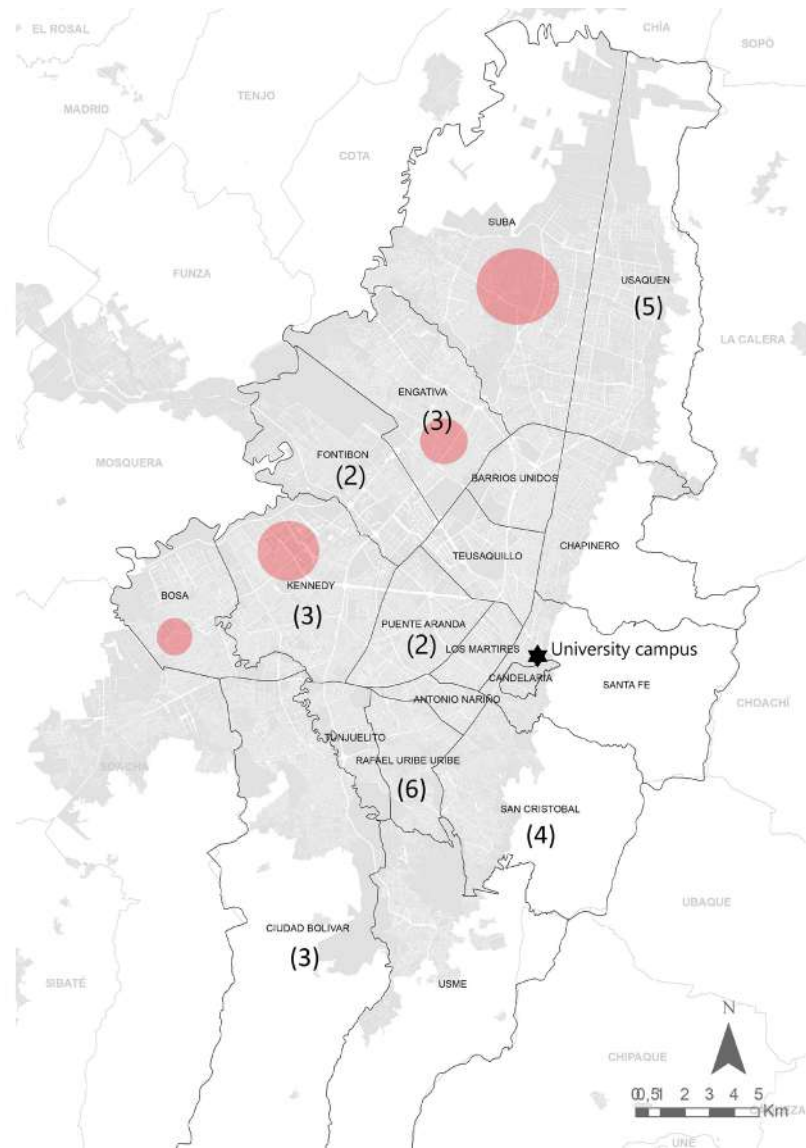


Figure 1. Map indicating the origin of the SARS-CoV-2 cases in Bogotá. The number in parenthesis indicate the seropositive cases among university employees and each borough where they live. Red dots show the boroughs with higher number of SARS-CoV-2 positive individuals in the city. Only seropositives from Bogotá (28) are shown; four individuals came from outside Bogotá. (Generated in GIS on ArcGIS 10.8.1 software and gently provided by José David Pinzon, COVIDA program, Universidad de Los Andes)

and workshops or were postgrad students, 81 (34.2%) had administrative jobs, 19 (8.0%) worked in general services, 24 (10.1%) in security, 11 (4.6%) belonged to the teaching staff, and six (2.5%) to the health services. The most commonly reported symptoms at the time of sampling were headache, 3.3%, muscle pain, 2.9%, and coughing and nasal congestion, 2.1%; no fever or dyspnea were reported. Seven individuals reported contact with someone showing Covid-19-related symptoms in the week before sampling. IgG-specific antibodies for SARS-CoV-2 N protein were detected in 32 individuals (13.5%): 10 women and 22 men (**Table 1**). The average index of seropositive individuals by CLIA was 4.7 (SD ± 2.58) and very few in this group had respiratory symptoms (2 with nasal congestion, 1 with coughing, and 1 with anosmia); no dyspnea was reported. Out of 32 individuals with positive antibodies, 13 worked in the security department (40.6%), 11 in the laboratories (34.4%), 6 in administrative services (18.1%), 1 in general services (3.1%), and 1 in health services (3.1%). According to the borough of residence, seropositive participants lived in 8 of the 20 in Bogotá, mostly from Rafael Uribe Uribe (6; 18%), Usaquén (5; 15.6%), San Cristóbal (4; 12.5%), and four (12.5%) lived outside Bogotá (**Figure 1**) (**Table 2**).

Of the 32 individuals with reactive serology, 13 had a positive RT-qPCR for SARS-CoV-2 RNA (4 women and 9 men) and 10 out of 13 were symptomatic at the time of the molecular assay. The RT-qPCR test was done 91 days before the serological assay

Table 2. Comparison of seropositive individuals at the university campus and SARS-CoV-2 cases by boroughs in Bogotá

Borough*	Tested by serology	Positives by serology	Percentage	Number of cases ^{&}
Rafael Uribe	11	6	18.8	24,176
Usaquén	27	5	15.6	34,279
San Cristobal	11	4	12.5	23,932
Kennedy	24	3	9.4	65,425
Engativá	16	3	9.4	55,013
Ciudad Bolívar	10	3	9.4	31,407
Fontibón	10	2	6.2	24,723
Puente Aranda	7	2	6.2	20,378
Chapinero	13	0	0.0	12,513
Santa Fe	16	0	0.0	8,480
Usme	6	0	0.0	18,226
Tunjuelito	1	0	0.0	12,343
Bosa	9	0	0.0	38,344
Suba	21	0	0.0	72,183
Barrios Unidos	5	0	0.0	10,443
Teusaquillo	16	0	0.0	11,044
Los Mártires	2	0	0.0	6,538
Antonio Nariño	2	0	0.0	6,987
La Candelaria	6	0	0.0	2,183
Sumapaz	0	0	0.0	13
Outside Bogotá	24	4	12.5	NA
Total	237	32	100,0	478,630

* Administrative division of Bogotá city

[&] Data until December 31, 2020 (*Observatorio de Salud de Bogotá*). Positive cases were determined using RT-qPCR.

NA: not applicable

on average. One additional individual with positive RT-qPCR had no detectable specific antibodies by CLIA. Nineteen participants (6 women and 13 men) with previous negative RT-qPCR done routinely as part of the surveillance program were seropositive; none described Covid-19-associated symptoms and only one endorsed the previous contact with a SARS-CoV-2 positive person; 31.25% of the individuals with positive serology were symptomatic (**Table 1**). We determined clusters (defined as five or more epidemiologically-related cases) in the security staff and in engineering and sciences labs.

Discussion

The first imported case of SARS-CoV-2 infection in Colombia was reported in Bogotá on March 6th 2020 (**Instituto Nacional de Salud-INS, 2020**) and until December 31 2020 the city had reported 478,630 cases and a 2.1% lethality (**SALUDATA, 2021**). Bogotá started preventive lockdown on March 20th, the first peak of infection occurred during July and August, and then the city reopened. Then, employees and some low-risk postgrad students returned to the campus subject to biosecurity protocols after September 1st. The effective reproductive number $R(t)$ in Bogotá then was 0.81 and by the time of our sampling it averaged 1.16 (**SALUDATA, 2021**). The most prevalent SARS-CoV-2 variant (near 50% of the sequences) in Colombia at the time was the B.1, a large European lineage from the first outbreak (**Laiton-Donato, et al., 2020**). The reopening brought new challenges not only for the scholar community but also for the people and businesses around it. Preparedness for possible reopening for the next academic cycle during early 2021 included besides protocols and guidelines a seroprevalence assay for people attending the university campus. Only those under age 65 and no personal or family risk factors were allowed to attend. Most of the individuals performed activities in labs, workshops, and administrative offices.

Our study evaluated presence of the IgG anti-N protein of SARS-CoV-2 by CLIA (**Picc, et al., 2021**) in 237 individuals of the almost 300 people attending the campus in a working days. We selected the N protein as an antigen to continue the surveillance with serology tests including vaccinated people while most platforms use the S protein. Interestingly, most of the cases did not come from the boroughs in Bogotá with the highest percentages of infection (Suba, Kennedy, Engativá, and Bosa) (**SALUDATA, 2021**). Seroprevalence among individuals attending the *Universidad de Los Andes* campus in Bogotá was 13.5%, which differs from other studies done in Colombia. In the national seroprevalence survey done by the Colombian INS, crude and adjusted seroprevalence for Bogotá during October and November 2020 among 4,597 individuals was 26.3% and 30%, respectively (**INS, 2021**). A higher seroprevalence has been described for Colombian cities on the Caribbean reaching up to 55.3% (**Mattar, et al., 2020**). A study done in a university hospital in Bogotá during the first peak showed a baseline seroprevalence of 2.28% among health workers, which increased to 5.98% after 2-4 weeks of follow up with 38% of individuals categorized as pre-symptomatic or asymptomatic (**Ariza, et al., 2020**). Initial studies for SARS-CoV-2 IgG antibodies in Wuhan from March to April using a CLIA assay registered a seroprevalence between 3.2% and 3.8% reflecting the early spread and impact of the infection (**Xu, et al., 2020**); similar values were found in a systematic review worldwide until November 2020 showing a 3.2% (IQR 1.0-6.4%) seroprevalence in the general population (**Bobrovitz, et al., 2020**). These differences could be related to variables such as the detection method, the antigen used, the virus circulating variants, and the time of sampling. In our study, nearly 70% of seropositive individuals did not recall any symptoms before the serological assay. One study showed that during SARS-CoV-2 infection, the proportion of individuals without symptoms but positive RT-qPCR was 65.9% at the time of sampling and 41.2% when using serological tests (**Oran & Topol, 2021**).

During the reopening of colleges in Wisconsin (USA), SARS-CoV-2 transmission increased among students with infection clusters concentrated in three institutions; the virus sequencing showed a rapid dissemination to the community (**Richmond, et al., 2020**). The congregation of students on and off campus helped to spread infection in a university in North Carolina (**Wilson, et al., 2020**) as the close contact of young people at the campus

regardless of the fact that they are less susceptible can also facilitate the spread of infection to the university staff and their households. Cluster outbreaks and rapid dissemination are the two ways of transmission described in colleges and universities (Wilson, *et al.*, 2020; Walke, *et al.*, 2020). Here we identified three clusters, the largest among security staff in line with a higher number of epidemiological contacts due to their activities. The other two clusters corresponded to laboratory staff and postgrad student gatherings.

Different measures have been adopted at the university to avoid spreading of the infection in the campus including characterization of individuals, online biosafety basic training, and global screening using RT-qPCR for both symptomatic and asymptomatic employees. Also, mandatory university guidelines including daily symptoms check through a cellphone App (SeneCare), handwashing, use of face masks, physical distance, and gathering limitations have been implemented.

Our study had some limitations such as the number of samples, no comparison by serology with other viral antigens and the retrospective analysis of RT-qPCR data which did not include all the individuals. Our data suggests that a very low percentage of the individuals has been infected despite the use of public transportation and daily commuting between the city boroughs with higher prevalence of infection. Although this is a descriptive study, we found a high percentage of asymptomatic individuals and detected clusters that indirectly helped to take some control measurements. Seroprevalence studies could help better understand the dynamics of virus transmission in university populations, a subgroup of the broader general community similar to others such as commercial or industrial population subsets.

Acknowledgments

The authors want to thank Abbott Colombia for the partial support of this work and Angelica González MD, María Imelda Hernández, and Giovanni Marín from the university health service staff for helping us with the blood sampling. Sponsorship: This project was partially supported by the COVIDA project (*Universidad de Los Andes*) and Abbott Laboratories, Colombia.

Author contributions

JMG: conceptualization; JMG, JSB, CJ, SR, GO, LH: data curation and analysis; JMG, JSB, MGS: methodology; JMG, JSB: writing of the original draft; JMG, JSB, CJ, GO, LH, MGS, SR: writing, review and editing of the manuscript.

Conflicts of interest

Abbott Colombia provided some reagents for serology but did not participate in the process or data analysis. The authors do not report any competing interest.

References

- Ariza, B., Torres, X., Salgado, D., Cepeda, M., Gómez Restrepo, C., Castellanos, J. C., Suárez-Obando, F., Cuellar, A., Cardozo, C., Ángel, J., Franco, M. A. (2021). Seroprevalence and seroconversion rates to SARS-COV-2 in interns, residents, and medical doctors in a University Hospital in Bogotá, Colombia. *Infectio*. **25** (3): 145. <https://doi.org/10.22354/in.v25i3.938>
- Bobrovitz, N., Arora, R. K., Cao, C., Boucher, E., Liu, M., Donnici, C., Yanes-Lane, M., Whelan, M., Perlman-Arrow, S., Chen, J., Rahim, H., Ilincic, N., Segal, M., Duarte, N., Wyk, J. V., Yan, T., Atmaja, A., Rocco, S., Joseph, A. Cheng, M. P. (2021). Global seroprevalence of SARS-COV-2 antibodies: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. **16**(6):e0252617. doi: 10.1371/journal.pone.0252617.
- Dan, J. M., Mateus, J., Kato, Y., Hastie, K. M., Yu, E. D., Faliti, C. E., Grifoni, A., Ramirez, S. I., Haupt, S., Frazier, A., Nakao, C., Rayaprolu, V., Rawlings, S. A., Peters, B., Krammer, E., Simon, V., Saphire, E. O., Smith, D. M., Weiskopf, D., Crotty, S. (2020). Immunological memory to SARS-COV-2 assessed for up to eight months after infection. *Science*. **371** (6529): eabf4063. doi: 10.1126/science.abf4063.

- Ebrahim, S. H., Ahmed, Q. A., Gozzer, E., Schlagenhauf, P., Memish, Z. A.** (2020). Covid-19 and community mitigation strategies in a pandemic. *BMJ*. m1066. <https://doi.org/10.1136/bmj.m1066>
- González, J. M., Shelton, W. J., Díaz-Vallejo, M., Rodríguez-Castellanos, V. E., Zuluaga, J. D., Chamorro, D. F., Arroyo-Ariza, D.** (2020). Analysis of commercial assays for the detection of SARS-COV-2 antibodies or antigens. *Open Journal of Immunology*. **10** (02): 21–35. <https://doi.org/10.4236/oji.2020.102003>
- Guo, L., Ren, L., Yang, S., Xiao, M., Chang, D., Yang, F., Dela Cruz, C. S., Wang, Y., Wu, C., Xiao, Y., Zhang, L., Han, L., Dang, S., Xu, Y., Yang, Q.-W., Xu, S.-Y., Zhu, H.-D., Xu, Y.-C., Jin, Q., Wang, J.** (2020). Profiling early humoral response to diagnose novel coronavirus disease (covid-19). *Clinical Infectious Diseases*. **71** (15): 778–785. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa310>
- Houlihan, C. F., Vora, N., Byrne, T., Lewer, D., Kelly, G., Heaney, J., Gandhi, S., Spyer, M. J., Beale, R., Cherepanov, P., Moore, D., Gilson, R., Gamblin, S., Kassiotis, G., McCoy, L. E., Swanton, C., Hayward, A., Nastouli, E., Aitken, J., Hatipoglu, E.** (2020). Pandemic peak sars-COV-2 infection and seroconversion rates in London frontline health-care workers. *The Lancet*. **396** (10246). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31484-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31484-7)
- Instituto Nacional de Salud-INS.** (2020). Covid-19 en Colombia. Coronavirus Colombia. Retrieved December 25, 2020, from <https://www.ins.gov.co/Noticias/Paginas/Coronavirus.aspx>.
- Instituto Nacional de Salud-INS.** (2021). Estudio Nacional de Seroprevalencia. Accessed on: November 12, 2021. Available from: <https://www.ins.gov.co/estudio-nacional-de-seroprevalencia/reporte.html>
- Lisboa-Bastos, M., Tavaziva, G., Abidi, S. K., Campbell, J. R., Haraoui, L.-P., Johnston, J. C., Lan, Z., Law, S., MacLean, E., Trajman, A., Menzies, D., Benedetti, A., Ahmad Khan, F.** (2020). Diagnostic accuracy of serological tests for COVID-19: Systematic Review and meta-analysis. *BMJ*. m2516. <https://doi.org/10.1136/bmj.m2516>
- Laiton-Donato, K., Villabona-Arenas, C., Usme-Ciro, J., Franco-Muñoz, C., Álvarez-Díaz, D., Villabona-Arenas, L., Echeverría-Londoño, S., Cucunubá, Z., Franco-Sierra, N., Flórez, A., Ferro, C., Ajami, N., Walteros, D., Prieto, F., Durán, C., Ospina-Martínez, M., Mercado-Reyes, M.** (2020). Genomic epidemiology of SARS-CoV-2 in Colombia. medRxiv. 2020.06.26.20135715 <https://doi.org/10.1101/2020.06.26.20135715>
- Lumley, S. F., O'Donnell, D., Stoesser, N. E., Matthews, P. C., Howarth, A., Hatch, S. B., Marsden, B. D., Cox, S., James, T., Warren, F., Peck, L. J., Ritter, T. G., de Toledo, Z., Warren, L., Axten, D., Cornall, R. J., Jones, E. Y., Stuart, D. I., Screaton, G., Eyre, D. W.** (2021). Antibody status and incidence of SARS-COV-2 infection in health care workers. *New England Journal of Medicine*. **384** (6): 533-540. <https://doi.org/10.1056/nejmoa2034545>
- Mattar, S., Alvis-Guzmán, N., Garay, E., Rivero, R., García, A., Botero, Y., Miranda, J., Galeano, K., de La Hoz, F., Martínez, C., Arrieta, G., Faccini-Martínez, Á. A., Guzmán, C., Kerguelen, H., Moscote, M., Contreras, H., & Contreras, V.** (2020). Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 seroprevalence among adults in a tropical city of the Caribbean area, Colombia: Are we much closer to herd immunity than developed countries? *Open Forum Infectious Diseases*. **7** (12). <https://doi.org/10.1093/ofid/ofaa550>
- Morawska, L. & Cao, J.** (2020). Airborne transmission of SARS-COV-2: The world should face the reality. *Environment International*. **139**: 105730. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Müller, L., Ostermann, P. N., Walker, A., Wienemann, T., Mertens, A., Adams, O., Andree, M., Hauka, S., Lübke, N., Keitel, V., Drexler, I., Di Cristanziano, V., Hermsen, D. F., Kaiser, R., Boege, F., Klein, F., Schaal, H., Timm, J., Senff, T.** (2021). Sensitivity of anti-SARS-cov-2 serological assays in a high-prevalence setting. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*. **40** (5): 1063-1071. <https://doi.org/10.1007/s10096-021-04169-7>
- Oran, D. P. & Topol, E. J.** (2021). The proportion of SARS-COV-2 infections that are asymptomatic. *Annals of Internal Medicine*. **174** (5): 655-662. <https://doi.org/10.7326/m20-6976>
- Piec, I., English, E., Thomas, M. A., Dervisevic, S., Fraser, W. D., John, W. G.** (2021). Performance of SARS-COV-2 serology tests: Are they good enough? *PLOS ONE*. **16** (2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245914>
- Richmond, C. S., Sabin, A. P., Jobe, D. A., Lovrich, S. D., Kenny, P. A.** (2020). SARS-COV-2 sequencing reveals rapid transmission from college student clusters resulting in morbidity and deaths in vulnerable populations. medRxiv 2020.10.12.20210294. <https://doi.org/10.1101/2020.10.12.20210294>

- Roshan, R., Feroz, A. S., Rafique, Z., Virani, N.** (2020). Rigorous hand hygiene practices among health care workers reduce hospital-associated infections during the COVID-19 pandemic. *Journal of Primary Care & Community Health*. **11**: 215013272094333. <https://doi.org/10.1177/2150132720943331>
- Saludata.** (2021). Datos en Salud Enfermedades transmisibles. Accessed on: March 28, 2021. Available from: <https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/index.php/datos-de-salud/enfermedades-trasmisibles/covid19/>.
- Shrock, E., Fujimura, E., Kula, T., Timms, R. T., Lee, I.-H., Leng, Y., Robinson, M. L., Sie, B. M., Li, M. Z., Chen, Y., Logue, J., Zuiani, A., McCulloch, D., Lelis, F. J., Henson, S., Monaco, D. R., Travers, M., Habibi, S., Clarke, W. A., Wong, C.** (2020). Viral epitope profiling of COVID-19 patients reveals cross-reactivity and correlates of severity. *Science*. **370** (6520). <https://doi.org/10.1126/science.abd4250>
- Universidad de los Andes.** (2021). Universidad EN CIFRAS. Dirección de Planeación y Evaluación. Accessed on: February 8, 2021. Available from: <https://planeacion.uniandes.edu.co/estadisticas/universidad-en-cifras>
- Walke, H. T., Honein, M. A., Redfield, R. R.** (2020). Preventing and responding to COVID-19 on college campuses. *JAMA*. **324** (17): 1727. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.20027>
- Wilson, E., Donovan, C. V., Campbell, M., Chai, T., Pittman, K., Seña, A. C., Pettifor, A., Weber, D. J., Mallick, A., Cope, A., Porterfield, D. S., Pettigrew, E., Moore, Z.** (2020). Multiple COVID-19 clusters on a university campus — North Carolina, August 2020. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*. **69** (39): 1416–1418. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6939e3>
- World Health Organization-WHO.** (2020). Diagnostic testing for SARS-COV-2. World Health Organization. Accessed on: March 25, 2021. Available from: <https://www.who.int/publications-detail-redirect/diagnostic-testing-for-sars-cov-2>
- Xu, X., Sun, J., Nie, S., Li, H., Kong, Y., Liang, M., Hou, J., Huang, X., Li, D., Ma, T., Peng, J., Gao, S., Shao, Y., Zhu, H., Lau, J. Y.-N., Wang, G., Xie, C., Jiang, L., Huang, A., Hou, F. F.** (2020). Seroprevalence of Immunoglobulin M and G antibodies against SARS-COV-2 in China. *Nature Medicine*. **26** (8): 1193-1195. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0949-6>
- Zhao, J., Yuan, Q., Wang, H., Liu, W., Liao, X., Su, Y., Wang, X., Yuan, J., Li, T., Li, J., Qian, S., Hong, C., Wang, F., Liu, Y., Wang, Z., He, Q., Li, Z., He, B., Zhang, T., Zhang, Z.** (2020). Antibody responses to SARS-COV-2 in patients with novel coronavirus disease 2019. *Clinical Infectious Diseases*. **71** (16): 2027-2034. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa344>
- Zhu, N., Zhang, D., Wang, W., Li, X., Yang, B., Song, J., Zhao, X., Huang, B., Shi, W., Lu, R., Niu, P., Zhan, F., Ma, X., Wang, D., Xu, W., Wu, G., Gao, G. F., Tan, W.** (2020). A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *New England Journal of Medicine*. **382** (8): 727-733. <https://doi.org/10.1056/nejmoa2001017>

Original article

Possible new mitochondrial mechanism of vitamin C anticancer activity

Posible nuevo mecanismo mitocondrial de la actividad anticancerígena de la vitamina C

Viktor V. Lemeshko

Grupo de Biofísica, Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín, Colombia

Abstract

The main feature of fast-growing malignant tumors is the Warburg-type metabolism, which is directly related to an extremely high quantity of hexokinase (HK) bound to the voltage-dependent anion channels (VDACs) in the mitochondrial outer membrane. Previously, we explained the Warburg type metabolism as a result of the electrical suppression of mitochondria due to the closure of free VDACs that are not bound to HK. Here, we propose a possible new mechanism of high-dose vitamin C (ascorbate) anticancer activity estimated with a simplified computational model. According to the proposed hypothesis and the model, ascorbate oxidation in mitochondria leads to the generation of the negative outer membrane potential (OMP) of opposite sign to the positive OMP generated by the VDAC-HK complexes in cancer cells. The model demonstrates that negative OMP generated by any mechanism, even of relatively low magnitudes, leads to the reopening of the electrically closed VDACs, thus reprogramming cell energy metabolism. According to the hypothesis, redox mediators, which increase the rate of ascorbate oxidation in mitochondria, should synergistically increase anticancer effects of high-dose ascorbate in accordance with experimental data recorded in the literature. The model shows that even small changes in the VDAC-voltage sensitivity and/or quantity of the VDAC-HK complexes, known to be caused by various physiological factors, might strongly influence the proposed mitochondrial mechanism of ascorbate anticancer activity.

Keywords: Vitamin C; Anticancer activity; Warburg metabolism; Mitochondria; VDAC; Mitochondrial outer membrane potential.

Resumen

La característica principal de los tumores malignos de crecimiento rápido es el metabolismo de tipo Warburg, directamente relacionado con una cantidad extremadamente alta de hexoquinasa (HQ) unida a los canales aniónicos dependientes de voltaje (VDAC) en la membrana mitocondrial externa. En un estudio anterior se explicó el metabolismo de tipo Warburg como resultado de la supresión eléctrica de las mitocondrias debido al cierre de los VDAC libres, no unidos a HQ. En este se propone un posible nuevo mecanismo de la actividad anticancerígena de altas dosis de vitamina C (ascorbato) estimado mediante un modelo computacional simplificado. Según la hipótesis propuesta y el modelo, la oxidación de ascorbato en las mitocondrias conduce a la generación del potencial negativo de la membrana externa (PME), de signo opuesto al PME positivo generado por los complejos VDAC-HQ en las células cancerosas. El modelo demuestra que el PME negativo, incluso de magnitudes relativamente bajas, generado mediante cualquier mecanismo, lleva a la reapertura de los VDAC cerrados eléctricamente, reprogramando así el metabolismo energético celular. Según la hipótesis, los mediadores redox, que aumentan la tasa de oxidación de ascorbato en las mitocondrias, deberían aumentar sinérgicamente los efectos anticancerígenos de las dosis altas de ascorbato en concordancia con los datos experimentales reportados en la literatura. El modelo muestra que, incluso pequeños cambios en la sensibilidad

Citation: Lemeshko VV. Possible new mitochondrial mechanism of vitamin C anticancer activity. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):36-49, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1575>

Editor: Juana Angel

Corresponding author:

Viktor V. Lemeshko;
vvasilie@unal.edu.co

Received: October 5, 2021

Accepted: January 11, 2022

Published on line: February 28, 2022



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

al voltaje de los VDAC y/o de la cantidad de los complejos VDAC-HQ, causados por diversos factores fisiológicos como se sabe, podrían influir fuertemente en el mecanismo mitocondrial propuesto de la actividad anticancerígena del ascorbato.

Palabras clave: Vitamina C; Actividad anticáncer; Metabolismo de Warburg; Mitocondrias; VDAC; Potencial de membrana externa mitocondrial.

Introduction

More than 60 years ago, McCormick proposed the usage of vitamin C (ascorbate) to limit the cancer metastasis process (McCormick, 1954, 1959). In the 1970s, Cameron and Pauling supported this concept, using high intravenous doses of vitamin C, followed by high oral doses, for advanced cancer patients (Cameron & Pauling, 1976, 1978). The reported anticancer effects of vitamin C were not unequivocally convincing, and the use of high-dose ascorbate in the clinical treatment of human tumors is controversial even up to now (Roa, *et al.*, 2020; Bakalova, *et al.*, 2020; Giansanti, *et al.*, 2021; Zasowska-Nowak, *et al.*, 2021). On the other hand, anticancer properties of ascorbate have been demonstrated in experiments with various cancer cell lines *in vitro* (Verrax, *et al.*, 2006; Park, 2013; Ma, *et al.*, 2017; Lv, *et al.*, 2018; Semkova, *et al.*, 2020) and in animals (Verrax, *et al.*, 2006; Polireddy, *et al.*, 2017; Xia, *et al.*, 2017; Lv, *et al.*, 2018) including aggressive tumor xenografts in mice (Chen, *et al.*, 2008) and many other aggressive tumors (see for references Polireddy, *et al.*, 2017).

Anti-metastatic and other beneficial effects of intravenous high-dose ascorbate in patients with advanced stage tumors were shown in preclinical trials (Polireddy, *et al.*, 2017; Xia, *et al.*, 2017; Bazzan, *et al.*, 2018; Zhou, *et al.*, 2020; Zasowska-Nowak, *et al.*, 2021). It is very important to highlight that the high intravenous doses of ascorbate needed for anticancer effects allow plasma concentrations up to two orders of magnitude higher than concentrations achievable at the highest tolerated oral doses (Zasowska-Nowak, *et al.*, 2021).

The mechanism of the ascorbate anticancer activity is not yet clear and appears to have multiple etiologies (Park, 2013; Ma, *et al.*, 2017; Polireddy, *et al.*, 2017; Lv, *et al.*, 2018; Bakalova, *et al.*, 2020). At least one of them might relate to the ascorbate oxidation in mitochondria as these organelles play a crucial role in switching cell energy metabolism from the preferentially aerobic oxidative phosphorylation in normal cells to the aerobic glycolysis observed in many malignant tissues, a process known as the Warburg type metabolism (Nakashima, *et al.*, 1988; Lemeshko, 2002; Marín-Hernández, *et al.*, 2006; Maldonado, *et al.*, 2013). Previously, we explained such metabolic switching as a result of the metabolically-dependent generation of OMP by the VDAC-HK complexes (Lemeshko, 2014, 2015, 2017) functioning as a biological battery (Lemeshko, 2017, 2021). The generated OMP, positive in the mitochondrial intermembrane space (IMS), restricts the mitochondrial outer membrane (MOM) permeability to negatively charged metabolites, mainly for ATP (Rostovtseva & Colombini, 1997; Colombini, 2016).

Ascorbate is known to be oxidized very slowly in intact mitochondria, which allows assuming that MOM is impermeable to this anion (Lehninger, *et al.*, 1954; Valenti, *et al.*, 2014). In contrast, we have suggested that metabolically-dependent OMP of relatively high magnitude might be generated during ascorbate oxidation (Lemeshko, 2018, 2021) leading to the electrical closure of free VDACs in MOM and decreasing MOM permeability to this anion (negative feedback control). We also assumed (Lemeshko, 2021) that this ascorbate-dependent tendency to generate OMP (Figure 1A) negative in IMS might modulate the OMP generated in the mitochondria of cancer cells, controlling cell energy metabolism.

Here we used an essentially simplified computational model to evaluate the proposed hypothesis and demonstrate that the magnitude of ascorbate-dependent OMP is sufficiently high to decrease significantly the positive OMP generated by the VDAC-HK complexes in mitochondria of cancer cells ($\Delta\psi_o$ in figure 1B), thus reprogramming the type of cell energy metabolism and decreasing cell death resistance. This mechanism may be modulated

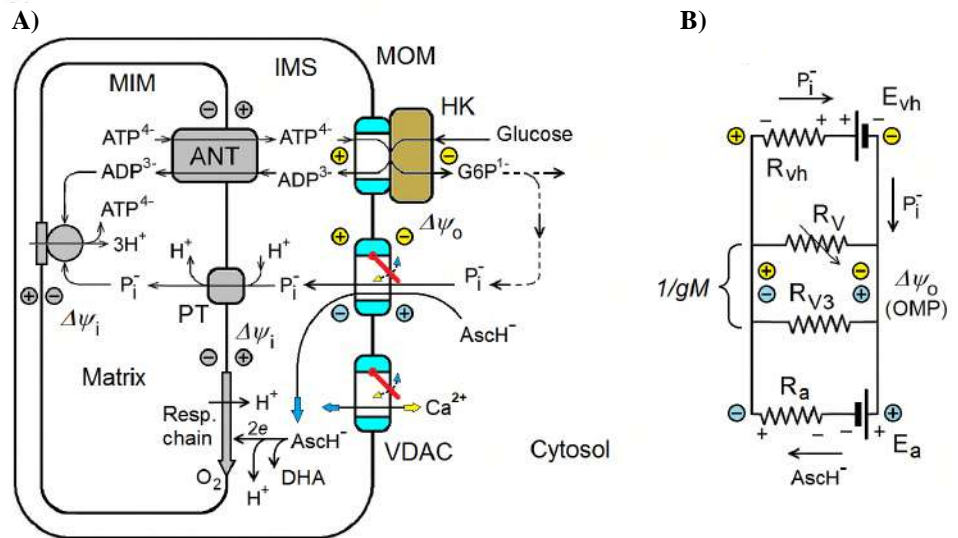


Figure 1. Modulation of the MOM permeability in cancer cells by the mitochondrial oxidation of ascorbate, AscH. **A.** Ascorbate oxidation allows decreasing the magnitude of the positive OMP generated by the VDAC-HK complexes leading to the reopening of free VDACS in MOM, thus reprogramming the cancer type of cell energy metabolism and decreasing electrical, OMP-dependent Ca^{2+} extrusion from mitochondria. **B.** Equivalent electrical circuit of model **A** where the VDAC-HK complexes function as a biological battery (E_{vh}) with the internal resistance R_{vh} maintaining the circulation of inorganic phosphate through MOM and generating the positive OMP. Steady-state transportation and oxidation of ascorbate in IMS have a tendency to generate the opposite, negative OMP, thus decreasing the magnitude of the final positive OMP ($\Delta\psi_o$) and increasing MOM permeability. MIM: Mitochondrial inner membrane; ANT: Adenine nucleotide translocator; PT: Inorganic phosphate transporter; DHA: Dehydroascorbate; E_a : Ascorbate Nernstian potential; R_v : Resistance of free VDACS in MOM (VDAC1 and VDAC2); R_{v3} : Resistance of free VDAC3 in MOM; R_a : Internal resistance of the battery E_a . gM : MOM permeability

by many physiological factors influencing the VDAC-voltage sensitivity, VDAC-HK interactions, and VDAC permeability. All these aspects seem to be useful for developing new strategies for anticancer combination therapy.

Materials and methods

Model for the generation of the mitochondrial outer membrane potential by VDAC-hexokinase complexes

According to the model shown in **figure 1A**, some percentage of VDACS in MOM forms VDAC-HK complexes functioning as a biological battery (E_{vh} in **Figure 1B**) (Lemeshko, 2017, 2018, 2021). Part of the battery voltage drops on the MOM ($\Delta\psi_o$) and another part is applied to the internal resistance R_{vh} of the battery (**Figure 1B**). R_{vh} is inversely proportional to the fraction of VDACS bound to HK, N_{vh} . According to the model, 10% of all VDACS in MOM are represented by the low voltage-sensitive porin isoform VDAC3, N_3 , which does not bind to HK. The major fraction of free VDACS in MOM is represented by the voltage-sensitive VDAC isoforms, N_v , such as VDAC1 and VDAC2. The quantity of all VDACS in MOM was normalized to 100:

$$100 = N_3 + N_{vh} + N_v, \quad (1)$$

where $N_3 = 10$ and N_{vh} was taken for estimations equal to 4.0 or 3.6 relative units (r.u.).

The conductance of all MOM fractions of VDACS in their completely open states was also normalized to 100 r.u.:

$$100 = g_3 + g_{V_0} + g_H, \quad (2)$$

where gV_0 is the conductance of the VDAC fraction N_v at zero membrane potential, gH is the conductance of the fraction N_{vh} of completely open VDACs, yet not restricted by the HK binding (numerically, $gH = N_{vh}$), $g3 = 10$ r.u., assuming that the permeability of the VDAC3 fraction is completely voltage-insensitive, although the model also allows consideration of the redox-dependent modulation of the VDAC3 voltage sensitivity (De Pinto, *et al.*, 2016).

The conductance gVH of the fraction N_{vh} of VDACs bound to HK in MOM was considered to depend on the glucose concentration in the cytosol, $[Gl]_o$, as (Lemeshko, 2017):

$$gVH = \frac{N_{vh} \cdot [Gl]_o}{K_{m,G} + [Gl]_o}, \quad (3)$$

where the Michaelis–Menten constant $K_{m,G} = 0.1$ mM glucose. In other words, gVH also represents mitochondrial hexokinase activity in relative units considering N_{vh} as the maximum HK activity. The MOM permeability gV through the fraction N_v of free voltage-sensitive VDACs was considered to be equal for both the inorganic phosphate P_i^{-1} and the ascorbate anion $AscH^-$, and expressed as a bell-shaped function of OMP (Lemeshko, 2014, 2017):

$$gV = gV_0 \cdot g_c + gV_0 \cdot (1 - g_c) \cdot \exp(-S \cdot OMP^2), \quad (4)$$

where $g_c = 0.2$ is taken as the relative VDAC permeability in the closed state and S is the voltage sensitivity parameter. The resulting normalized “VDAC’s conductance-OMP” functions at the voltage sensitivity parameters $S = 40 \text{ V}^{-1}$ and $S = 36 \text{ V}^{-1}$ are shown in figure 2 (a and b, respectively).

The total MOM permeability, gM , for P_i^{-1} or the ascorbate anion $AscH^-$ was presented as:

$$gM = g3 + gV. \quad (5)$$

The voltage generated by the VDAC-HK complexes (E_{vh} in figure 1B) depends on the Gibbs free energy of the mitochondrial HK reaction (Lemeshko, 2014, 2017, 2021) as:

$$E_{vh} = - \left(\frac{\Delta G_{HK}^0}{F} + \frac{RT}{F} \ln \frac{[ADP]_i [G6P]_o}{[ATP]_i [Gl]_o} \right), \quad (6)$$

where $\Delta G_{HK}^0 = -16.7$ kJ/mol is the standard Gibbs free energy of the hexokinase reaction, R is the universal gas constant, F is the Faraday constant, and $T = 310 \text{ K}$ is the normal body temperature. $[ADP]_i$ and $[ATP]_i$ are IMS concentrations of ADP and ATP, respectively, $[Gl]_o$ and $[G6P]_o$ are the concentrations of glucose and glucose-6-phosphate, respectively, in the cytosol. For all estimations, it was taken that the ratio $[ATP]_i/[ADP]_i = 100$ and $[G6P]_o = 0.1$ mM.

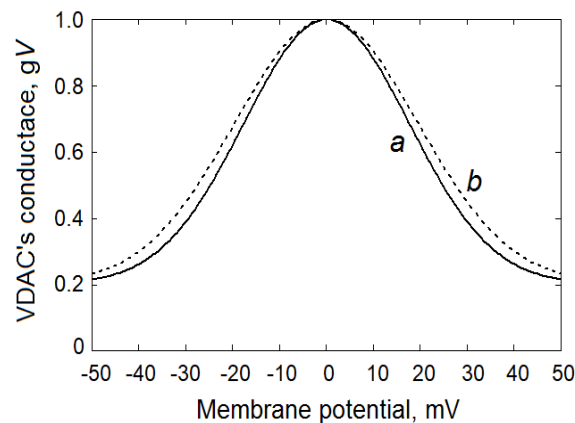


Figure 2. VDAC voltage-gating properties used in the computational model: *a*) at the VDAC voltage sensitivity parameter $S = 40 \text{ V}^{-1}$; *b*) at $S = 36 \text{ V}^{-1}$ (equation 4)

In the absence of ascorbate (*i.e.*, at $E_a = 0$), the equivalent electrical circuit shown in **figure 1B** may be described according to Ohm's law as:

$$E_{vh} = \frac{I_h}{gVH} + \frac{I_h}{gM}, \quad (7)$$

where I_h is the hexokinase-mediated current (in dimensionless units).

According to equation 7, the OMP generated by the VDAC-HK complexes ($\Delta\psi_o$ in **figure 1B**) may be presented as the voltage drop on the MOM resistance, $1/gM$:

$$OMP = \frac{I_h}{gM}. \quad (8)$$

The units of OMP (equation 8), as well as of E_{vh} (equations 6 and 7), come in volts.

If a negative MOM potential f is generated by some mechanism simultaneously with the functioning of the VDAC-HK complexes, the resulting OMP may be presented as:

$$OMP = \frac{I_h}{gM} + f, \quad (9)$$

where f (of negative sign) is given in volts.

The system of equations 1-9 may be solved at given parameters $g3$, gH and f , calculating gV , gM and OMP as functions of glucose concentration in the cytosol.

Model of ascorbate-dependent generation of the outer membrane potential in intact mitochondria

The steady state rate of ascorbate oxidation in intact mitochondria, v_A , should be equal to the Nernst-Planck flux of this anion through MOM:

$$v_A = gM \cdot \frac{F}{RT} \cdot OMP_A \cdot \frac{[A]_o - [A]_i \cdot \exp\left(-\frac{F}{RT} OMP_A\right)}{1 - \exp\left(-\frac{F}{RT} OMP_A\right)}, \quad (10)$$

where $[A]_o$ and $[A]_i$ are the ascorbate concentrations in the cytosol and IMS, respectively, and OMP_A is the MOM potential generated by the ascorbate flux across the membrane.

The rate v_A of ascorbate oxidation by cytochrome c in IMS is presented by the Michaelis-Menten kinetics,

$$v_A = \frac{V_m \cdot [A]_i}{K_{m,A} + [A]_i}, \quad (11)$$

where V_m is the maximum rate of oxidation in the same relative units (r.u.) as the hexokinase activity, gVH , the constant $K_{m,A} = 66$ mM ascorbate (Yonetani, 1960), and $[A]_i$ is the concentration of ascorbate in IMS. For calculations, V_m was taken at 0, 4 or 40 r.u. and $N_{vh} = 4$ r.u. OMP_A was estimated by solving the system of equations 1, 2, 4, 5, 10 and 11 as a function of ascorbate concentrations.

The software Mathcad Professional was used to perform all mathematical calculations.

Results

The MOM VDAC-HK complexes function as a biological battery (Lemeshko, 2017, 2018, 2021) due to an active movement of the inorganic phosphate anion through MOM (**Figure 1A**) from ATP^+ in IMS to glucose in the cytosol forming glucose-6-phosphate. This movement depends on the free energy of the hexokinase reaction. Inorganic phosphate then returns into IMS, thus closing the electrical circuit to recover ATP in the mitochondrial matrix. In this case, OMP generation may be presented as a part of E_{vh} , *i.e.*, as the voltage drop on the equivalent resistances $1/gM$ of MOM (Lemeshko, 2014, 2021) (**Figure 1B**).

According to our estimations using the computational model, the magnitude of OMP, positive in IMS, depends on the concentration of glucose (**Figure 3**, curve *a*). With a 10 % decrease in the quantity of VDAC-HK complexes in MOM, from 4 r.u. (**Figure 3A**, curve *a*) to 3.6 r.u. of all VDACs in MOM (**Figure 3B**, curve *a*), the critical glucose concentration at which OMP begins to increase sharply shifted from 2 mM (at 4 r.u.) to 6 mM (at 3.6 r.u.), approximately.

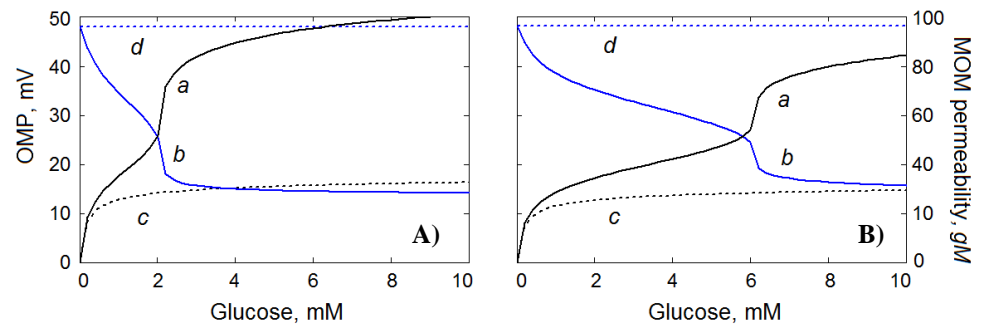


Figure 3. Generation of OMP (*a*, *c*) by the VDAC-HK complexes in mitochondria and the MOM permeability to inorganic phosphate and ascorbate (*b*, *d*) as functions of glucose concentration. The fraction N_{vh} of the VDAC-HK complexes - 4.0 r.u. (A) or 3.6 r.u. (B). The VDAC voltage sensitivity parameter $S = 40 \text{ V}^{-1}$ (*a*, *b*) or $S = 0 \text{ V}^{-1}$ (*c*, *d*) (equation 4). Calculations were performed according to section 2.1.

The model also demonstrated a remarkable OMP-dependent decrease in the MOM permeability, gM (Figure 3, curve *b*). In contrast, at the zero VDAC voltage sensitivity parameter, $S = 0 \text{ V}^{-1}$ (equation 4), the generated OMP has relatively low magnitudes (Figure 3, curve *c*) without its somewhat essential influence on the MOM permeability (Figure 3, curve *d*).

The model also demonstrated that a negative MOM potential, f , generated by any mechanism significantly influences the resulting OMP (equation 9) generated during the simultaneous functioning of the VDAC-HK complexes. The potential f of the magnitudes higher than $f = -6.5 \text{ mV}$ for the case of 4.0 r.u. of the VDAC-HK complexes (Figure 4A) and the potential higher than $f = -2.0 \text{ mV}$ for the case of 3.6 r.u. of the VDAC-HK complexes (Figure 4C), completely prevent a sharp glucose-dependent increase in OMP, at least in the range up to 10 mM glucose concentration, thus allowing higher MOM permeability, gM (Figure 4, B and D, respectively).

Similar data to the case of a 10 % decrease in the quantity of the VDAC-HK complexes in MOM (Figure 4, C and D) were also obtained by a 10 % decrease in the VDAC voltage sensitivity parameter, from $S = 40 \text{ V}^{-1}$ to $S = 36 \text{ V}^{-1}$ (Figure 4, E and F). Besides, a simultaneous 10% decrease in the quantity of the VDAC-HK complexes and the VDAC voltage sensitivity completely prevented any sharp glucose-dependent increase in OMP (data not shown).

In other words, the data presented in figure 4 demonstrate that a decrease in the quantity of hexokinase attached to mitochondria and/or a decrease in the voltage sensitivity of the VDAC gating mechanism, strongly influence glucose-dependent VDAC-HK-mediated regulation of the MOM permeability.

To evaluate the magnitude of the MOM potential generated only under ascorbate oxidation in intact mitochondria, OMP_A , the estimations were performed assuming completely silenced VDAC-HK complexes in MOM ($N_{vh} = 4 \text{ r.u.}$), as it would be at zero concentration of glucose. The model demonstrated the generation of relatively high OMP_A negative in IMS at different maximum rates, V_m , of ascorbate oxidation by cytochrome *c* in IMS and at given concentrations of ascorbate ($[A]_o$ and $[A]_i$) (Figure 5).

First of all, if we assume the rate $V_m = 0$, *i.e.* the thermodynamic equilibrium, we have Nernstian potential at given values of $[A]_o$ and $[A]_i$ (Figure 5A). At steady-state with $V_m = 4 \text{ r.u.}$ and the VDAC voltage sensitivity parameter $S = 40 \text{ V}^{-1}$, the model demonstrated OMP_A of lower magnitudes (Figure 5B) than Nernstian potentials, as well as a more significant decrease in OMP_A at higher V_m , for example at $V_m = 40 \text{ r.u.}$ (Figure 5C). A decrease in OMP_A at steady states is a result of the voltage drop (part of the Nernstian potential) on the internal resistance R_a of the ascorbate battery E_a (Figure 1B). In the case of $V_m = 40 \text{ r.u.}$, if we additionally decrease the voltage sensitivity parameter from $S = 40 \text{ V}^{-1}$ to $S = 0 \text{ V}^{-1}$,

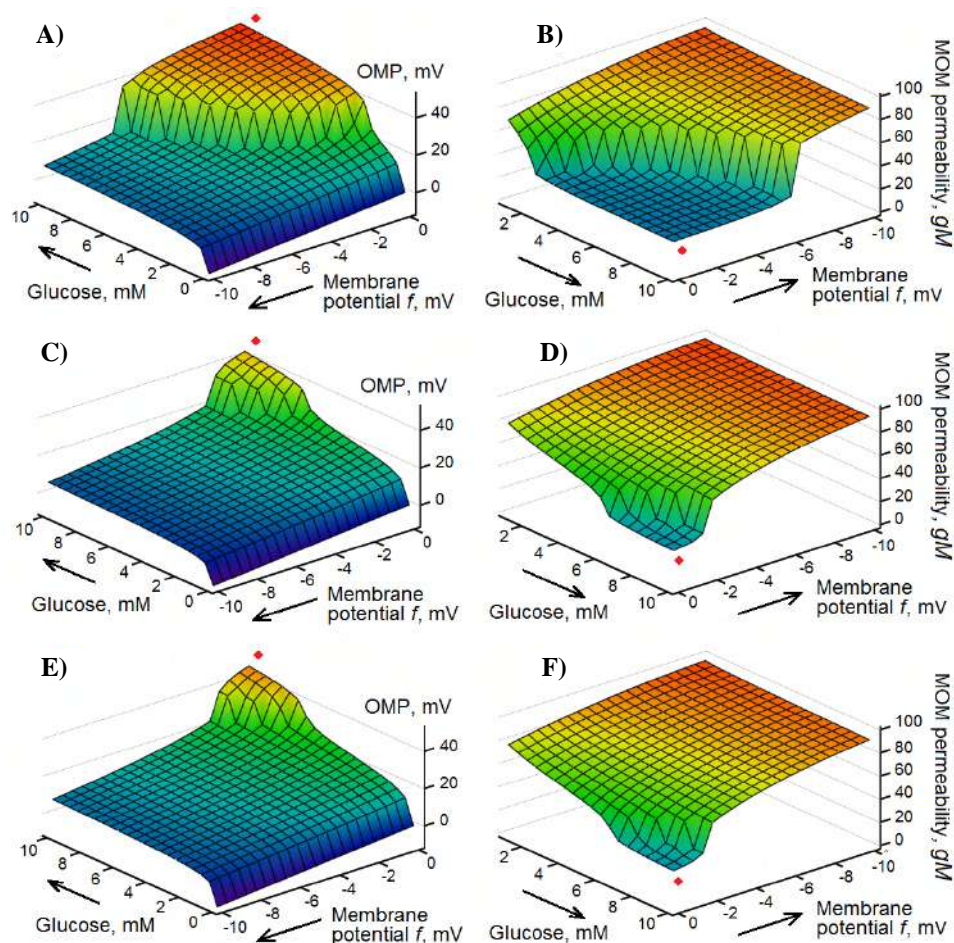


Figure 4. Influence of the negative membrane potential f generated by any mechanism simultaneously with the generation of positive OMP by the VDAC-HK complexes in mitochondria on the resulting OMP (equation 9) (A, C, E) and the MOM permeability gM (equation 4) (B, D, F). The fraction N_{vh} of the VDAC-HK complexes – 4.0 r.u. (A, B) or 3.6 r.u. (C, D) at the VDAC voltage sensitivity parameter $S = 40 \text{ V}^{-1}$. E, F: $N_{vh} = 4.0$ r.u. and $S = 36 \text{ V}^{-1}$

the model demonstrates significantly increased magnitudes of OMP_A , in the same range of given concentrations of ascorbate (Figure 5D) due to a lower voltage drop on the resistance R_a (Figure 1B).

In general, the model demonstrates that the membrane potential of relatively small magnitudes, negative in IMS (f in figure 4) and generated by any mechanism, might modulate the positive OMP generated by the VDAC-HK complexes and the MOM permeability. Additionally, it was clear that the ascorbate oxidation in intact mitochondria functions is one of these mechanisms and it has the tendency to generate the negative membrane potential.

Discussion

As a natural product, ascorbate is of great interest for its possible clinical use in tumor treatments, at least in combination with other methods of chemotherapy. Besides, it does not demonstrate noticeable toxicity against normal tissues, even at high doses, having, instead, various positive effects for the treatment of advanced-stage cancer (Polireddy, *et al.*, 2017; Xia, *et al.*, 2017; Bazzan, *et al.*, 2018; Zhou, *et al.*, 2020; Zasowska-Nowak, *et al.*, 2021). According to the literature data (Park, 2013; Ma, *et al.*, 2017; Polireddy, *et*

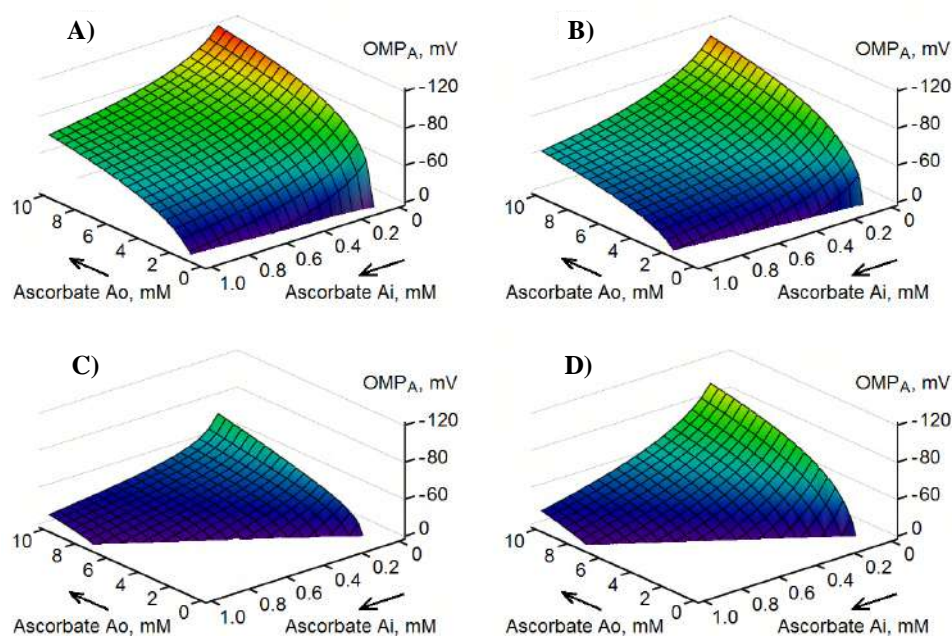


Figure 5. Generation of OMP_A during ascorbate oxidation in intact mitochondria at $V_m = 0$ r.u. (A), $V_m = 4$ r.u. (B), $V_m = 40$ r.u. (C, D), $S = 40 \text{ V}^{-1}$ (A-C), or $S = 0 \text{ V}^{-1}$ (D). Estimations were performed at $N_{vh} = 4$ r.u. V_m : Maximum rate of ascorbate oxidation in IMS.

et al., 2017; *Ly, et al.*, 2018; *Bakalova, et al.*, 2020), there seem to be multiple mechanisms of the ascorbate anticancer activity that are not entirely understood. It means that many factors might modulate its efficiency in the treatment of malignant tissues (*Noto, et al.*, 1989; *Verrax, et al.*, 2006; *Gogvadze, et al.*, 2008; *González, et al.*, 2012; *van Gorkom, et al.*, 2019). Here we propose a new mechanism of ascorbate anticancer activity focusing our attention on the great difference in the energy metabolism of cancer versus normal cells (*Nakashima, et al.*, 1988; *Lemeshko*, 2002; *Marín-Hernández, et al.*, 2006; *Gogvadze, et al.*, 2008; *González, et al.*, 2012; *Maldonado, et al.*, 2013).

We had already explained the Warburg type metabolism of cancer cells as a result of the electrical suppression of mitochondria by the metabolically-dependent OMP generated by the VDAC-HK complexes in MOM (*Lemeshko*, 2002, 2014, 2015, 2021). According to the computational model presented in this work (**Figure 1**), the critical glucose concentration needed for the generation of relatively high-magnitude OMP strongly depends on the quantity of these complexes in MOM (**Figure 3**). Our estimations demonstrate that the superposition of a relatively small negative OMP (f) generated by any mechanism and the positive OMP generated by the VDAC-HK complexes strongly decreases the magnitude of the resulting OMP. This OMP decrease leads to the reopening of the electrically closed free VDACs in MOM, thus increasing MOM permeability (**Figure 4**).

The model demonstrated that the effect of the mentioned negative potential f on the MOM permeability strongly depends on the quantity of the VDAC-HK complexes. A mere 10% decrease in the quantity of the VDAC-HK leads to a significant decrease in the glucose-dependent OMP (**Figure 4C**), thus increasing MOM permeability (**Figure 4D**). In this respect, many factors that can prevent the formation of the VDAC-HK complexes in MOM, or induce their dissociation, have been reported to demonstrate pro-apoptotic and anticancer activities (*Galluzzi, et al.*, 2008; *Camara, et al.*, 2017; *Magri, et al.*, 2018; *Shteinfer-Kuzmine, et al.*, 2018; *Ciscato, et al.*, 2020). The mechanism of such pro-apoptotic and anticancer activities might involve the mentioned reopening of the electrically closed VDACs in the mitochondria of cancer cells.

The model also demonstrated that the modulation by a negative membrane potential f of OMP generated by the VDAC-HK complexes strongly depends on VDAC voltage sensitivity allowing the reopening of the electrically closed VDACS. A decrease of only 10% in the voltage sensitivity parameter S leads to a strong decrease in OMP, thus increasing MOM permeability (**Figure 4, E and F**). In this respect, VDAC voltage sensitivity may be essentially modulated by many factors (**Rostovtseva, et al., 2020, 2021**) including cytosolic NADH and NADPH (**Lee & Colombini, 1996**).

Some cytosolic proteins, such as tubulin and alpha-synuclein, have been demonstrated to cork up free VDACS in MOM assuming this process is strongly OMP-dependent (**Rostovtseva, et al., 2021**). VDAC corking up, in turn, should also modulate OMP generation (**Lemeshko, 2017, 2018, 2021**).

As we assumed earlier (**Lemeshko, 2018, 2021**), ascorbate oxidation in intact mitochondria might generate OMP negative in IMS (**Figure 1**) thus explaining a very low rate of its oxidation in these organelles (**Lemeshko, et al., 2006; Valenti, et al., 2014**). The ascorbate anion is almost three times smaller than ATP^{4-} , although ATP^{4-} is permeable through the open VDAC (**Rostovtseva & Colombini, 1997; Colombini, 2016; Rostovtseva, et al., 2021**). That is why there are no reasons to believe that MOM is impermeable to the ascorbate anion as assumed earlier (**Lehninger, et al., 1954; Valenti et al., 2014**). To the best of our knowledge, no experimental data regarding the VDAC permeability to ascorbate has been registered yet.

On the other hand, if ascorbate oxidation in mitochondria has the tendency to generate OMP negative in IMS (**Figure 5**), the anticancer effect of high-dose ascorbate might relate to the modulation of the positive OMP generated by the VDAC-HK complexes. The effect might be similar to that shown in **figure 4** for a negative potential f generated by any mechanism. Moreover, the positive VDAC-HK-dependent OMP might strongly increase ascorbate oxidation in the mitochondria of cancer cells by increasing steady-state-concentrated ascorbate in IMS. This conclusion is consistent with the experimental observations of vitamin C deficiency in cancer patients and malignant tissues (**Van Gorkom, et al., 2019; Blaszcak, et al., 2019**).

It has been reported that electrically-closed VDACS strongly restrict the release of superoxide anions from mitochondria (**Han, et al., 2003**) meaning that if the VDAC-HK complexes in MOM generate OMP, there should be a relatively high concentration of superoxide anions maintained in the IMS of the mitochondria of cancer cells, as well as of ascorbyl-free radical anions due both to the electrical closure of free VDACS in MOM and to the generated OMP positive in IMS.

Interestingly, the protective, anti-apoptotic effect of mitochondrial HK in cancer cells has been considered to be a result not only of the VDAC's binding to MOM (two orders of magnitude higher than in normal cells) but also of the functioning of HK bound to the mitochondria (**Sun, et al., 2008**), both important for the metabolically-dependent generation of OMP (**Lemeshko, 2014, 2021**). For example, the positive VDAC-HK-dependent OMP of 30 mV should maintain Ca^{2+} concentration in IMS one order of magnitude less than in the cytosol thus strongly preventing the Ca^{2+} overload of the mitochondria (**Figure 1A**). This is consistent with the fact that malignant tissues are highly resistant to cell death (**Han, et al., 2003; Gogvadze, et al., 2008; Sun, et al., 2008**). The positive OMP generated by the VDAC-HK complexes may be decreased by applying the additional negative potential (f) (**Figure 4**) seemingly generated during ascorbate oxidation in the mitochondria of cancer cells (**Figure 5**). It should also facilitate Ca^{2+} entrance into IMS from the cytosol (**Figure 1A**) finally leading to Ca^{2+} overload of the mitochondrial matrix, even though the permeability to Ca^{2+} ions of VDAC in its electrically closed state is higher than in the completely open state (**Tan & Colombini, 2007**).

One of the main mechanisms suggested to explain ascorbate's anti-cancer properties is the ascorbate-induced ROS overproduction in cancer cells (**Verrax, et al., 2006; Ma, et al., 2017; Xia, et al., 2017; Lv, et al., 2018; Semkova, et al., 2020; Zhou, et al., 2020**) including ascorbyl radical generation that facilitates external NADH oxidation in mitochondria

and changes the cytosolic NADH/NAD⁺ redox state (Bakalova, *et al.*, 2020). Extremely high production of mitochondrial superoxide in cancer cells during ascorbate oxidation facilitated by menadione has also been reported (Semkova, *et al.*, 2020). Increased ROS production in combination with Ca²⁺ overload of mitochondria should increase the probability of Ca²⁺-ROS induced mitochondrial permeability transition (Grimm & Brdiczka, 2007; Bernardi, 2013; Lemeshko, 2018, 2021). Taking into account ROS-dependent mechanisms of high-dose ascorbate toxicity for malignant tissues (Kang, *et al.*, 2003; Carosio, *et al.*, 2007; González, *et al.*, 2010; Xia, *et al.*, 2017; Zhou, *et al.*, 2020), the possibility of generating the negative membrane potential during ascorbate oxidation (OMP_A in figure 5) and its influence of the positive OMP generated by the VDAC-HK complexes in the mitochondria of cancer cells (Figure 4), the main mechanism of ascorbate anticancer activity seems to be combined OMP-Ca²⁺-ROS-dependent.

The anti-cancer activity of ascorbate has been reported in the treatment of many aggressive tumors, such as pancreatic cancer, glioblastoma, ovarian cancer, prostate cancer, hepatoma, colon cancer, sarcoma, leukemia, mesothelioma, breast cancer, and neuroblastoma (see for references Polireddy, *et al.*, 2017). Interestingly, activities of the respiratory chain complexes in glioblastoma (WHO grade IV), for example, are significantly decreased in comparison with a normal brain, especially of complexes III (by 81%) and IV (by 84%) (Feichtinger, *et al.*, 2014). According to these data, the concentration of reduced cytochrome *c* in brain tumors and breast cancers is significantly higher than in normal human tissues (Abramczyk, *et al.*, 2021). The mentioned decrease in the respiratory chain complexes in the mitochondria of cancer cells might be an adaptive consequence of the Warburg-type metabolism, explained earlier as a result of electrical suppression of mitochondria by OMP generated by the abundant VDAC-HK complexes (Lemeshko, 2015, 2021).

In this respect, ascorbate is known to be oxidized in mitochondria with the participation of the cytochrome *c* and complex IV of the respiratory chain. The parameter V_m used in the model we present here (Figure 5) directly relates to complex IV and cytochrome *c* concentrations in IMS. The suggested model of the anti-cancer activity of ascorbate may be further developed in the future taking into account the mentioned changes in the respiratory chain, as well as the mutual interactions of the steady-state fluxes of inorganic phosphate and ascorbate across MOM.

It is well known that the redox mediators, such as menadione, PMS, TMPD, etc., strongly increase the rate of reduction of free cytochrome *c* by ascorbate, as well as the ascorbate oxidation in intact mitochondria (Sanadi, 1964, Hill & Nicholls, 1980; Nicholls, *et al.*, 1980; Valenti, *et al.*, 2014). This may explain the reported synergistic anti-cancer effects of ascorbate-menadione (Noto, *et al.*, 1989; Gilloteaux, *et al.*, 2006; Verrax, *et al.*, 2006; Semkova, *et al.*, 2020) and of the ascorbate use together with other redox mediators (Tomasetti, *et al.*, 2015; Hua, *et al.*, 2019).

In general, the results of the computational analysis of the suggested mechanism of ascorbate anti-cancer activity show that ascorbate oxidation in mitochondria has a tendency to generate negative OMP. This might modulate OMP generated by the VDAC-HK complexes in cancer cells leading to the reprogramming of the cell energy metabolism. This mechanism seems to be useful for developing novel and/or improving existing strategies of anti-cancer combination therapy (Ngo, *et al.*, 2019; Semkova, *et al.*, 2020), as well as for explaining in more detail various experimental phenomena in this respect.

Conclusion

Despite the long controversial history of ascorbate's anti-cancer properties, the mechanism of its selective toxicity at high doses for malignant tissues remains unclear and it seems to involve multiple processes and targets. Among possible targets underlying ascorbate anticancer effects, mitochondria might play a crucial role (Gogvadze, *et al.*, 2008; González, *et al.*, 2010, 2012; Hua, *et al.*, 2019; Semkova, *et al.*, 2020). In the case of

fast-growing tumor cells, the quantity of hexokinase attached to MOM is up to two orders of magnitude higher than in normal cells (Marín-Hernández, *et al.*, 2006). This allowed us to consider the VDAC-HK complexes in MOM as a biological battery (Lemeshko, 2017, 2018, 2021), generating high-magnitude OMP (positive in IMS) and switching cell energy metabolism to the Warburg type due to an electrical suppression of mitochondria (Lemeshko, 2015, 2021). On the other hand, the rate of ascorbate oxidation in isolated intact mitochondria of normal tissues is known to be extremely low, which seems to be caused by the generation of the negative OMP. The simplified computational model presented here demonstrated that a negative OMP of even low magnitudes generated by any mechanism might essentially decrease the magnitude of the positive OMP generated by the VDAC-HK complexes in cancer cells (Figure 1A) reprogramming the cell energy mechanism. This should also lead to the Ca²⁺-ROS mitochondrial permeability transition, the cytochrome *c* release from mitochondria, and cell death. Besides, since the suggested primary mechanism of selective toxicity of ascorbate for cancer cells strongly depends on the presence of redox mediators and on factors influencing the VDAC-HK interactions, VDAC's voltage sensitivity, and VDAC's corking up factors (Lemeshko, 2017), the suggested mechanism might be useful for the development of new experimental approaches and novel anti-cancer combination therapies.

Acknowledgments

The financial support for this work was provided by the National University of Colombia in Medellín. The author thanks Dr. Marco Colombini, University of Maryland (USA), and Dr. Tatiana Rostovtseva, NIH (USA), for their support of my theoretical works related to possible mechanisms of generation of the mitochondrial outer membrane potential and for discussions of its possible physiological role. The author also thanks Dr. Mauricio Arias (University of Calgary, Canada) and Dr. Sergiy V. Lemeshko, St. Elizabeth Hospital (Texas, USA) for their critical reading of the manuscript and valuable observations.

Conflicts of interest

The author declares no conflicts of interest

References

- Abramczyk, H., Surmacki, J.M., Brozek-Pluska, B., Kopec, M. (2021). Revision of commonly accepted Warburg mechanism of cancer development: redox-sensitive mitochondrial cytochromes in breast and brain cancers by Raman imaging. *Cancers (Basel)*. **13** (11): 2599. Doi: 10.3390/cancers13112599
- Bakalova, R., Zhelev, Z., Miller, T., Aoki, I., Higashi, T. (2020). Vitamin C versus cancer: Ascorbic acid radical and impairment of mitochondrial respiration? *Oxid. Med. Cell. Longev.* **2020**: 1504048. Doi: 10.1155/2020/1504048
- Bazzan, A.J., Zabrecky, G., Wintering, N., Newberg, A.B., Monti, D.A. (2018). Retrospective evaluation of clinical experience with intravenous ascorbic acid in patients with cancer. *Integr. Cancer Ther.* **17** (3): 912-920. Doi: 10.1177/1534735418775809
- Bernardi, P. (2013). The mitochondrial permeability transition pore: a mystery solved? *Front. Physiol.* **4**: 95. Doi: 10.3389/fphys.2013.00095
- Blaszczak, W., Barczak, W., Masternak, J., Kopczyński, P., Zhitkovich, A., Rubiś, B. (2019). Vitamin C as a modulator of the response to cancer therapy. *Molecules*. **24** (3): 453. Doi: 10.3390/molecules24030453
- Camara, A.K.S., Zhou, Y., Wen, P.C., Tajkhorshid, E., Kwok, W.M. (2017). Mitochondrial VDAC1: a key gatekeeper as potential therapeutic target. *Front. Physiol.* **8**: 460. Doi: 10.3389/fphys.2017.00460
- Cameron, E. & Pauling, L. (1976). Supplemental ascorbate in the supportive treatment of cancer: prolongation of survival times in terminal human cancer. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **73**: 3685-3689. Doi: 10.1073/pnas.73.10.3685
- Cameron, E. & Pauling, L. (1978). Supplemental ascorbate in the supportive treatment of cancer: reevaluation of prolongation of survival times in terminal human cancer. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **75**: 4538-4542. Doi: 10.1073/pnas.75.9.4538

- Carosio, R., Zuccari, G., Orienti, I., Mangraviti, S., Montaldo, P.G.** (2007). Sodium ascorbate induces apoptosis in neuroblastoma cell lines by interfering with iron uptake. *Mol. Cancer*. **6**: 55. Doi: 10.1186/1476-4598-6-55
- Chen, Q., Espey, M. G., Sun, A. Y., Pooput, C., Kirk, K. L., Krishna, M. C., Khosh, D. B., Drisko J., Levine, M.** (2008). Pharmacologic doses of ascorbate act as a prooxidant and decrease growth of aggressive tumor xenografts in mice. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105**: 11105-11109. Doi: 10.1073/pnas.0804226105
- Ciscato, F., Filadi, R., Masgras, I., Pizzi, M., Marin, O., Damiano, N., Pizzo, P., Gori, A., Frezzato, F., Chiara, F., Trentin, L., Bernardi, P., Rasola A.** (2020). Hexokinase 2 displacement from mitochondria-associated membranes prompts Ca(2+)-dependent death of cancer cells. *EMBO Rep.* **21** (7): e49117, Doi: 10.15252/embr.201949117
- Colombini, M.** (2016). The VDAC channel: Molecular basis for selectivity. *Biochim. Biophys. Acta.* **1863** (10): 2498-2502. Doi: 10.1016/j.bbamcr.2016.01.019
- De Pinto, V., Reina, S., Gupta, A., Messina, A., Mahalakshmi, R.** (2016). Role of cysteines in mammalian VDAC isoforms' function. *Biochim. Biophys. Acta.* **1857** (8): 1219-1227. Doi: 10.1016/j.bbambio.2016.02.020
- Feichtinger, R.G., Weis, S., Mayr, J.A., Zimmermann, F., Geilberger, R., Sperl, W., Kofler, B.** (2014). Alterations of oxidative phosphorylation complexes in astrocytomas. *Glia.* **62**: 514-525. Doi: 10.1002/glia.22621
- Fulda, S.** (2009). Tumor resistance to apoptosis. *Int. J. Cancer.* **124**: 511-515. Doi: 10.1002/ijc.24064
- Galluzzi, L., Kepp, O., Tajeddine, N., Kroemer, G.** (2008). Disruption of the hexokinase-VDAC complex for tumor therapy. *Oncogene.* **27**: 4633-4635. Doi: 10.1038/onc.2008.114
- Giansanti, M., Karimi, T., Faraoni, I., Graziani, G.** (2021). High-dose vitamin C: Preclinical evidence for tailoring treatment in cancer patients. *Cancers (Basel).* **13** (6): 1428. Doi: 10.3390/cancers13061428
- Gilloteaux, J., Jamison, J.M., Arnold, D., Neal, D.R., Summers, J.L.** (2006). Morphology and DNA degeneration during autophagic cell death in bladder carcinoma T24 cells induced by ascorbate and menadione treatment. *Anat. Rec. A Discov. Mol. Cell. Evol. Biol.* **288** (1): 58-83. Doi: 10.1002/ar.a.20276
- Gogvadze, V., Orrenius, S., Zhivotovsky, B.** (2008). Mitochondria in cancer cells: what is so special about them? *Trends in Cell Biol.* **18** (4): 165-173. Doi: 10.1016/j.tcb.2008.01.006
- González, M.J., Rosario-Pérez, G., Guzmán, A.M., Miranda-Massari, J.R., Duconge, J., Lavergne, J., Fernandez, N., Ortiz, N., Quintero, A., Mikirova, N., Riordan, N.H., Ricart, C.M.** (2010). Mitochondria, energy and cancer: The relationship with ascorbic acid. *J. Orthomol. Med.* **25** (1): 29-38.
- Gonzalez, M.J., Miranda Massari, J.R., Duconge, J., Riordan, N.H., Ichim, T., Quintero-Del-Rio, A.I., Ortiz, N.** (2012). The bio-energetic theory of carcinogenesis. *Med. Hypotheses.* **79** (4): 433-439. Doi: 10.1016/j.mehy.2012.06.015
- Grimm, S. & Brdiczka, D.** (2007). The permeability transition pore in cell death. *Apoptosis.* **12** (5): 841-855. Doi: 10.1007/s10495-007-0747-3
- Han, D., Antunes, F., Canali, R., Rettori, D., Cadenas, E.** (2003). Voltage-dependent anion channels control the release of the superoxide anion from mitochondria to cytosol. *J. Biol. Chem.* **278** (8): 5557-5563. Doi: 10.1074/jbc.M210269200
- Hill, B.C. & Nicholls, P.** (1980). Reduction and activity of cytochrome c in the cytochrome c-cytochrome aa3 complex. *Biochem. J.* **187** (3): 809-818. Doi: 10.1042/bj1870809
- Hua, A.B., Justiniano, R., Perer, J., Park, S.L., Li, H., Cabello, C.M., Wondrak, G.T.** (2019). Repurposing the electron transfer reactant phenazine methosulfate (PMS) for the apoptotic elimination of malignant melanoma cells through induction of lethal oxidative and mitochondriotoxic stress. *Cancers (Basel).* **11** (5): 590. Doi: 10.3390/cancers11050590
- Kang, J.S., Cho, D., Kim, Y.I., Hahm, E., Yang, Y., Kim, D., Hur, D., Park, H., Bang, S., Hwang, Y.I., Lee, W.J.** (2003). L-ascorbic acid (vitamin C) induces the apoptosis of B16 murine melanoma cells via a caspase-8-independent pathway. *Cancer Immunol. Immunother.* **52** (11): 693-698. Doi: 10.1007/s00262-003-0407-6
- Lee, A.C., Xu, X., Colombini, M.** (1996). The role of pyridine dinucleotides in regulating the permeability of the mitochondrial outer membrane. *J. Biol. Chem.* **271** (43): 26724-26731. Doi: 10.1074/jbc.271.43.26724
- Lehninger, A.L., UL Hassan, M., Sudduth, H.C.** (1954). Phosphorylation coupled to the oxidation of ascorbate by isolated mitochondria. *J. Biol. Chem.* **210** (2): 911-922. Doi: 10.1016/S0021-9258(18)65418-3

- Lemeshko, V.V.** (2002). Model of the outer membrane potential generation by the inner membrane of mitochondria. *Biophys. J.* **82**: 684-692. Doi: 10.1016/S0006-3495(02)75431-3
- Lemeshko, V.V., Haridas, V., Quijano-Pérez, J.C., Gutterman, J.U.** (2006). Avicins, natural anticancer saponins, permeabilize mitochondrial membranes. *Arch. Biochem. Biophys.* **454**: 114-122. Doi: 10.1016/j.abb.2006.08.008
- Lemeshko, V.V.** (2014). VDAC electronics: 1. VDAC-hexo(glucokinase) generator of the mitochondrial outer membrane potential. *Biochim. Biophys. Acta.* **1838**: 1362-1371. Doi: 10.1016/j.bbamem.2014.01.001
- Lemeshko, V.** (2015). The Warburg effect as a VDAC-hexokinase-mediated electrical suppression of mitochondrial energy metabolism. *FASEB J.* **29** (Suppl. 1): 725.27.
- Lemeshko, V.V.** (2017). The mitochondrial outer membrane potential as an electrical feedback control of cell energy metabolism. In: T.K. Rostovtseva (Ed.), *Molecular Basis for Mitochondrial Signaling*. Springer International Publishing, New York, pp. 217-250. Chapter 9.
- Lemeshko, V.** (2018). The role of the mitochondrial outer membrane in the control of cell energy metabolism. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exact. Fis. Nat.* **42** (162): 6-21 (Spanish). Doi: 10.18257/raccefyn.549
- Lemeshko, V.V.** (2021). Electrical control of the cell energy metabolism at the level of mitochondrial outer membrane. *BBA–Biomembranes.* **1863**: 183493. Doi: 10.1016/j.bbamem.2020.183493
- Ly, H., Wang, C., Fang, T., Li, T., Lv, G., Han, Q., Yang, W., Wang, H.** (2018). Vitamin C preferentially kills cancer stem cells in hepatocellular carcinoma via SVCT-2. *NPJ Precis. Oncol.* **2** (1): 1. Doi: 10.1038/s41698-017-0044-8
- Ma, E., Chen, P., Wilkins, H.M., Wang, T., Swerdlow, R.H., Chen, Q.** (2017). Pharmacologic ascorbate induces neuroblastoma cell death by hydrogen peroxide mediated DNA damage and reduction in cancer cell glycolysis. *Free Radic. Biol. Med.* **113**: 36-47. Doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2017.09.008
- Magri, A., Reina, S., De Pinto, V.** (2018). VDAC1 as pharmacological target in cancer and neurodegeneration: focus on its role in apoptosis. *Front. Chem.* **6**: 108. Doi: 10.3389/fchem.2018.00108
- Maldonado, E.N., Sheldon, K.L., DeHart, D.N., Patnaik, J., Manevich, Y., Townsend, D. M., Bezrukov, S.M., Rostovtseva, T.K., Lemasters, J.J.** (2013). Voltage-dependent anion channels modulate mitochondria metabolism in cancer cells: regulation by free tubulin and erastin. *J. Biol. Chem.* **288** (17): 11920-11929. Doi: 10.1074/jbc.M112.433847
- Marín-Hernández, A., Rodríguez-Enríquez, S., Vital-González, P.A., Flores-Rodríguez, F.L., Macías-Silva, M., Sosa-Garrocho, M., Moreno-Sánchez, R.** (2006). Determining and understanding the control of glycolysis in fast-growth tumor cells. Flux control by an over-expressed but strongly product-inhibited hexokinase. *FEBS J.* **273**: 1975-1988. Doi: 10.1111/j.1742-4658.2006.05214.x
- McCormick, W.J.** (1954). Cancer: the preconditioning factor in pathogenesis; a new etiologic approach. *Arch. Pediatr.* **71**: 313-322.
- McCormick, W.J.** (1959). Cancer: a collagen disease, secondary to a nutritional deficiency. *Arch. Pediatr.* **76** (4): 166-171.
- Nakashima, R.A., Paggi, M.G., Scott, L.J., Pedersen, P.L.** (1988). Purification and characterization of a bindable form of mitochondrial bound hexokinase from the highly glycolytic AS-30D rat hepatoma cell line. *Cancer Res.* **48**: 913-919.
- Ngo, B., van Riper, J., Cantley, L.C., Yun, J.** (2019). Targeting cancer vulnerabilities with high-dose vitamin C. *Nature Reviews Cancer.* **19** (5): 271-282. Doi: 10.1038/s41568-019-0135-7
- Nicholls, P., Hildebrandt, V., Hill, B.C., Nicholls, F., Wrigglesworth, J.M.** (1980). Pathways of cytochrome *c* oxidation by soluble and membrane-bound cytochrome aa3. *Can. J. Biochem.* **58**: 969-977. Doi: 10.1139/o80-132
- Noto, V., Taper, H.S., Jiang, Y.H., Janssens, J., Bonte, J., De Loecker, W.** (1989). Effects of sodium ascorbate (vitamin C) and 2-methyl-1,4-naphthoquinone (vitamin K3) treatment on human tumor cell growth in vitro. I. Synergism of combined vitamin C and K3 action. *Cancer.* **63** (5): 901-906. Doi: 10.1002/1097-0142(19890301)63:5<901::aid-cnrc2820630518>3.0.co;2-g
- Park, S.** (2013). The effects of high concentrations of vitamin C on cancer cells. *Nutrients.* **5** (9): 3496-3505. Doi: 10.3390/nu5093496
- Polireddy, K., Dong, R., Reed, G., Yu, J., Chen, P., Williamson, S., Violet, P.C., Pessetto, Z., Godwin, A.K., Fan, F., Levine, M., Drisko, J.A., Chen, Q.** (2017). High dose parenteral ascorbate inhibited pancreatic cancer growth and metastasis: Mechanisms and a phase I/IIa study. *Sci. Rep.* **7** (1): 17188. Doi: 10.1038/s41598-017-17568-8

- Roa, F.J., Peña, E., Gatica, M., Escobar-Acuña, K., Saavedra, P., Maldonado, M., Cuevas, M.E., Moraga-Cid, G., Rivas, C.I., Muñoz-Montesino, C.** (2020). Therapeutic use of vitamin C in cancer: Physiological considerations. *Front. Pharmacol.* **11**: 211. Doi: 10.3389/fphar.2020.00211
- Rostovtseva, T. & Colombini, M.** (1997). VDAC channels mediate and gate the flow of ATP: implications for the regulation of mitochondrial function. *Biophys. J.* **72** (5): 1954-1962. Doi: 10.1016/S0006-3495(97)78841-6
- Rostovtseva, T.K., Queralt-Martín, M., Rosencrans, W.M., Bezrukov, S.M.** (2020). Targeting the multiple physiologic roles of VDAC with steroids and hydrophobic drugs. *Front. Physiol.* **11**: 446. Doi: 10.3389/fphys.2020.00446
- Rostovtseva, T.K., Bezrukov, S.M., Hoogerheide, D.P.** (2021). Regulation of Mitochondrial Respiration by VDAC Is Enhanced by Membrane-Bound Inhibitors with Disordered Polyanionic C-Terminal Domains. *Int. J. Mol. Sci.* **22** (14): 7358. Doi: 10.3390/ijms22147358
- Sanadi, D.R.** (1964). On the mechanism of oxidative phosphorylation IX. Energy-dependent reduction of nicotinamide adenine dinucleotide by ascorbate and ubiquinone. *Biochim. Biophys. Acta.* **89**: 367-369. Doi: 10.1016/0926-6569(64)90231-7
- Semkova, S., Zhelev, Z., Miller, T., Sugaya, K., Aoki, I., Higashi, T., Bakalova, R.** (2020). Menadione/Ascorbate induces overproduction of mitochondrial superoxide and impairs mitochondrial function in cancer: comparative study on cancer and normal cells of the same origin. *Anticancer Res.* **40** (4): 1963-1972. Doi: 10.21873/anticancer.14151
- Shteinfer-Kuzmine, A., Amsalem, Z., Arif, T., Zooravlov, A., Shoshan-Barmatz, V.** (2018). Selective induction of cancer cell death by VDAC1-based peptides and their potential use in cancer therapy. *Mol. Oncol.* **12** (7): 1077-1103. Doi: 10.1002/1878-0261.12313
- Sun, L., Shukair, S., Naik, T.J., Moazed, F., Ardehali, H.** (2008). Glucose phosphorylation and mitochondrial binding are required for the protective effects of hexokinases I and II. *Mol. Cell. Biol.* **28** (3): 1007-1017. Doi: 10.1128/MCB.00224-07
- Tan, W. & Colombini, M.** (2007). VDAC closure increases calcium ion flux. *Biochim. Biophys. Acta.* **1768** (10): 2510-2515. Doi: 10.1016/j.bbame.2007.06.002
- Thayer, W.S. & Rubin, E.** (1981). Molecular alterations in the respiratory chain of rat liver after chronic ethanol consumption. *J. Biol. Chem.* **256** (12): 6090-6097.
- Tomasetti, M., Santarelli, L., Alleva, R., Dong, L.-F., Neuzil, J.** (2015). Redox-active and redox-silent compounds: synergistic therapeutics in cancer. *Curr. Med. Chem.* **22** (5): 552-568. Doi: 10.2174/0929867321666140915142219
- Valenti, D., de Bari, L., De Filippis, B., Ricceri, L., Vacca, R.A.** (2014). Preservation of mitochondrial functional integrity in mitochondria isolated from small cryopreserved mouse brain areas. *Anal. Biochem.* **444**: 25-31. Doi: 10.1016/j.ab.2013.08.030
- Van Gorkom, G.N.Y., Lookermans, E.L., van Elssen, C.H.M.J., Bos, G.M.J.** (2019). The effect of vitamin C (ascorbic acid) in the treatment of patients with cancer: A systematic review. *Nutrients* **11** (5): 977. Doi: 10.3390/nu11050977
- Verrax, J., Stockis, J., Tison, A., Taper, H.S., Calderon, P.B.** (2006). Oxidative stress by ascorbate/menadione association kills K562 human chronic myelogenous leukaemia cells and inhibits its tumour growth in nude mice. *Biochem. Pharmacol.* **72** (6): 671-680. Doi: 10.1016/j.bcp.2006.05.025
- Xia, J., Xu, H., Zhang, X., Allamargot, C., Coleman, K.L., Nessler, R., Frech, I., Tricot, G., Zhan, F.** (2017). Multiple myeloma tumor cells are selectively killed by pharmacologically-dosed ascorbic acid. *EBioMedicine* **18**: 41-49. Doi: 10.1016/j.ebiom.2017.02.011
- Yonetani, T.** (1960). Studies on cytochrome oxidase. II. Steady state properties. *J. Biol. Chem.* **235** (11): 3138-3143.
- Zasowska-Nowak, A., Nowak, P.J., Cialkowska-Rysz, A.** (2021). High-dose vitamin C in advanced-stage cancer patients. *Nutrients.* **13** (3): 735. Doi: 10.3390/nu13030735
- Zhou, J., Chen, C., Chen, X., Fei, Y., Jiang, L., Wang, G.** (2020). Vitamin C promotes apoptosis and cell cycle arrest in oral squamous cell carcinoma. *Front Oncol.* **10**: 976. Doi: 10.3389/fonc.2020.00976

Artículo de revisión

Hacia una estructura de investigación y educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones en Colombia

Towards the creation of a research and education structure for the prevention of accidents due to fires and explosions in Colombia

✉ Alejandro Molina^{1,*}, ✉ Sebastián López¹, ✉ Jorge Martín Molina-Escobar²,
✉ Henry Copete³, ✉ David Soto¹, ✉ Linda Jaramillo², ✉ Astrid Blandón²

¹Departamento de Procesos y Energía, Bioprocesos y Flujos Reactivos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

²Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Materia Orgánica Sedimentaria y Análisis de Imagen, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

³Soluciones Energéticas y de Automatización, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para admisión de Alejandro Molina, como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Se analizó la situación actual de la investigación y la educación en incendios y explosiones en Colombia desde un enfoque de ciencia e ingeniería y se hicieron recomendaciones sobre los campos que deben desarrollarse para crear una estructura investigativa y educativa que respalde los esfuerzos por prevenirlos. Dado el riesgo de incendios y explosiones, la mayoría de los países han propiciado la creación de centros de investigación y educación orientados al desarrollo científico en esta área. En Colombia tal infraestructura tiene un desarrollo apenas incipiente. La revisión de aspectos importantes en incendios y explosiones como el análisis estadístico, la caracterización fisicoquímica de sustancias inflamables, la cinética química, la combustión, la simulación, la radiación térmica, los fenómenos de pirólisis, el *smouldering*, la formación de hollín y de humo, la caracterización experimental, la evaluación de riesgos, la educación y otros aspectos específicos de las explosiones evidenció que en Colombia existe un buen desarrollo en la aplicación de la combustión y la pirólisis con fines comerciales, pero sin énfasis en incendios y explosiones. En las demás áreas existen antecedentes de investigación específicamente relacionados con este campo que deben reforzarse. Se recomienda la creación de programas curriculares de posgrado en ciencia y tecnología en esta área, así como el aumento de la capacidad experimental para la caracterización de sustancias inflamables, el fortalecimiento de la investigación en ciencias básicas y el desarrollo de habilidades de computación y simulación.

Palabras clave: Incendios; Explosiones; Educación; Colombia.

Abstract

We review here the current situation of research and education related to fires and explosions in Colombia from a science and engineering perspective. We present the fields that should be developed to create a research and education structure in support of the efforts to prevent accidents and explosions. Given the risk of fires and explosions, most countries have developed research and education centers focused on scientific analysis in this field. In Colombia, the development of such a structure is barely incipient. A review of different important areas in fires and explosions such as statistical analysis, physicochemical characterization of flammable substances, chemical kinetics, combustion, simulation, thermal radiation, pyrolysis, smouldering, soot and smoke formation, experimental characterization, risk assessment, education, and specific aspects of explosions showed

Citación: Molina A, López S, Molina-Escobar JM, *et al.* Hacia una estructura de investigación y educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):50-67, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1539>

Editor: Óscar José Mesa-Sánchez

***Correspondencia:**

Alejandro Molina;
amolinao@unal.edu.co

Recibido: 19 de agosto de 2021

Aceptado: 30 de noviembre de 2021

Publicado en línea: 15 de diciembre de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

that combustion and pyrolysis are widely applied for commercial purposes, but with no emphasis on fires and explosions. In the other areas, there is some evidence of research that should be further advanced. To strengthen the academic environment related to fires and explosions, we recommend the creation of graduate science and technology education programs to strengthen the experimental capacity for the characterization of flammable substances fostering research in basic sciences and develop computer and simulation skills.

Keywords: Fires; Explosions; Education; Colombia.

Introducción

La posibilidad de desastres por incendios y explosiones es alta y diversas industrias en todo el mundo se enfrentan a este riesgo como lo demuestran eventos recientes en la minería, la explotación de gas y petróleo y la industria química. Asimismo, se pueden registrar incendios y explosiones en edificaciones y obras civiles y también es alta la incidencia de incendios forestales a nivel mundial (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>). La prevención de incendios y explosiones involucra a muchas partes, desde los entes reguladores y fiscalizadores del gobierno hasta la industria privada. Las universidades y los centros de investigación deben hacer parte de cualquier esfuerzo para prevenir los desastres por incendios y explosiones.

A nivel internacional se han desarrollado centros de investigación cuyo interés principal es la prevención de accidentes por incendios y explosiones (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>), pues, aunque es común que los temas de seguridad contra incendios y explosiones se integren en los currículos de los programas académicos tradicionales de ingeniería, en algunos países existen programas de posgrado exclusivamente diseñados para mejorar la seguridad contra incendios y explosiones (**Tabla 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

La prevención de incendios y explosiones constituye un campo bastante extenso, con un carácter inherentemente interdisciplinario, pero es posible clasificar los grupos que deciden abordarla mediante la investigación y educación. En primer lugar, según el enfoque que se adopte, se pueden diferenciar las actividades específicas de prevención de incendios de aquellas orientadas a combatirlos. Las primeras incluyen el diseño estructural de edificios, minas, empresas y plantaciones que prevenga la formación de incendios. Las segundas competen más a los organismos de control de incendios, como los bomberos y las unidades de rescate.

Más allá de esta división, de carácter esencialmente operativo, se puede proponer otra clasificación que distingue entre centros o grupos de investigación que estudian la seguridad y la salud ocupacional relacionadas con incendios y explosiones de aquellos que se centran más en entender la ciencia que subyace a estos fenómenos, la resistencia de los materiales frente a un accidente de este tipo, los fenómenos físicos que dan lugar a la ignición, y la estimación de riesgos y las propuestas de soluciones de ingeniería para mitigarlos. Esta clasificación no es excluyente y hay grupos que abordan tanto la prevención como la mitigación de incendios y realizan análisis de seguridad y salud ocupacional.

En Colombia hay investigación relacionada con el área de seguridad ocupacional y una cantidad significativa de programas de posgrado enfocados en los aspectos académicos, no gerenciales, de la salud ocupacional y la seguridad en el trabajo en diferentes instituciones académicas (**Tabla 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>). Sin embargo, el campo de los estudios más fundamentales sobre la dinámica de los incendios y explosiones y las soluciones ingenieriles que pueden mitigarlas no ha tenido tanta difusión como el de la salud y la seguridad ocupacional, aunque se destaca un incipiente pero importante desarrollo con nuevos programas de posgrado y estudios a cargo de investigadores asociados con universidades colombianas (**Tabla 5S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

Debe admitirse, sin embargo, que, a pesar del avance que se evidencia en el estudio de la ciencia e ingeniería de la prevención de incendios y explosiones en el país, es necesario desarrollar una estructura de investigación y educación en esta área. En una primera parte

de este documento se describen las investigaciones actuales en Colombia, así como aquellas que pueden aprovecharse en la prevención de accidentes por incendios y explosiones. En la segunda parte se proponen estrategias para guiar la investigación y la educación desde la perspectiva de la ciencia y la ingeniería.

Antecedentes de investigación en ciencia e ingeniería de incendios y explosiones en Colombia

La revisión de la investigación en el tema de incendios y explosiones tuvo como norma incluir principalmente publicaciones realizadas por instituciones o investigadores vinculados o relacionados con universidades y centros de investigación colombianos. Se consultaron revistas académicas internacionales y nacionales. Se dio más énfasis a la relevancia del tema de los artículos que a la calidad técnica o importancia de las revistas en que aparecen privilegiando el interés por lograr una visión del desarrollo actual de la investigación en este campo en Colombia. Como se sabe, hay una disciplina de investigación conocida como bibliometría, cuyo objeto es la recopilación, organización y manipulación cuantitativa de la información recogida en las publicaciones científicas (Verbeek, *et al.*, 2002). Tales mediciones se consideran útiles en el desarrollo de las políticas de ciencia y tecnología, pues suministran estadísticas sobre el número de publicaciones, las citas de la publicación, el promedio de citas por publicación, el número de autocitas, el factor de impacto de la revista, el promedio mundial del factor de impacto en el tema, etc., y es evidente que dichos datos son relevantes para el análisis que nos ocupa. Sin embargo, la revisión que acá se presenta es de orden cualitativo y se limita a describir los diferentes frentes de investigación relacionados con la ciencia de incendios y explosiones en Colombia. En la revisión se encontraron 82 publicaciones relacionadas con este campo, aparecidas entre 1992 y 2021. Antes del 2010 solo se registran seis, cifra que aumentó a 11 entre el 2012 y el 2013 como respuesta al incendio del poliducto en Dosquebradas a finales del 2011. Entre el 2013 y el 2017 el número de referencias por año fue inferior a 10. Solo a partir del 2018 el número de referencias por año superó las diez (2018:14, 2019:11 y 2020: 13), la mayoría motivada por estudios relacionados con la minería del carbón.

Uno de los aspectos más interesantes al estudiar incendios y explosiones es su ubicuidad en el quehacer humano. Hay estudios en Colombia sobre incendios en lugares tan diversos como una mina de carbón (García-Torrent, *et al.*, 2016) o una sala de cirugía (Llamas, *et al.*, 2007). A pesar de este carácter ampliamente interdisciplinario, los eventos químicos y físicos que tienen lugar durante un incendio son bastante similares, independientemente de su origen. Puede decirse, de forma un tanto extrema, que tanto el incendio en la mina de carbón como el de la sala de cirugía producen dióxido de carbono, agua, humo y hollín, aunque claro, en diferentes concentraciones.

En el caso de las explosiones también es posible hacer un análisis teórico general para entender eventos de tan diferente escala como la explosión de una estrella supernova o la de un depósito de combustibles (Oran, 2015). A pesar de las diferencias entre los incendios y las explosiones en cuanto a la forma y velocidad de los procesos, existen similitudes evidentes en las primeras etapas, antes del paso de deflagración a detonación.

Desde el punto de vista de ciencia y tecnología, la investigación y la educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones objeto de este artículo se centran principalmente en esos aspectos comunes y en la información estadística que documenta el número de accidentes por incendios y explosiones, la caracterización fisicoquímica de las sustancias inflamables, la cinética de las reacciones químicas, el entendimiento de la combustión, los avances en simulación, la transferencia de calor por radiación, los fenómenos de pirólisis, *smouldering* y formación de hollín y humo, la caracterización experimental, la evaluación de riesgos y la educación. Dadas las particularidades inherentes a los procesos explosivos, se les dedica una sección aparte. Aunque hay otras áreas relevantes, por ejemplo la resistencia de los materiales, estas no se alcanzaron a abordar en esta revisión.

Análisis estadístico

Más allá de las estadísticas que diferentes instituciones gubernamentales presentan sobre los incendios y explosiones, es común que los investigadores analicen los datos sobre tales accidentes para aprender sobre ellos. En este sentido, en la **Tabla 6S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1539/3177>, se presentan ejemplos de informes de estadísticas de incendios en distintos países, así como de estudios que las analizan con el fin de disminuir su incidencia.

En cuanto a Colombia, se presentan varios estudios en que se revisan las estadísticas, por ejemplo, de las emergencias mineras mortales en el país (**Gheorghe, 2020; Gheorghe, et al., 2021**) o en regiones específicas (**Ramírez-Rosas & González-Sierra, 2016**). Cuando estos estudios se combinan con herramientas de análisis avanzadas, por ejemplo la modelación estructural interpretativa (*Interpretative Structural Modeling, ISM*), la cual permite el aprendizaje interactivo asistido por computador (**Gheorghe, 2020**), es posible acoplar los factores de riesgo internos y externos de las empresas involucradas y ver cómo se propagan en la cadena de producción debido a sistemas de seguridad defectuosos. Es decir, más allá de la importante recopilación estadística que indica, por ejemplo, que entre el 2005 y el 2018 en la minería colombiana (**Gheorghe, et al., 2021**) la mayoría de emergencias se originaron en minas de carbón (77,4 %) y un número significativo del total (27,2 %) tuvo lugar en minas ilegales. En este caso, el análisis ISM indica (**Gheorghe, 2020**) que hay cuatro causas directas de riesgo de accidentes en minería: 1) falta de condiciones de seguridad en techos, paredes y pisos; 2) un porcentaje elevado de gases peligrosos; 3) uso inadecuado de las herramientas y equipos, y 4) procedimientos de trabajo seguro precedidos de otros factores de riesgo que no son producto del azar. En lo que compete a incendios y explosiones, este tipo de análisis permite reconocer que la causa inmediata, relacionada con un porcentaje elevado de gases peligrosos, normalmente está precedida por la ausencia de monitoreo permanente de gases y de un plan de ventilación adecuado.

También se han publicado análisis estadísticos para revisar el área afectada por incendios forestales en Colombia (**Armenteras-Pascual, et al., 2011; Romero-Ruiz, 2011**) y su relación con el clima y la vegetación. La importancia de este tipo de estudios es evidente para la planeación de estrategias de mitigación y de reacción ante futuras emergencias.

Asimismo, en la literatura médica se encuentran análisis de las causas, de las poblaciones en alto riesgo, y de la tasa de mortalidad por quemaduras (**Aldana & Navarrete, 2015; Navarrete & Rodríguez, 2016**). Entre el 2000 y el 2009 la mayoría de accidentes fatales por quemaduras (**Navarrete & Rodríguez, 2016**) en la población general se debió a accidentes eléctricos (49 %), seguidos por incendios (29 %). Por el contrario, en la población pediátrica (**Aldana & Navarrete, 2015**) la principal causa fueron los incendios (44 %) seguidos por los accidentes eléctricos (30 %). No se encontraron otros artículos con datos estadísticos sobre incendios y explosiones en Colombia fuera de las referencias ya mencionadas.

Caracterización fisicoquímica de sustancias inflamables

Los equipos de investigación en Colombia han caracterizado con frecuencia las propiedades relevantes de sustancias potencialmente inflamables. Como se resume en la **Tabla 7S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1539/3177>, estas incluyen combustibles líquidos, fracciones de petróleo y productos de la combustión. Sin embargo, las investigaciones directamente relacionadas con las propiedades de sustancias combustibles desde el punto de vista de incendios y explosiones son pocas. Se pudo encontrar, por ejemplo, la caracterización de las propiedades de ignición y explosividad de los carbones colombianos (**Fuentes, et al., 2018; García-Torrent, et al., 2016**) y de sus procesos de combustión espontánea (**Gutiérrez, et al., 2018**), el análisis del efecto del tamaño de partícula en la explosividad de material particulado de trigo (**Pico, et al., 2020b**) o las características espectrales de distintos explosivos (**Garzón-Serrano, et al., 2020; Sierra, et al., 2020**). Con contadas excepciones, los experimentos se hicieron en universidades extranjeras y, en algunos casos, en Colombia, pero solo simulaciones (**Mena, et al., 2012**;

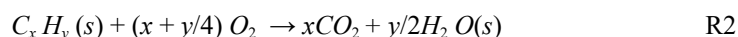
Pico, et al., 2020a, 2020b; **Torrado**, 2017; **Vizcaya, et al.**, 2018); tampoco hay evidencia del uso de equipos básicos en la determinación de parámetros relevantes para el estudio de incendios y explosiones, como el tubo Hartmann, el test de la esfera de 20 L o de 1 m³ y el horno Godbert-Greenland.

En la revisión solo se reportó una investigación (**Fuentes, et al.**, 2018) que hace referencia al uso de placas calientes para la determinación de la temperatura de mínima ignición de sustancias combustibles y la aplicación de equipos experimentales o aproximaciones teóricas para la evaluación de parámetros característicos de la ignición, pero desde el punto de vista del uso de combustibles, como se indica en la **Tabla 7S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>. Se destaca también un estudio (**Bustamante-Rúa, et al.**, 2019) en el que se evalúa la posibilidad de ignición espontánea en minas a cielo abierto usando un análisis estadístico que consideró 21.000 datos de propiedades de vetas de carbón, tales como temperatura ambiente, temperatura de la veta, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad de viento, composición de la atmósfera (oxígeno, monóxido de carbono, metano), altura sobre el nivel del mar y composición del carbón de dos minas a cielo abierto y en minas de carbón ya abandonadas.

La escasez de los análisis de las propiedades de ignición de combustibles contrasta con los múltiples estudios sobre las propiedades claves para entender el desempeño de combustibles como, por ejemplo, la velocidad de llama laminar, las dimensiones y temperatura de la llama, el índice Wobbe, los calores inferiores y superiores de combustión, los límites de inflamabilidad y el punto de rocío (**Tabla 7S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

Cinética química

Para entender desde el punto de vista teórico un evento como un incendio o una explosión es necesario caracterizar las múltiples reacciones que tienen lugar y simplificarlas de tal forma que estén al alcance de los cálculos necesarios para predecir o mitigar un incendio. En Colombia se registra un número significativo de estudios (**Tabla 8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>) que abordan el tema de la cinética química cuando se aplica al uso de combustibles. Esa relativa abundancia de artículos en esta área contrasta con los pocos estudios relacionados con el uso de mecanismos de reacción en la simulación de incendios. Solo se encontró un artículo en este campo (**Mariño, et al.**, 2020) en el que se comparan tres situaciones: una llama laminar, una turbulenta y un incendio causado por empozamiento de hidrocarburos, mediante la herramienta de representación física *Fire Dynamic Simulator* (FDS) (**McGrattan, et al.**, 2021) utilizando un modelo que, en vez de definir de forma heurística la cantidad de combustible que se convierte en hollín, propone sendas reacciones de formación (R1) y oxidación de hollín (R2). Cada reacción está acompañada de diferentes submodelos que buscan ajustar la cinética para representar un proceso tan complejo como la formación y oxidación del hollín, el cual involucra cientos de reacciones químicas. El análisis presentado en este artículo (**Mariño, et al.**, 2020) no busca un desarrollo fundamental en la química del proceso de formación de hollín, sino que considera aspectos como la resolución de la malla computacional y cómo se acopla dentro de los submodelos de turbulencia, radiación y combustión.



Combustión

En Colombia ha habido un amplio desarrollo en temas de combustión (**Tabla 9S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>). Ahora bien, cuando se analizan los estudios relacionados directamente con la combustión y la prevención de incendios y explosiones, la información es más limitada. Se encontraron estudios sobre la combustión espontánea de carbón que analizan el efecto de la concentración de sodio (**Bustamante**

Rúa, *et al.*, 2019), las propiedades fisicoquímicas del carbón (Castro-Marín & Martínez, 1997) o que simulan la propagación del incendio en el manto de carbón (Bustamante-Rúa, *et al.*, 2019). También se encontraron estudios sobre el desempeño de distintas sustancias inflamables en ensayos de laboratorio típicos que incluyen datos experimentales (Serrano, *et al.*, 2020) o de simulaciones (Murillo, *et al.*, 2013, 2016, 2018; Serrano, *et al.*, 2020; Vizcaya, *et al.*, 2018), así como el análisis de datos experimentales relacionados con incendios por compartimientos (Majdalani, *et al.*, 2016), o la simulación de incendios causados por empozamiento de combustibles (Sedano, *et al.*, 2017).

Simulación

Quizás el área de mayor avance en la comprensión de incendios y explosiones es la del desarrollo de herramientas de representación física de estos dos fenómenos. Gracias a los métodos de computación actuales, se cuenta con programas, muchos de ellos de acceso libre, que sirven para estudiar los incendios y explosiones. Entre las publicaciones de instituciones colombianas fue frecuente encontrar estudios que han aplicado modelos de representación física en temas afines a los incendios (Tabla 10S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

No resultó una sorpresa que el número de publicaciones que estudian los incendios y explosiones mediante simulaciones fuera alto en comparación con aquellos que lo hacen por la vía experimental. A la experiencia que se tiene en simulación se suma el hecho de que la investigación experimental en esta área demanda una gran cantidad de recursos, bien sea por el costo de los equipos de caracterización o por el carácter destructivo inherente a los experimentos. Por ejemplo, recientemente se desarrollaron simulaciones (Bustamante-Rúa, *et al.*, 2019; Gutiérrez, *et al.*, 2018) para predecir la propagación de incendios en minas a cielo abierto durante la combustión espontánea del carbón que resuelven las ecuaciones de transferencia de calor y de conservación de especies en la fase sólida. En este caso, los investigadores resolvieron sus propios modelos en la plataforma de modelación Comsol (COMSOL Inc., 2021). Sin embargo, en otros estudios (Mariño, *et al.*, 2020) se emplearon herramientas de representación física más tradicionales en el área de incendios y explosiones, como el FDS, quizá el programa de mayor uso por parte de ingenieros y diseñadores para simular incendios. Otros autores han empleado el programa FireFoam (Sedano, *et al.*, 2017), una herramienta de simulación de incendios de amplio uso en la comunidad académica. El FDS se ha empleado también en estudios relacionados con Colombia en el análisis de la interacción de los aspersores y los equipos de ventilación en incendios (Moya-Forero, 2013). Incluso algunos autores han usado herramientas de representación física de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) tradicionales como Star CCM (Murillo, *et al.*, 2018; Pico, *et al.*, 2020b; Pinilla, *et al.*, 2019; Serrano, *et al.*, 2020) para analizar la dispersión de polvos combustibles en rangos de 20 L cuando se estudian sus propiedades de ignición.

En la revisión solo se encontraron trabajos de pregrado (Tabla 11S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>) con herramientas de modelación física como FLACS (GeXCon US Inc, 2019), PHAST (DNV, 2021) y Ansys (ANSYS Inc, 2021) para el análisis de eventos explosivos. La simulación de incendios y explosiones tiene muchos usos en la prevención y la educación para su mitigación y en los estudios forenses posteriores a un accidente. Una de las aplicaciones más interesantes es en el diseño por desempeño, en el cual las estrategias de mitigación y control contra incendios en construcciones civiles, por ejemplo, se basan en el desempeño del sistema y no en normas preestablecidas con códigos de ingeniería, práctica que hoy se usa más frecuentemente. En Colombia la investigación en herramientas de simulación física para el diseño por desempeño es algo incipiente (Cadena & Muñoz, 2013).

Radiación térmica

De los tres fenómenos en los que es posible dividir la transferencia de calor en un incendio, conducción, convección y radiación, esta última es la que domina cuando el tamaño del material combustible es superior a 0,3 m, lo que determina los procesos de crecimiento y

esparcimiento de un incendio cuando hay compartimientos (**Drysdale**, 2011). Si bien el análisis de la conducción y la convección es bastante importante, principalmente durante la ignición el primero, y cuando la radiación no es importante el segundo, la comprensión de la radiación térmica es clave para entender y predecir cómo se propaga un incendio.

En la investigación en este campo en el país, no es extraño el estudio de la radiación (**Tabla 12S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>) en ciencias básicas, de la combustión o del uso de la radiación solar como fuente de energía, pero solo se encontró un artículo relacionado con la radiación de llamas de hidrógeno (**Molina, et al.**, 2007) con cierto énfasis en incendios y ninguno sobre el efecto de la radiación en estos, un tema bastante común (**Gavelli**, 2021) en las investigaciones internacionales dedicadas a incendios y explosiones.

Pirólisis, smouldering, hollín y humo

Entre las áreas revisadas, la caracterización fisicoquímica, la cinética química, la simulación y la radiación térmica son importantes en muchos campos, desde la industria química hasta la energía solar. La combustión es un área que en sí misma tiene amplia aplicación industrial. Por el contrario, aunque la pirólisis, el proceso de *smouldering*, la producción de hollín y el humo pueden ser relevantes en otros campos, tienen especial trascendencia en el estudio de incendios.

Al comienzo de un incendio se registra la producción de combustibles gaseosos provenientes de la descomposición, o pirólisis, de compuestos orgánicos. Dada la importancia de los fenómenos de descomposición de materiales combustibles en la predicción del avance de un incendio y los resultados de una explosión, resultan importantes los diferentes análisis hechos en Colombia sobre la caracterización de la pirólisis (**Tabla 13S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>), principalmente de residuos agroindustriales, carbón y materiales de desecho. Se debe destacar, sin embargo, que todos estos análisis se centran en el potencial uso comercial de la pirólisis.

El fenómeno de *smouldering*, cuya traducción al español más acertada podría ser “oxidación autónoma de un sólido”, es característica de materiales sólidos con alta porosidad que producen un carbonizado, normalmente conocido como *char* (**Drysdale**, 2011). Se asocia principalmente con procesos de calentamiento en masas grandes de material y es clave cuando se analiza cómo se esparce un incendio en superficies sólidas. En la revisión no se encontraron referencias al estudio de los fenómenos de *smouldering* o de pirólisis en la dinámica de incendios. Lo más cercano son los análisis de los procesos de secado y oxidación de alimentos, que presentan cierta similitud con los que ocurren en las primeras etapas de formación de un incendio, y los análisis del proceso de combustión *in situ* para el recobro mejorado del petróleo, que también se acercan a los procesos de pirólisis en un incendio (**Tabla 13S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

El hollín, sólido que se produce durante la combustión incompleta de hidrocarburos, es responsable en gran medida de la luminosidad de las llamas. Entender cómo los combustibles líquidos, los cuales pasan a la fase de vapor antes de la combustión, se convierten en pequeñas partículas sólidas ha intrigado a científicos como Faraday desde 1861 (**Faraday**, 1861). A finales del siglo XX y comienzos del XXI se hicieron muchas investigaciones para entender desde el punto de vista teórico el fenómeno, principalmente con el fin de disminuir la contaminación de material en partículas producto de los motores de combustión interna (**Michelsen**, 2017). Investigadores asociados con Colombia han hecho algunas de esos estudios (**Tabla 13S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

En los incendios la investigación sobre hollín es clave dada su importancia en la predicción de la radiación, la opacidad y la forma cómo se propagan. Solo se encontraron dos estudios (**Mariño, et al.**, 2020; **Mariño-Sánchez**, 2016) en instituciones colombianas que analizaron la forma de simular la producción de hollín mediante FDS (**McGrattan, et al.**, 2021).

Quizás más importante que el papel del hollín en los incendios es el del humo, algo tan cotidiano que su definición para el análisis ingenieril o científico resulta bastante compleja. El humo, que se puede entender como una mezcla que contiene aire arrastrado por

los procesos de combustión y productos gaseosos resultantes de la combustión de material orgánico, así como pequeñas partículas líquidas y sólidas dispersas (**Drysdale, 2011**), se considera responsable de más de la mitad de las víctimas mortales en incendios debido a su toxicidad y opacidad. Predecir la velocidad a la cual se transporta la capa de humo es clave para el diseño de zonas de evacuación en obras de infraestructura civil.

A nivel internacional son bastantes los estudios orientados a mejorar los modelos para predecir la dispersión del humo en incendios forestales (**Prichard, et al., 2019**), o los que analizan la forma de integrar herramientas para el control de humos en simulaciones de incendios (**Zhang, et al., 2008**). En esta revisión, sin embargo, no se encontraron publicaciones de investigadores en Colombia en el área de la simulación del comportamiento del humo, pero sí estudios que buscaban diseñar sistemas de detección de humo económicos en sectores económicamente vulnerables de Colombia (**Aguirre, et al., 2017**), además de los trabajos ya citados de simulación de incendios (**Mariño, et al., 2020; Mariño-Sánchez, 2016; Sedano, et al., 2017**), los cuales también analizan la dispersión del humo durante el incendio. El análisis del humo y su aplicación en la prevención de incendios es otra área de poco desarrollo en Colombia.

Caracterización experimental

El análisis experimental de incendios y explosiones tiene muchas escalas y matices. Es posible hacer experimentos muy fundamentales que caractericen, por ejemplo, las propiedades del hollín en equipos con tamaños que van desde centímetros hasta los 6 metros. Se pueden estudiar las propiedades inflamables de sustancias en equipos de laboratorio como el calorímetro de cono, o caracterizar el incendio completo de todo un apartamento como se hizo a finales de la primera década de este siglo en Escocia (**Abecassis-Empis, et al., 2008**), y también es factible estudiar las características explosivas de carbones en la esfera de 20 L o en minas experimentales (**Sapko, et al., 2000**). Tanto los experimentos más relacionados con la ciencia básica, como los que involucran estructuras con tamaños más cercanos a los reales, son importantes para entender cómo se propagan los incendios y las explosiones y para prevenir que ocurran. En la revisión no se encontró evidencia de artículos sobre Colombia que estudien de forma experimental la propagación de incendios o el desarrollo de explosiones.

Evaluación de riesgos

La evaluación de riesgos es una herramienta clave en la prevención de accidentes por incendios y explosiones. Normalmente incluye pasos como la determinación de peligros, la cuantificación, evaluación, y control de riesgos y un plan de emergencias y son muchas las metodologías que buscan entender y mitigar dichos riesgos. De hecho, la evaluación de riesgos es en sí misma objeto de investigación y su aplicación incluye desde incendios forestales hasta incendios y explosiones en minas subterráneas. Se podría argumentar que toda la investigación básica y aplicada en este campo debe resultar en un análisis de riesgos que efectivamente permita evitarlos.

En las investigaciones en Colombia se han hecho análisis de riesgos de eventos relacionados con el efecto de desastres tecnológicos originados por fenómenos naturales (*natural hazard triggering technological disasters*, natech) tales como terremotos, oleaje extremo, relámpagos y truenos, accidentes volcánicos, vientos y desplazamientos de tierra, así como análisis del impacto ecológico. En la **tabla 14S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177> se dan ejemplos de investigaciones relacionadas con el análisis de riesgos en Colombia, aunque en el caso de los incendios y explosiones no hay muchos estudios de este tipo, excepto unos pocos, como el relacionado con la explosión de nanopulvos de aluminio (**Vignes, et al., 2012**), en el que se determinaron los riesgos de incendio y explosión y las consecuencias asociadas con la producción de estas sustancias, o una evaluación del efecto dominó en poliductos por no guardar suficiente distancia entre uno y otro (**Ramírez-Camacho, et al., 2015**), o el análisis detallado del potencial riesgo de incendios y explosiones en plantas para

la producción de aceite crudo de palma en el norte de Colombia (**Moreno-Sader, et al., 2020**), o sobre el desarrollo de planes de contingencia en la industria del petróleo (**Miranda, et al., 2003**) y el riesgo de explosiones por polvo de combustible en minas subterráneas (**William & Martínez, 1998**).

Educación

El componente educativo es clave en la mitigación de los efectos de los incendios y explosiones. La revisión se centró en los intentos por mejorar la educación sobre la prevención de incendios y explosiones a nivel superior, aunque reconociendo la importancia de la educación en todos los niveles involucrados: público general, operadores, personal de salud, personal administrativo, gobierno, entes reguladores, etc.

Se encontraron estudios (**Tabla 15S**, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/1539/3177>) asociados con investigaciones en Colombia en los que se reconoce la importancia de adecuar la educación en ciencia e ingeniería al nuevo entorno pedagógico, que involucra aspectos técnicos como el uso de herramientas virtuales o de simulación física, o pedagógicos, como la educación basada en proyectos, en la solución de problemas o en servicios, el plan padrino o el uso de juegos. Sin embargo, solo se encontró un artículo directamente relacionado con la educación para mitigar incendios y explosiones y garantizar la seguridad de los procesos como parte del ADN de la formación del ingeniero químico (**Amaya-Gómez, et al., 2019**), el cual incorpora al currículo cuatro módulos educativos sobre la importancia de la seguridad de procesos.

Explosión

Los incendios y las explosiones son eventos estrechamente relacionados, pues es común que un incendio dé lugar a una explosión y que esta, a su vez, provoque un incendio. Los fenómenos que ocurren, en forma general, son similares, ya que involucran reacciones químicas, transferencia de masa, calor y movimiento. Sin embargo, la distancia temporal entre dichos fenómenos es clave, dado que los eventos explosivos suceden en períodos mucho más cortos que los incendios.

La investigación en explosiones involucra muchas áreas: desde el análisis de las formaciones geológicas y la posibilidad de explosiones volcánicas (**Bain, et al., 2018**) hasta la pirotécnica, actividad en la que debe manejarse adecuadamente el almacenamiento para disminuir la incidencia de accidentes (**González-Toloza, et al., 2018**). En la prevención de incendios y explosiones los objetivos son minimizar la posibilidad de que tenga lugar una explosión, predecir su alcance para crear barreras que reduzcan su impacto y hacer estudios forenses sobre eventos ya pasados.

En los artículos publicados por universidades sobre Colombia no es mucha la referencia a la ciencia de las explosiones. Están las simulaciones y experimentos para caracterizar el comportamiento explosivo de mezclas de almidón de trigo y gases de pirólisis en una esfera de 20L (**Pico, et al., 2020b**) o que analizan el efecto de nanopartículas de carbono negro en la gravedad de la explosión de mezclas de gases (**Torrado, 2017**) o las características explosivas de los carbones colombianos (**Fuentes, et al., 2018**; **García-Torrent, et al., 2016**; **Ortega-Ramos, et al., 2018**). En este campo se hace especialmente evidente la ausencia de estudios académicos que exploren áreas como la simulación numérica, la caracterización de sustancias inflamables y la prevención de riesgos.

Otros aspectos

En la revisión se incluyeron estudios en diversas áreas relacionadas con incendios y explosiones, pero hay otros campos que no se exploraron. El análisis de la normatividad colombiana para mitigar incendios y explosiones es uno de ellos. En el 2012 (**Perrin, et al., 2012**) se revisó dicha normativa, específicamente la asociada con la minería, usando la metodología de *Model Analysis of Dysfunctions of the System* (MADS) y el *Method Organized for a Systematic Analysis of Risk* (MOSAR) y se encontró que los decretos vigentes en el momento, aunque claros en las sanciones, no abordaban el tema de la seguridad en la mina

en sus distintas etapas productivas. En ese estudio (Perrin, *et al.*, 2012) se hicieron varias recomendaciones, entre ellas, la de hacer el análisis en el contexto de atmósferas explosivas (directiva ATEX) en minas. La reflexión sobre el entorno regulatorio y su efectividad desde el punto de vista técnico debería ser motivo de constante evaluación por parte de la comunidad técnica en Colombia.

Otro aspecto de gran relevancia en la ingeniería para mitigar incendios y explosiones es el desarrollo del diseño por desempeño como alternativa frente al más tradicional diseño prescriptivo que ha acompañado la regulación sobre incendios y explosiones. La ingeniería para la seguridad contra incendios se enfrenta actualmente a la necesidad de incorporar las múltiples ventajas que otorga el diseño por desempeño (Cadena & Muñoz, 2013), por ejemplo, mediante el análisis de las particularidades de cada caso pero manteniendo el mismo nivel de seguridad.

Otra área de estudio es el análisis de las diferentes industrias colombianas y su viabilidad en la mitigación de incendios y explosiones a la luz de la tecnología actual. En la industria minera, por ejemplo, algunos autores (Salamanca, *et al.*, 2017) han destacado la importancia de la modernización para disminuir la incidencia de accidentes con consecuencias fatales.

Recomendaciones para la construcción de una estructura de educación enfocada en la seguridad contra incendios y explosiones

El diagnóstico presentado busca sentar las bases para la construcción de un ambiente académico que permita que en Colombia se puedan enfrentar los retos asociados con incendios y explosiones. Se debe reconocer, sin embargo, que fortalecer el entorno de investigación y de educación en este campo es una de las múltiples aristas que plantea el problema. Los entes reguladores, el compromiso de la industria con la seguridad, la salud ocupacional, la preparación y la dotación de los entes que atienden las emergencias y la educación y capacitación de los operadores, también hacen parte de este esfuerzo.

Programas curriculares

En la revisión solo se encontró un programa de posgrado directamente relacionado con el estudio de la ingeniería y su aplicación en incendios y explosiones. El desarrollo de industrias como la minera y la química, y los retos que el efecto invernadero impone en el desarrollo forestal demandan programas de pregrado y posgrado (Magnusson, *et al.*, 1995) que capaciten a los ingenieros en temas como el diseño por desempeño y su integración con el más tradicional diseño prescriptivo, la dinámica de incendios, la aplicación de herramientas de simulación en el análisis de riesgos por incendios o explosiones, las herramientas necesarias para investigación de accidentes, y el desarrollo de materiales y equipos que resistan incendios y explosiones o que las eviten. Estos múltiples temas deben estudiarse a nivel de posgrado y orientar proyectos de investigación que estudien su aplicación en Colombia.

Tales programas de educación deben soportarse en estrategias pedagógicas especialmente diseñadas para profesionales que trabajan en seguridad contra incendios y explosiones y no solo centrarse en el desarrollo del conocimiento básico, de manera que también se desarrollen competencias y habilidades (Woodrow, *et al.*, 2013) que permitan mejores diseños de seguridad contra incendios y explosiones. A la aproximación tradicional del especialista, deben agregarse estrategias que fortalezcan la autonomía de los estudiantes y permitan un mayor nivel de comprensión de los conceptos básicos (Woodrow, 2013; Woodrow, *et al.*, 2020).

En este sentido, nuestro equipo ha aplicado estrategias que generan autonomía entre el personal profesional dedicado a apoyar la prevención y la atención de emergencias en la industria minera en Colombia mediante cursos de posgrado y diplomados. En la **figura 1** se muestra el efecto de la velocidad de ventilación según lo predice el FDS en el desplazamiento de la capa de humo en un incendio cuando existe una barrera. En el curso

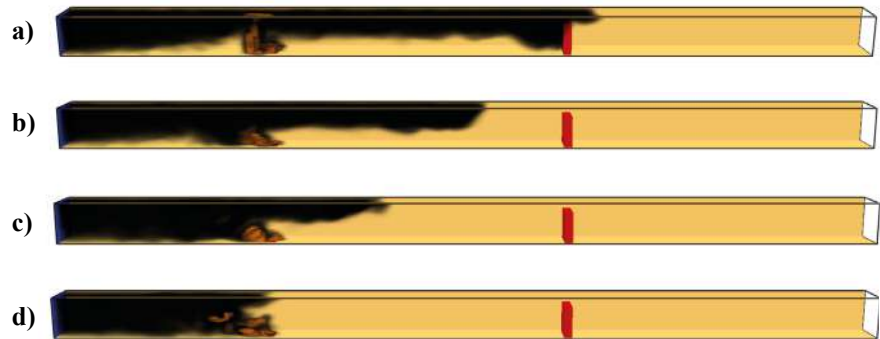


Figura 1. Simulación mediante FDS del efecto del viento y de una barrera de protección en una galería de una mina cuando se varía la velocidad del viento: **a)** 0,5 m/s, **b)** 1,0 m/s, **c)** 1,5 m/s y **d)** 2,0 m/s

se pide a los estudiantes que propongan una velocidad de ventilación para evitar que el humo logre llegar a un equipo socorrista. Aunque la reglamentación colombiana exige que en condiciones normales la velocidad del aire sea de 0,5 m/s, valor que normalmente escogen los estudiantes, la simulación muestra que bajo condiciones de un incendio este valor es muy bajo, incluso en la presencia de una barrera de protección. Este tipo de ejercicios fomenta la autonomía del alumno para buscar soluciones e ilustra la importancia del manejo del humo en el caso de un incendio. En cursos avanzados se explora el efecto del tamaño de la barrera, su ubicación y cómo altera el tipo de combustible el resultado de la simulación.

En estos cursos se usaron también herramientas más fundamentales de simulación, como la de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*), o el programa Ansys Fluent (ANSYS, 2021), para presentar ejemplos de explosiones. Si bien la simulación de explosiones para obtener predicciones cuantitativas válidas es algo bastante complejo (Oran, 2015), su utilización con fines pedagógicos surte efecto, por ejemplo, para simular la presencia de polvo de carbón al aumentar la magnitud la velocidad de la onda explosiva originada inicialmente por la acumulación de gas metano. En este caso los estudiantes deben predecir hasta qué punto avanza la explosión si el gas metano solo se encuentra en una de las galerías pero hay una cantidad importante de polvo de carbón acumulado. La **figura 2** muestra la representación física de las galerías, donde solo la región que simula el frente de la explosión tiene una concentración de metano (6 % v) en el límite de inflamabilidad. Sin embargo, toda la mina presenta una concentración de polvo de carbón de 100 g/m³, un diámetro de partícula de 40 μm y propiedades típicas del carbón bituminoso. Aun cuando la velocidad del aire a lo largo de la mina cumple con la norma (0,5 m/s), la presencia de polvo de carbón en la mina hace que todas las galerías se vean afectadas por un rápido fenómeno explosivo. Al resolver el problema, algunos estudiantes consideran suficiente la ventilación como estrategia para evitar la propagación de la onda explosiva y no dimensionan el efecto del polvo de carbón en el resultado hasta después de la simulación.

Aunque la evaluación de los cursos fue buena, pues el 87 % de los alumnos lo calificó con 4 o más en una escala de 5 (67 %: 5 y 21 %: 4), se encontró que una de las principales dificultades fue el manejo de la herramienta de representación física, pues exigía mucho detalle, tanto en la solución como en la implementación del caso de estudio, lo cual comprometió el proceso de aprendizaje. Actualmente nuestros grupos de investigación están desarrollando un proyecto de investigación como parte de la iniciativa *Transforming Systems through Partnership* de la *Royal Academy of Engineering* que busca mejorar la integración del *software* a la enseñanza sobre seguridad contra incendios y explosiones. Una de las preguntas que este proyecto debe resolver es cuál es la mejor

herramienta computacional para enseñar la forma de integrar conceptos avanzados como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en el control de incendios y explosiones (Xi, *et al.*, 2021).

Equipos de laboratorio

En la revisión de los antecedentes de investigación en Colombia resultó evidente que existe poca infraestructura para caracterizar las propiedades de las sustancias inflamables, sus características explosivas y, en general, el estudio de la dinámica de incendios o la magnitud de una explosión.

Una estructura de investigación y educación que apoye la prevención de incendios y explosiones debe estar soportada por equipos de laboratorio. Para explosiones se destaca el tubo Hartmann, el test de la esfera de 20 L o de 1 m³ y el horno Godbert-Greenland. En cuanto a los incendios, son claves (Berlied, *et al.*, 2010) equipos como el calorímetro de cono, la prueba de un solo artículo en llamas (*Single Burning Item test*, SBI), el análisis de propagación de llama radiante, el panel radiante, los equipos de inflamabilidad horizontal y vertical y el detector de densidad de humo.

En colaboración con la industria colombiana, los autores de este artículo han desarrollado instrumentos para hacer mediciones claves con el fin de caracterizar las propiedades inflamables y explosivas de sustancias, entre ellas, la temperatura de ignición en nube y en capa y la energía mínima de ignición, así como un equipo que demuestra el efecto del polvo de carbón en la intensidad de los procesos explosivos. Más allá del uso obvio de estos equipos en la caracterización de diferentes sustancias, es importante su integración en la educación contra incendios y explosiones. El desarrollo del diseño por desempeño exige contar con equipos para los análisis cualitativo y cuantitativo de las propiedades inflamables de distintos materiales (Berlied, *et al.*, 2010).

Investigación en ciencia básica

A pesar del marcado carácter aplicado de la prevención de incendios y explosiones, es muy importante el desarrollo de investigación en ciencias básicas que acompañe ese esfuerzo. Algunos temas importantes son el estudio de las estructuras poliméricas y cómo pueden modificarse para disminuir la posibilidad de incendio; la cinética química asociada con todos los procesos en incendios y explosiones, desde la ignición y propagación de llama hasta el desarrollo de la onda explosiva; la formación de hollín y humo, y la resistencia de materiales ante condiciones extremas. Se requieren modelos que permitan simular los diferentes aspectos del incendio o la explosión y el desarrollo de algoritmos matemáticos y

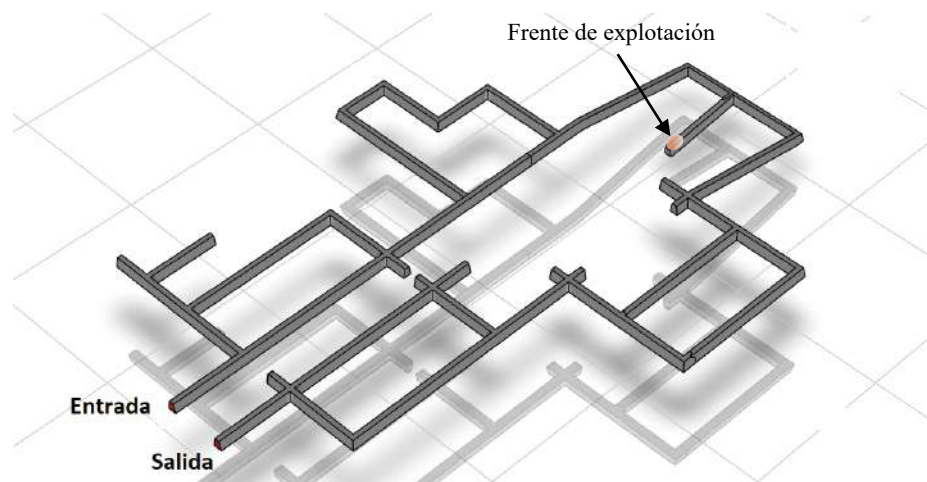


Figura 2. Representación física de la mina donde se registra una explosión. La sección transversal tiene una altura de 1,8 m y el largo es de 120 m.

de herramientas computacionales que logren resultados en los tiempos propios de quienes diseñan para evitar y controlar un incendio, para quienes atienden una emergencia o para quienes realizan los análisis forenses.

Desarrollo de habilidades de computación

A lo largo de este artículo se mencionaron diferentes herramientas de simulación física que se usan en la seguridad contra incendios y explosiones. La aplicación de sistemas de simulación física al estudio de la ciencia de incendios y explosiones es un tema con alto potencial en Colombia. Se deben desarrollar habilidades técnicas y profesionales en el manejo de herramientas como el FDS (**McGrattan, et al., 2021**), el M-Fire (**Centers for Disease Control and Prevention- CDC, 2021**), el FireFoam (**WiKi, 2021**), el PHAST (**DNV, 2021**), el FLACS, SafeSite3G o el BWTI (**BakerRisk, 2018 a,b**), así como fomentar la investigación que permita mejorar el desempeño de estos y otros programas más orientados al campo académico, como el FireFoam, y ajustarlos a las necesidades del entorno colombiano.

Una característica bastante interesante de las herramientas de simulación física de incendios es su carácter de código abierto, lo que significa que su uso y desarrollo depende en gran medida de las habilidades de quienes las aplican. Una segunda característica es que algunas de sus aplicaciones demandan un alto costo computacional. Es importante, entonces, que se aumente la aplicación de herramientas como el FDS (**McGrattan, et al., 2021**), el M-Fire (**Centers for Disease Control and Prevention-CDC, 2021**) y el FireFoam (**WiKi, 2021**) en el estudio de incendios específicamente en Colombia. El análisis de las explosiones, principalmente en lo referente a sus posibles efectos y la mitigación de los riesgos, también debe apoyarse en el uso de herramientas de simulación como el FLACS (**GexCon US, 2019**), el SafeSite3G o el BWTI (**BakerRisk, 2018 a,b**). Esto implica una mayor capacitación de los usuarios de dichas herramientas, así como su desarrollo para la resolución de los problemas específicos asociados con incendios y explosiones en Colombia. La potencial incorporación, por ejemplo, de conceptos como inteligencia artificial y aprendizaje automático a las capacidades predictivas de estos programas, tanto en el diseño como en la atención de desastres, es una línea de investigación en auge a nivel mundial (**Xi, et al., 2021**) que debe explorarse en Colombia.

Conclusiones

Al analizar el estado actual del entorno académico que soporta o puede soportar las estrategias de prevención de accidentes por incendios y explosiones resulta evidente que, aunque hay un amplio desarrollo en salud ocupacional, en la ciencia e ingeniería asociadas el desarrollo es incipiente. Entre las diferentes áreas que se consideraron de importancia para la prevención de incendios y explosiones, se encontró una actividad académica importante en lo concerniente al análisis de la combustión y la pirólisis, pero con una orientación industrial. El desarrollo en esas áreas, conjuntamente con lo aprendido en la cinética química y la radiación térmica, debe respaldar cualquier iniciativa de desarrollo de una estructura de investigación en este campo. La aplicación de los análisis estadísticos, la caracterización fisicoquímica de sustancias inflamables, los análisis de los procesos de smouldering, formación de hollín y humo, la caracterización experimental de los fenómenos de ignición y explosivos, la evaluación de riesgos, la educación de los profesionales y las particularidades de las explosiones son aspectos que exigen mayor desarrollo si se quiere incentivar la investigación y la educación en este campo.

Debe fortalecerse el desarrollo de programas curriculares centrados en los temas de ingeniería relevantes para incendios y explosiones, así como la capacidad para caracterizar las propiedades inflamables de distintos materiales, particularmente de aquellos extraídos, procesados o producidos en Colombia, y la biomasa con potencial para generar incendios forestales. Todo desarrollo en investigación y educación destinado a la aplicación, debe acompañarse del desarrollo de la ciencia básica, y esta no es la excepción. La investigación de los fenómenos de cinética química, *smouldering*, formación de hollín y humo y resistencia

de materiales en condiciones extremas son muy importantes en las estrategias para evitar y controlar incendios y explosiones. El desarrollo de submodelos que permitan simular la dinámica del incendio, la dispersión de la capa de humo y la emanación de gases tóxicos, así como la interacción de los agentes supresores de llama, los fenómenos de pirólisis y el *smouldering* en las condiciones atmosféricas de Colombia y en los materiales típicos de nuestro país, hacen parte de este enfoque en ciencia básica. Asimismo, son necesarios algoritmos matemáticos y herramientas de computación que permitan la solución de problemas tan complejos por su variabilidad en escalas y tiempos como un incendio o una explosión.

Una forma de garantizar que el desarrollo de la ciencia básica en esta área redunde en la prevención de incendios y explosiones es el avance en el área de la simulación. A la apropiación de las herramientas de representación física actualmente disponibles, la mayoría de código abierto, se deben sumar esfuerzos para su desarrollo ajustado a las condiciones específicas de Colombia. Asimismo, deben incorporarse las herramientas de inteligencia artificial y aprendizaje automático.

Agradecimientos

Se reconoce el apoyo financiero recibido de la Agencia Nacional de Minería y la Universidad Nacional de Colombia a través del convenio Interadministrativo Específico 002 de 2020 en el marco del proyecto “Formulación de centro de investigación enfocado en el estudio de incendios y atmósferas explosivas en Colombia” y por la Royal Academy of Engineering mediante el programa “Engineering X Transforming Systems through Partnership 20/21programme”, proyecto “Training for the prevention of fires and explosions through the use of data analysis and simulation.”

Información suplementaria

Tabla 1S. Ejemplo de estudios relacionados con accidentes causados por incendios y explosiones en diferentes industrias. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 2S. Centros de investigación cuyo interés principal es la prevención de accidentes por incendios y explosiones^a. Ver tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 3S. Programas de posgrado exclusivamente diseñados para mejorar la seguridad contra incendios y explosiones. Ver tabla 3S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 4S. Programas de posgrado e investigaciones relacionados con la parte académica (no gerencial) de la salud ocupacional y seguridad en el trabajo en diferentes instituciones académicas colombianas. Ver tabla 4S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 5S. Investigaciones y programas de posgrados en Colombia que están relacionados con la ciencia e ingeniería de incendios y explosiones. Ver tabla 5S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 6S. Ejemplos de resumen de estadísticas de incendios y explosiones en algunos países y de estudios que las analizan. Ver tabla 6S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 7S. Estudios realizados por investigadores asociados con Colombia que incluyen la caracterización de diferentes sustancias inflamables. Ver tabla 7S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 8S. Estudios relacionados con la cinética química en procesos que involucran sustancias combustibles que han sido estudiados por investigadores en Colombia. Ver tabla 8S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 9S. Investigaciones relacionadas con la combustión realizadas por investigadores colombianos. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 10S. Artículos en los cuales se aplican modelos de representación física a temas cercanos a los incendios como la combustión y la pirólisis como aplicación industrial. Ver tabla 10S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 11S. Trabajos de pregrado relacionados con simulación de incendios y explosiones. Ver tabla 11S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 12S. Investigaciones que involucran el tema radiación térmica relacionadas con investigadores colombianos. Ver tabla 12S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 13S. Artículos relacionados con pirólisis, smoldering y la formación de hollín realizados por investigadores asociados con Colombia. Ver tabla 13S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 14S. Investigación en análisis de riesgos que se presenta por parte de investigadores asociados con Colombia. Ver tabla 14S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 15S. Investigaciones relacionadas con la aplicación de estrategias pedagógicas en el área de ingeniería. Ver tabla 15S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Contribución de los autores

AM preparó el texto final con base en una revisión general de la literatura la cual contó con el aporte de JMM, AB y LJ en los temas de análisis estadístico, caracterización fisicoquímica de sustancias inflamables, caracterización experimental y explosión; de HC en el área de combustión y caracterización experimental; y de DS y SL en el área de simulación. SL y DS desarrollaron las simulaciones en CFD y FDS.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no conocen ningún conflicto de intereses relevante.

Referencias

- Abecassis-Empis, C., Reszka, P., Steinhaus, T., Cowlard, A., Biteau, H., Welch, S., Rein, G., Torero, J. L.** (2008). Characterisation of Dalmarnock fire Test One. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **32** (7): 1334-1343.
- Aguirre, J., Ordóñez, A., Ordóñez, H.** (2017). Low-Cost Fire Alarm System Supported on the Internet of Things. *Advances in Computing*, p. 257-266.
- Aldana, M. C. del R. & Navarrete, N.** (2015). Epidemiology of a decade of Pediatric fatal burns in Colombia, South America. *Burns: Journal of the International Society for Burn Injuries.*, **41** (7): 1587-1592.
- Amaya-Gómez, R., Dumar, V., Sánchez-Silva, M., Romero, R., Arbeláez, C., Muñoz, F.** (2019). Process safety part of the engineering education DNA. *Education for Chemical Engineers*. **27**: 43-53.
- ANSYS.** (2021). Ansys - Fluent. ANSYS. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- Armenteras-Pascual, D., Retana-Alumbreros, J., Molowny-Horas, R., Román-Cuesta, R. M., González-Alonso, F., Morales-Rivas, M.** (2011). Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*. **151** (3): 279-289.
- Bain, A. A., Calder, E. S., Cortés, J. A., Cortés, G. P., Loughlin, S. C.** (2018). Textural and geochemical constraints on andesitic plug emplacement prior to the 2004–2010 vulcanian explosions at Galeras volcano, Colombia. *Bulletin of Volcanology*. **81** (1): 1.
- BakerRisk.** (2018a). SafeSite3G©. BakerRisk. <https://www.bakerrisk.com/products/software-tools/safesite/>
- BakerRisk.** (2018b). Computational Fluid Dynamics - BakerRisk. BakerRisk. <https://www.bakerrisk.com/services/consequence-risk-analysis/computational-fluid-dynamics/>
- Berlied, M., Fajardo, E., Mackenzie, A., Tuttle, C.** (2010). Designing a fire-testing laboratory for the University of Costa Rica. Worcester Polytechnic Institute. https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121410-215156/unrestricted/Bomberos_2010IQP_Final_Report.pdf

- Bustamante-Rúa, M. O., Daza-Aragón, A. J., Bustamante-Baena, P.** (2019). A study of fire propagation in coal seam with numerical simulation of heat transfer and chemical reaction rate in mining field. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **29** (6): 873-879.
- Bustamante-Rúa, M. O., Daza-Aragón, A. J., Bustamante-Baena, P., Osorio-Botero, J. D.** (2019). Determinación de la influencia del sodio superficial en la susceptibilidad de los mantos de carbón a combustión espontánea en una mina a cielo abierto. *Investigación e Innovación en Ingenierías*. **7** (1): 60-71.
- Bustamante-Rúa, M. O., Daza-Aragón, A. J., Bustamante-Baena, P., Osorio-Botero, J. D.** (2019). Statistical analysis to establish an ignition scenario based on extrinsic and intrinsic variables of coal seams that affect spontaneous combustion. *International Journal of Mining Science and Technology*. **29** (5): 731-737.
- Cadena, J. E. & Muñoz, F. G.** (2013). The Link between Fire Research and Process Safety: An Evolution from Specific Needs to General Concern. *Chemical Engineering Transactions*. **31**: 679-684.
- Castro-Marín, W. & Martínez-G, C. P.** (1997). Spontaneous combustion in coal massif. *Dyna*. **123**: 43-50.
- Centers for Disease Control and Prevention- CDC.** (2021). MFIRE 4.0 Enhances Fire Modeling Capabilities. CDC. <https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/MFIRETechNews.html>
- COMSOL INC.** (2021). COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. COMSOL. <https://www.comsol.com/>
- DNV.** (2021). Process hazard analysis software - Phast - DNV. DNV. <https://www.dnv.com/software/services/phast/index.html>
- Drysdale, D.** (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley. West Sussex, Reino Unido.
- Faraday, M.** (1861). *A Course of Six Lectures on the Chemical History of a Candle: To which is Added a Lecture on Platinum*. Harper & Brothers. New York, EE.UU.
- Fuentes, R., Molina, J., Blandón, A.** (2018). Explosive Parameters for Coal Samples (Antioquia, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. **17** (33): 19-38.
- García-Torrent, J., Fernández-Añez, N., Medic-Pejic, L., Blandón-Montes, A., Molina-Escobar, J. M.** (2016). Ignition and explosion parameters of Colombian coals. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. **43**: 706-713.
- Garzón-Serrano, A. Y., Sierra, C. A., Rodríguez-Bejarano, O., Sinuco, D.** (2020). Volatile Organic Compounds, Spectral Characterization and Morphology of Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) Samples. *Journal of Forensic Sciences*. **65** (4): 1085-1093.
- Gavelli, F.** (2021). The effect of barriers on reducing thermal heat fluxes from a hydrocarbon pool fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. **72**: 104554.
- GexCon US.** (2019). Flacs Software Modules. GexCon Us. <https://www.gexcon.com/us/products-services/FLACS-Software-Modules/25/en>
- Gheorghe, G. C.** (2020). Emergencias mineras mortales en Colombia (2005-2020): investigación con modelo jerárquico de causalidad de 100 eventos. Idrovo Velandia, Alvaro Javier Hernández Herrera, Gilma Norela (eds.) *Maestría en Salud Ocupacional y Ambiental*, Universidad del Rosario. <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/30813>
- Gheorghe, G. C., Manrique-Hernández, E. F., Idrovo, A. J.** (2021). Injuries and fatalities in Colombian mining emergencies (2005 - 2018). medRxiv. 2021.04.04.21254888.
- González-Tolosa, N. E., Blandón-Rodríguez, A. M., Díaz-Gómez, A. del P., Marcela-Huguett, C., Buitrago-Puentes, A., Forero-González, M. L., Casallas-Bedoya, V. E., Sanabria-Merchán, Y. A., Quijada-Bonilla, H., Prieto-Alvarado, F. E., et al.** (2018). Results of the intensified surveillance of injuries caused by pyrotechnic powder. Colombia, 1 December 2017-13 January 2018. *Informe Quincenal-Epidemiológico Nacional*. **23** (5): 48-58.
- Gutiérrez, G. A., Cotes, D. A., Bastidas, M. J.** (2018). Estudio de la Combustión Espontánea del Carbón durante el Acopio en la Mina El Hatillo, ubicada en Cesar, Colombia. *Información Tecnológica*. **29** (6): 287-294.
- Llamas, I., Wolfschoon, A., Rodríguez-Reyes, R. E.** (2007). Incendio de un tubo endotraqueal durante traqueostomía. *Colombian journal of anesthesiology*. **35** (1): 75-77.
- Magnusson, S. E., Drysdale, D. D., Fitzgerald, R. W., Motevalli, V., Mowrer, F., Quintiere, J., Williamson, R. B., Zalosh, R. G.** (1995). A Proposal for a Model Curriculum in Fire Safety Engineering. *Fire Safety Journal*. **1** (25): 1-88.
- Majdalani, A. H., Cadena, J. E., Cowlard, A., Muñoz, F., Torero, J. L.** (2016). Experimental characterisation of two fully-developed enclosure fire regimes. *Fire Safety Journal*. **79**: 10-19.

- Mariño, O., Muñoz, F., Jahn, W.** (2020). Soot production modelling for operational computational fluid dynamics fire simulations. *Journal of Fire Sciences*. **38** (3): 284-308.
- Mariño-Sánchez, O. A.** (2016). Implementación de modelos de producción hollín para simulaciones de incendio en FDS. F. Muñoz Giraldo, P. Ortiz, & O. D. López Mejía (eds.) *Chemical engineering*, Uniandes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13253>
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M.** (2021, May). FDS-SMV. FDS-SMV Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV). <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- Mena, J., Vera, S., Correal, J. F., López, M.** (2012). Assessment of fire reaction and fire resistance of *Guadua angustifolia* Kunth bamboo. *Construction and Building Materials*. **27**(1): 60-65.
- Michelsen, H. A.** (2017). Probing soot formation, chemical and physical evolution, and oxidation: A review of in situ diagnostic techniques and needs. *Proceedings of the Combustion Institute*. **36** (1): 717-735.
- Miranda, D., Betancur, A. M., Gutiérrez, G.** (2003). Master Plans, a New Approach for Contingency Planning in the Colombian Oil Industry. *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2003 (1): 1189-1198.
- Molina, A., Schefer, R. W., Houf, W. G.** (2007). Radiative fraction and optical thickness in large-scale hydrogen-jet fires. *Proceedings of the Combustion Institute*. **31** (2): 2565-2572.
- Moreno-Sader, K., Alarcón-Suesca, C., González-Delgado, A. D.** (2020). Application of environmental and hazard assessment methodologies towards the sustainable production of crude palm oil in North-Colombia. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. **15**: 100221.
- Moya-Forero, D. S.** (2013). Numerical study on the interaction of sprinklers and heat vents. B. Merci (ed.) *International Master of Science in Fire Safety Engineering*, Ghent University. <http://www.cervantesvirtual.com/obra/numerical-study-on-the-interaction-of-sprinklers-and-heat-vents-858647>
- Murillo, C., Amín, M., Bardin-Monnier, N., Muñoz, F., Pinilla, A., Ratkovich, N., Torrado, D., Vizcaya, D., Dufaud, O.** (2018). Proposal of a new injection nozzle to improve the experimental reproducibility of dust explosion tests. *Powder Technology*. **328**: 54-74.
- Murillo, C., Bardin-Monnier, N., Blanchard, C., Funfschilling, D., Muñoz-Giraldo, F., Ratkovich, N., Vizcaya, D., Dufaud, O.** (2016). CFD to improve the repeatability and accuracy of dust explosion tests in the 20-liters sphere. *Chemical Engineering Transactions*. **48**: 115-120.
- Murillo, C., Dufaud, O., Bardin-Monnier, N., López, O., Muñoz, F., Perrin, L.** (2013). Dust explosions: CFD modeling as a tool to characterize the relevant parameters of the dust dispersion. *Chemical Engineering Science*. **104**: 103-116.
- Navarrete, N. & Rodríguez, N.** (2016). Epidemiologic characteristics of death by burn injury from 2000 to 2009 in Colombia, South America: a population-based study. *Burns & Trauma*. **4**: 8.
- Oran, E. S.** (2015). Understanding explosions – From catastrophic accidents to creation of the universe. *Proceedings of the Combustion Institute*. **35** (1): 1-35.
- Ortega-Ramos, C. A., Franco-Bonfante, T. M., Blandón-Montes, A., Molina-Escobar, J. M.** (2018). Evaluación del riesgo de explosividad del gas metano en minería subterránea de carbón, caso de la cuenca del Sinifaná, Colombia. *Revista Boletín de Geología*. **40** (1): 83-91.
- Perrin, L., Muñoz-Giraldo, F., Dufaud, O., Laurent, A.** (2012). Normative barriers improvement through the MADS/MOSAR methodology. *Safety Science*. **50** (7): 1502-1512.
- Pico, P., Ratkovich, N., Muñoz, F., Dufaud, O.** (2020a). CFD-DPM and experimental study of the dynamics of wheat starch powder/pyrolysis gases hybrid mixtures in the 20-L Sphere. *Powder Technology*. **372**: 638-658.
- Pico, P., Ratkovich, N., Muñoz, F., Dufaud, O.** (2020b). Analysis of the explosion behaviour of wheat starch/pyrolysis gases hybrid mixtures through experimentation and CFD-DPM simulations. *Powder Technology*. **374**: 330-347.
- Pinilla, A., Amín, M., Murillo, C., Torrado, D., Bardin-Monnier, N., Muñoz, F., Dufaud, O.** (2019). CFD Study of the Dust Dispersion in the 20L Explosion Sphere: Influence of the Nozzle Design. *Chemical Engineering Transactions*. **77**: 121-126.
- Prichard, S., Larkin, N. S., Ottmar, R., French, N. H. F., Baker, K., Brown, T., Clements, C., Dickinson, M., Hudak, A., Kochanski, A., Linn, R., Liu, Y., Potter, B., Mell, W., Tanzer, D., Urbanski, S., Watts, A.** (2019). The Fire and Smoke Model Evaluation Experiment-A Plan for Integrated, Large Fire-Atmosphere Field Campaigns. *Atmosphere*. **10** (2): 66.
- Ramírez-Camacho, J. G., Pastor, E., Casal, J., Amaya-Gómez, R., Muñoz-Giraldo, F.** (2015). Analysis of domino effect in pipelines. *Journal of Hazardous Materials*. **298**: 210-220.

- Ramírez-Rosas, C. H. & González-Sierra, M. A.** (2016). Diagnóstico de la accidentalidad en la pequeña y mediana minería subterránea de la provincia del Sugamuxi. L. A. Lara-González & Y. B. Benavides-Infante (eds.) Escuela de Ingeniería de Minas. <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1610/1/TGT-345.pdf>
- Romero-Ruiz, M. H.** (2011). Influence of land use, climate and topography on the fire regime in the Eastern Savannas of Colombia. K. Tansey & J. C. Berrio (eds.) University of Leicester. https://leicester.figshare.com/articles/thesis/Influence_of_land_use_climate_and_topography_on_the_fire_regime_in_the_Eastern_Savannas_of_Colombia/10102670/1
- Salamanca, J., Rodríguez, H., Fernández, A., Nino-Merchan, J. J., Rojas, V.** (2017). Modernisation of the underground coal mining sector in Colombia – a proposal from the academy. Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology. First International Conference on Underground Mining Technology. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1710_42_salamanca
- Sapko, M. J., Weiss, E. S., Cashdollar, K. L., Zlochower, I. A.** (2000). Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. **13** (3): 229-242.
- Sedano, C. A., López, O. D., Ladino, A., Muñoz, F.** (2017). Prediction of a Small-Scale Pool Fire with FireFoam. *International Journal of Chemical Engineering*. Vol. 2017, 12 pag. Doi: 10.1155/2017/4934956
- Serrano, J., Pico, P., Amín, M., Pinilla, A., Torrado, D.** (2020). Experimental and CFD-DEM study of the dispersion and combustion of wheat starch and carbon-black particles during the standard 20L sphere test. *Journal of Loss*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423019305662>
- Sierra, C., Pérez, L. D., Garzón, A., Sinuco, D., Hinestroza, J. P.** (2020). Detección de minas antipersonal que contienen explosivos tipo ANFO: una revisión. *Revista Colombiana de Química*. **49** (3): 47-57.
- Torrado, D.** (2017). Effect of carbon black nanoparticles on the explosion severity of gas mixtures. Université de Lorraine, Nancy, France (PhD Thesis). http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2017_0199_TORRADO.pdf
- Verbeek, A., Debackere, K., Luwel, M., Zimmermann, E.** (2002). Measuring progress and evolution in science and technology – I: The multiple uses of bibliometric indicators. *International Journal of Management Reviews*. **4** (2): 179-211.
- Vignes, A., Muñoz, F., Bouillard, J., Dufaud, O., Perrin, L., Laurent, A., Thomas, D.** (2012). Risk assessment of the ignitability and explosivity of aluminum nanopowders. *Process Safety and Environmental Protection*. **90** (4): 304-310.
- Vizcaya, D., Pinilla, A., Amín, M., Ratkovich, N., Muñoz, F., Murillo, C., Bardin-Monnier, N., Dufaud, O.** (2018). CFD as an approach to understand flammable dust 20 L standard test: Effect of the ignition time on the fluid flow. *AIChE Journal*. **64** (1): 42-54.
- Wiki.** (2021, April). FireFoam - OpenFOAMWiki. Transient Solver for Fires and Turbulent Diffusion Flames with Reacting Particle Clouds, Surface Film and Pyrolysis Modelling. <https://openfoamwiki.net/index.php/FireFoam>
- William, C. M. & Martínez G, C. P.** (1998). Potential risk of explosions of combustible powder in underground mines of coal. *Dyna*. **124**: 37-53.
- Woodrow, M.** (2013). Educating engineers for a holistic approach to fire safety. J. Torero (ed.) The University of Edinburgh. <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/8224>
- Woodrow, M., Bisby, L., Torero, J. L.** (2013). A nascent educational framework for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*. **58**: 180-194. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711213000374>
- Woodrow, M., Gillen, A. L., Woodrow, R., Torero, J.** (2020). Investigating Varied Pedagogical Approaches for Problem-Based Learning in a Fire Safety Engineering Course. *International Journal of Engineering Education*. **36** (5): 1605-1614.
- Xi, X., Torero, J. L., Jahn, W.** (2021). Data driven forecast of droplet combustion. Proceedings of the Combustion Institute. **38** (3): 4785-4793.
- Zhang, W., Olenick, S. M., Klassen, M. S., Carpenter, D. J., Roby, R. J., Torero, J. L.** (2008). A smoke detector activation algorithm for large eddy simulation fire modeling. *Fire Safety Journal*. **43** (2): 96-107.

Artículo de revisión

Encriptación de información mediante procesamiento óptico

Information encryption using optical processing

 John Fredy Barrera-Ramírez

Grupo de Óptica y Fotónica, Instituto de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Artículo de posesión como miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

En esta contribución se discuten los avances más significativos en el campo de la encriptación de información mediante procesamiento óptico con énfasis en los adelantos en la reducción y la eliminación del ruido. Se hace la descripción teórica de un sistema de encriptación compacto y se presentan los resultados de su implementación experimental. Además, se demuestra que la inclusión de contenedores de información personalizados permite la protección de la información y su recuperación libre de ruido, evidenciando el potencial del sistema de seguridad compacto. Por último, se presentan las perspectivas en el área de investigación.

Palabras clave: Encriptación de información; Procesamiento óptico; Protección de datos; Recuperación libre de ruido.

Abstract

In this contribution, the most significant advances in the area of information encryption using optical processing are discussed with an emphasis on advances in noise reduction and elimination. The theoretical description of a compact encryption system and the results of its experimental implementation are presented. Additionally, the inclusion of personalized information containers to protect information and retrieve it free of noise is also explained evidencing the potential of the compact security system. Finally, the perspectives of the research area are presented.

Keywords: Information encryption; Optical processing; Data protection; Noise-free retrieval.

Introducción

El estudio de las propiedades de la luz y de la forma en que puede manipularse la información mediante su uso es una de las áreas de investigación con grandes avances en los últimos años, impulsados por el gran interés científico que suscita y por sus aplicaciones tecnológicas que han permitido mejorar la calidad de vida de la sociedad actual y que, según las previsiones, ayudará a solucionar algunos de los problemas tecnológicos, sociales, económicos y ambientales avizorados para los próximos años. El avance en esta área ha tenido un impacto notable en temas como las energías nuevas y renovables, el desarrollo sostenible, la innovación industrial, la salud y la seguridad, entre otros. En cuanto al manejo seguro de la información específicamente, ha habido un desarrollo significativo de los protocolos y sistemas que garantizan la protección de la privacidad y los recursos de los ciudadanos, instituciones y empresas, lo que es de gran importancia dada la creciente cantidad de información privada que se intercambia.

Conforme aumenta el uso de los sistemas digitales y electrónicos en diversos ámbitos, también se han incrementado los crímenes relacionados. Solo en el 2017, los distintos tipos de ‘cibercrímenes’ representaron el 15 % de todos los delitos cometidos contra compañías en Colombia, generando un daño económico cercano a los 600 millones de

Citación: Barrera-Ramírez JF.
Encriptación de información
mediante procesamiento óptico.
Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis.
Nat. 46(178):68-89, enero-marzo de
2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1597>

Editor: Román Eduardo Castañeda-
Sepúlveda

Correspondencia:
John Fredy Barrera Ramírez;
john.barrera@udea.edu.co

Recibido: 11 de noviembre de 2021

Aceptado: 14 de marzo de 2022

Publicado: 23 de marzo de 2022



Este artículo está bajo una licencia de
Creative Commons Reconocimiento-
NoComercial-Compartir Igual 4.0
Internacional

dólares (Hernández, *et al.*, 2018). Con el objetivo de evitarlos, en el primer trimestre del 2020 la inversión total en ciberseguridad en Colombia alcanzó los 10.400 millones de dólares (Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas-ACIS, 2020) y es previsible que, a medida que aumente la actividad económica relacionada con los servicios digitales, mayor será el incentivo de los criminales para atacar las entidades que los proveen. Dada la necesidad de protección contra este tipo de crímenes, en los próximos años el mercado de la protección de datos resulta prometedor. En este sentido, vale la pena mencionar que el mercado del *software* de encriptación global en el 2020 se valoró en 8.49 billones de dólares y se proyecta que alcance los 59.5 billones de dólares en el 2028, con un incremento anual compuesto del 27,57 % entre el 2021 y 2028 (Verified Market Research-VMR, 2021).

Entre los principales sectores de aplicación de los sistemas de protección de información se pueden mencionar el financiero y el bancario, por su interés en la custodia de la información y las transacciones; el sector de la salud, por la necesidad de garantizar la seguridad de las imágenes de uso médico como las tomografías computarizadas, las imágenes de resonancia magnética o por ultrasonido y las tomografías de emisión de positrones, con el fin de ofrecer a los pacientes la confidencialidad, la integridad y la autenticación necesarias (Lima, *et al.*, 2015); el sector industrial y comercial, por las aplicaciones en tecnologías de autenticación de productos y contra las falsificaciones (hologramas, impresión de seguridad, etiquetas de seguridad, biometría, y mecanismos de identificación de productos originales, entre otros) mediante la detección óptica y la identificación de características de seguridad (Kwok, *et al.*, 2010); en el área de los bienes de lujo, por la necesidad de tecnologías de autenticación de bienes de alto valor y contra las falsificaciones (Jiao, *et al.*, 2019; Ting, *et al.*, 2013); en el sector gubernamental, por los requerimientos de mecanismos de seguridad para los programas del gobierno en la nube (pasaportes, información privada de los ciudadanos, registradurías y notarías, y aplicaciones, registros, e imágenes de terrenos y propiedades, entre otros); en la industria del entretenimiento para la adición de imágenes encriptadas en el contenido audiovisual y la recuperación de la información con contenido sobre titulares de derechos, y, por último, en el sector militar y de las fuerzas armadas del estado, y en el comercio electrónico.

En este contexto, la encriptación de la información mediante procesamiento óptico se presenta como una herramienta poderosa para la protección de datos (Alfalou, 2018; Alfalou & Brosseau, 2009; Ambs, 2010; Carnicer & Javidi, 2017; Chen, *et al.*, 2014; Graydon, 2013; Javidi, *et al.*, 2016; Li, *et al.*, 2017a; Liang, *et al.*, 2015; Lim, *et al.*, 2019; Liu, *et al.*, 2014; Nomura, *et al.*, 2009; Paganin, 2011; Pile, 2010; Qu, *et al.*, 2020; Treacy, 2013; Zhu, *et al.*, 2021), ya que los sistemas de encriptación de *software* (algoritmos digitales) (Kaur, *et al.*, 2021) y *hardware* (dispositivos electrónicos) comercialmente disponibles, que en un principio se pensaron invulnerables, ya pueden quebrantarse (Karimi, *et al.*, 2021; Lázaro, *et al.*, 2021; Mughaid, *et al.*, 2021). Los sistemas de protección basados en el procesamiento óptico han demostrado su potencialidad, versatilidad y aplicabilidad principalmente por su capacidad inherente de procesar en paralelo y la gran confiabilidad de sus grados de libertad, así como el uso de llaves de seguridad físicas en lugar de llaves digitales (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2015a; Gluckstad & Riso, 2005; Javidi, 2003; Javidi, *et al.*, 2010; Javidi & Tajahuerce, 2007; Wang & Schipf, 2019a).

La codificación de información por medio de sistemas ópticos fue propuesta en 1975 (Françon, 1975), cuando se sugirió codificar un mensaje mediante los cambios aleatorios de fase producidos por un difusor, el cual permitiría codificar la información y, a su vez, extraer el mensaje codificado. Así, el difusor actuaría como llave de codificación y decodificación. Una década más tarde, e independientemente de esta primera propuesta, se implementó una técnica de codificación de información usando distribuciones aleatorias (Kafri & Keren, 1987) y se recurrió por primera vez a la palabra “encriptación” para describir la codificación de datos en el contexto de la óptica.

Más tarde, en lo que constituyó un trabajo pionero, se propuso un método de encriptación de datos usando una arquitectura óptica 4f y dos máscaras aleatorias de fase (Refregier & Javidi, 1995). Dicha arquitectura se había usado hasta ese momento para el procesamiento óptico de información, particularmente para correlacionar dos funciones (Goodman, 1996; Vander-Lugt, 1964), con el fin de detectar, localizar e identificar la presencia de un objeto de interés (Millán, 2012), pero en el contexto de la encriptación óptica el objetivo es la protección de la información. En este método de encriptación (Refregier & Javidi, 1995) una de las máscaras se ubica en el plano de entrada, en contacto con el dato que se desea proteger, en tanto que la segunda máscara se ubica en el primer plano de Fourier del sistema 4f. Esta propuesta se pudo comprobar mediante simulaciones computacionales y, posteriormente, se hizo la primera implementación experimental, registrando la imagen encriptada en una película holográfica (Javidi, *et al.*, 1996). Para solucionar las desventajas de esa primera implementación, se presentó una segunda demostración experimental que incluyó un cristal fotorrefractivo como medio de registro (Unnikrishnan, *et al.*, 1998).

La propuesta e implementación experimental de este trabajo pionero incentivaron el surgimiento de una nueva línea de investigación, la encriptación óptica. Desde ese momento y, hasta la fecha, esta nueva línea ha dado lugar a múltiples investigaciones cuyos resultados han permitido un gran número de interesantes desarrollos, demostrando la gran confiabilidad y versatilidad de los sistemas ópticos de encriptación (Alfalou & Brosseau, 2009; Carnicer & Javidi, 2017; Chen, *et al.*, 2014; 2009; Graydon, 2013; Javidi, *et al.*, 2016; Li, *et al.*, 2017a; Liang, *et al.*, 2015; Lim, *et al.*, 2019; Liu, *et al.*, 2014; Nomura, *et al.*, 2009; Paganin, 2011; Pile, 2010; Qu, *et al.*, 2020; Treacy, 2013; Zhu, *et al.*, 2021). Los sistemas ópticos de encriptación más desarrollados, los cuales tienen más variantes y han demostrado ser más seguros y tener mayor potencial para aplicaciones prácticas, son los que emplean dos máscaras aleatorias de fase, por lo que usualmente reciben el nombre de sistemas de codificación de doble máscara de fase (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2006a; Javidi, *et al.*, 1996; Refregier & Javidi, 1995).

Es importante tener en cuenta que la mayoría de las propuestas de sistemas ópticos de encriptación publicadas en revistas científicas son virtuales, es decir, simulaciones computacionales que buscan replicar las condiciones físicas de un sistema experimental. A pesar de dichas comprobaciones, se ha demostrado que bajo ciertas condiciones estos sistemas son vulnerables (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2010a; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2010b; Peng, *et al.*, 2006). Por su parte, los procesadores ópticos experimentales que tienen como llave de seguridad un elemento físico y aleatorio tienen un alto grado de seguridad (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2006a; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2006b; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2006c; Jaramillo, *et al.*, 2020a; Unnikrishnan, *et al.*, 1998; Velez-Zea, 2016a). Su gran confiabilidad se debe, principalmente, a que las propiedades físicas de la llave la hacen única y los grados de libertad del sistema permiten aumentar su seguridad.

Algunos sistemas ópticos no solo han demostrado ser muy seguros, sino que también pueden proteger adecuadamente un gran rango de información: información bidimensional y binaria (Velez-Zea, *et al.*, 2016b), información bidimensional en tonos de gris (Tanha, *et al.*, 2012) y estructurada (Velez-Zea, *et al.*, 2017a), e información de objetos tridimensionales (Velez-Zea, *et al.*, 2016a) y a color (Tanha, *et al.*, 2012; Tebaldi, *et al.*, 2011; Velez-Zea, *et al.*, 2019).

Además, en la literatura especializada se pueden encontrar muchas contribuciones que proponen diferentes sistemas ópticos para llevar a cabo procesos de protección de datos, entre las que se destacan los que usan la arquitectura 4f (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2005a; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2005b; Javidi, *et al.*, 1996; Mosso, *et al.*, 2011a), los de correlador de transformada conjunta (*joint transform correlator*, JTC) en el dominio de Fourier (Nomura & Javidi, 2000; Velez-Zea, *et al.*, 2018), los de Fresnel (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2016; Jaramillo-Osorio, *et al.*, 2022b; Vildary, *et al.*, 2014) y los de transformada fraccional (Jaramillo-Osorio, *et al.*, 2018; Jaramillo-Osorio, *et al.*, 2022a). Otras variantes incluyen el procesamiento mediante otras transformadas, entre ellas, la

de Hartley (Chen & Zhao, 2006), la giratoria (Liu, *et al.*, 2010; Vilardy, *et al.*, 2017), la de Arnold (Shi, *et al.*, 2011), la de Mellin (Zhou, *et al.*, 2015), la jigsaw (Vilardy, *et al.*, 2019a), y la de Collins (Vilardy, *et al.*, 2019b). Muchas de las propuestas basadas en estas transformadas no han sido comprobadas experimentalmente debido a que usan arquitecturas ópticas que involucran muchos elementos o tienen grandes exigencias de potencia, alineación o estabilidad.

Los avances científicos de los últimos años evidencian que los sistemas ópticos de encriptación son una gran alternativa a los sistemas digitales y de *hardware* que actualmente se comercializan. Esta área de trabajo concentra los esfuerzos de varios grupos alrededor del mundo y permite vislumbrar la transición desde el entorno académico hacia el tecnológico en busca de su adopción comercial. Además de los elementos y desarrollos descritos, vale la pena mencionar los avances en la reducción y la eliminación del ruido en los datos recuperados y el impacto que ello tiene en este campo. En ese sentido, a continuación se presentan el análisis teórico y los resultados de la implementación experimental de un sistema óptico compacto que admite un protocolo de protección de información con recuperación libre de ruido, y se muestran las perspectivas de trabajo más promisorias en el área.

Ruido en los datos recuperados

Uno de los aspectos que más atención ha recibido en el área de encriptación es el ruido que presentan los datos recuperados. En este sentido se pueden distinguir tres vertientes de investigación: la principal, dedicada a disminuir el ruido que presentan los datos descritos debido al procesamiento con sistemas ópticos; otra, centrada en evitar el ruido que generan los datos no descritos en aquellos recuperados en procesos de multiplexado, y, por último, la técnica mediante la cual cierto rango de información puede recuperarse completamente libre de ruido. En esta sección se discutirán los avances en estas tres vertientes.

Reducción de ruido

A medida que se publicaban las contribuciones que demostraban la gran potencialidad del área, también se fueron evidenciando importantes limitaciones cuya resolución se convirtió en un reto que atrajo la atención de muchos investigadores. Una de las principales limitaciones es el ruido que afecta los datos recuperados, generado principalmente por las máscaras aleatorias y por las dimensiones y características de los elementos que determinan el límite de resolución del sistema. Además, un sistema experimental está expuesto a otras fuentes de ruido como la suciedad (polvo) y las fluctuaciones del índice de refracción, por mencionar solo dos de ellas.

Dado al alto grado de seguridad de los sistemas de encriptación experimentales que emplean máscaras aleatorias, la reducción del ruido en los datos descritos ha motivado el desarrollo de una línea de trabajo (Javidi, *et al.*, 2000; Javidi, *et al.*, 2016) en la que se destacan las contribuciones de Velez-Zea, *et al.* (2017a), Velez-Zea, *et al.* (2017b) y Vilardy, *et al.* (2013). En el 2013 se propuso un método que permite reducir el ruido de *speckle* que presentan los datos recuperados en el sistema de encriptación JTC (Vilardy, *et al.*, 2013). Este método consiste en dividir el dato descrito por la información de la intensidad de la llave de seguridad, lo cual permite reducir el ruido en el dato descrito. Las simulaciones computacionales muestran que el método conduce efectivamente a una reducción de ruido en la recuperación.

Más tarde, se presentó un análisis que demuestra que el ruido depende de la distribución espacial del objeto y pone en evidencia la existencia de un ruido de correlación aleatoria que no había sido tenido en cuenta y que, en gran medida, es el culpable del deterioro de la imagen descrita (Velez-Zea, *et al.*, 2017b). Para evitar este ruido, se reorganiza la entrada introduciendo píxeles negros entre los píxeles de la imagen original, es decir, se separan los píxeles del objeto. El objeto modificado se descrito y

descripta siguiendo el procedimiento habitual y, por último, la separación entre los píxeles se revierte para obtener el objeto descriptado con una reducción significativa de ruido. Los resultados experimentales muestran que la aplicación de la técnica conduce a una mejora notable en la fidelidad de la reconstrucción. Se debe destacar que esta técnica permite proteger y recuperar apropiadamente objetos que, si se procesan sin aplicarla, no podrían reconocerse apropiadamente.

Otro avance significativo es un protocolo mediante el cual es posible alcanzar una reducción adicional y significativa del ruido (Velez-Zea, *et al.*, 2017a). Este protocolo usa los avances anteriores en reducción de ruido (Vilardy, *et al.*, 2013; Velez-Zea, *et al.*, 2017b) e introduce el uso de una máscara de referencia para eliminar el ruido debido a la máscara aleatoria que está en contacto con el objeto en el sistema de encriptación de doble máscara de fase (Velez-Zea, *et al.*, 2017a). Se demostró experimentalmente que es posible proteger datos estructurados en tonos de gris con una recuperación óptima, evidenciando que la reducción de ruido aumenta efectivamente el rango dinámico de los datos descifrados y conserva los valores de escala de grises en mayor medida, con lo que abre la posibilidad de nuevas aplicaciones.

La combinación de los avances en la reducción del ruido prueba que se puede proteger y recuperar apropiadamente la información de objetos bidimensionales, tridimensionales, estructurados, en tonos de gris y a color. Esta línea de trabajo se sigue desarrollando y se espera que después de reducir todas las fuentes de ruido, finalmente el sistema de encriptación solo se vea limitado por las dimensiones físicas del montaje experimental.

Manejo seguro de múltiples datos

Los sistemas de protección de datos deben admitir protocolos que involucren múltiples usuarios. En la encriptación óptica se emplean técnicas de multiplexado para almacenar la información de múltiples datos encriptados en un único bloque de información, ese único dato se denomina “multiplexado” y contiene la suma de todos los datos encriptados. Para llevar a cabo un proceso destinado a múltiples usuarios, cada uno de los datos es encriptado independientemente y luego se obtiene su multiplexado. La información del multiplexado es enviada a todos los usuarios por el mismo canal, asegurando un manejo eficiente de la información, ya que se evita el envío de un dato encriptado por cada uno de los usuarios. De esta forma, cada usuario recibe por otro canal la llave o llaves de seguridad que le permiten recuperar el dato de interés a partir del multiplexado.

Inicialmente se propuso un procedimiento de multiplexado en el que se encriptan múltiples datos utilizando iluminación de diferente longitud de onda para posteriormente sumar los datos encriptados y obtener el multiplexado (Situ & Zhang, 2005). Para recuperar la información de uno de los datos, además de poseer la información del multiplexado y de la llave de seguridad, se debe usar una fuente de iluminación con la misma longitud de onda con que fue encriptado ese dato. La propuesta pudo verificarse en simulaciones computacionales y, posteriormente, se presentaron implementaciones experimentales de procesos de multiplexado mediante el desplazamiento lateral de la llave de seguridad (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2006a), la polarización de la luz (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2006b) y la pupila del sistema (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2006c).

Asimismo, se han generado procedimientos que permiten el manejo seguro de varios datos y el aumento de la seguridad del sistema de encriptación, por ejemplo, con técnicas que tienen como objetivo engañar a posibles intrusos introduciendo un procedimiento de ocultamiento (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2007), mediante la modificación del tamaño de una pupila (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2008), usando versiones escaladas de una máscara aleatoria de fase (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2009a), empleando llaves complejas (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2009b) y encriptación de datos complejos (Barrera & Torroba, 2009c). Otros incluyen el multiplexado con dos difusores y un conjunto de pupilas como llave de seguridad (Singh, *et al.*, 2008), dos patrones de *speckle* elongados y superpuestos (Singh, *et al.*, 2009), un algoritmo de recuperación de fase en cascada (Yong-Liang, *et al.*, 2009) y dos estaciones de seguridad independientes (Alfalou & Mansour, 2009).

La inclusión de técnicas de multiplexado en el área de la encriptación óptica representa grandes ventajas. En primer lugar, mediante estas técnicas se generan procesos para múltiples usuarios. Además, el multiplexado de datos permite aumentar la seguridad global del proceso mediante la inclusión de llaves de seguridad adicionales y protocolos de distracción y engaño. Dichos protocolos pueden llegar a evitar la vulnerabilidad del sistema cuando un usuario no autorizado llegue a interceptar parte de la información involucrada en el proceso.

Desde el principio, los protocolos de multiplexado evidenciaron una limitación en el número de datos que se podían multiplexar debido al ruido que generan los datos no descriptados en el dato que se descripta. A medida que el número de datos encriptados y multiplexados aumenta, se incrementa el ruido sobre cualquier dato descriptado (**Situ & Zhang, 2005**). Si se encriptan n datos usando llaves diferentes, al tratar de descriptar uno de ellos con la llave que se usó para su encriptación, se recupera ese dato, pero los $n - 1$ datos que no son descriptados representan un ruido que se superpone con el objeto recuperado. A medida que el número de objetos encriptados y multiplexados aumenta, el ruido también lo hace, hasta que para cierto número de datos no se puede reconocer el objeto recuperado. Este hecho representó una gran limitación para la encriptación óptica, pues restringía los procesos con múltiples usuarios. Según algunos investigadores alrededor del mundo, esta limitación conducía al estancamiento de la encriptación óptica, por lo que era evidente y absolutamente necesario sobrepasar dicha dificultad. Con esa motivación se presentaron contribuciones que no solo permitieron evitar la superposición entre el dato recuperado y los datos no descriptados, sino que, además, generaron aplicaciones que extendieron la aplicabilidad de los sistemas de encriptación.

Como en las técnicas de multiplexado arriba mencionadas cada uno de los datos es encriptado y descriptado secuencialmente, en la primera propuesta de solución se usó una estructura diferente. En esta propuesta, se implementó un proceso de multiplexado que usa una arquitectura 4f conjuntamente con la propagación en el espacio libre para generar un proceso de multiplexado en un solo paso (**Barrera & Torroba, 2010c**). En este caso, todos los datos son encriptados simultáneamente con diferentes llaves de seguridad y distintas distancias de propagación. La recuperación de los datos puede hacerse individualmente o se pueden descriptar todos a la vez, evitándose cualquier tipo de superposición. Paralelamente a esta propuesta se presentó un desarrollo experimental por el cual el ángulo de la onda de referencia en el proceso de registro permite separar el dato descriptado de los datos que permanecen encriptados en el plano de recuperación (**Henaó, et al., 2010**), solucionando de esta forma el solapamiento de los datos.

Un año más tarde, se presentó una solución al problema de superposición en el plano de construcción (**Mosso, et al., 2011a**). En el sistema propuesto e implementado cada dato es encriptado y luego modulado separadamente y, por último, todos los datos encriptados y modulados son multiplexados. El sistema de recuperación contiene una estación de filtrado para seleccionar la información que se desea descriptar y luego ésta se usa como entrada del sistema de descriptación, de manera que en el plano de recuperación se obtiene el dato que estaba encriptado sin la influencia de los otros. Además, en esta investigación se presentó por primera vez el concepto de “encriptación dinámica por medios ópticos” (**Mosso, et al., 2011a**), lo cual es posible dado que se pueden generar procesos que involucren múltiples datos, que un proceso dinámico está compuesto por múltiples escenas y que cada una constituye un dato para el sistema de encriptación. Estos conceptos condujeron a la primera implementación óptica de un video encriptado, en la cual cada uno de los cuadros del video es un dato para el sistema de encriptación. Así, al encriptar cada uno de los cuadros del video y aplicar la modulación en el proceso de encriptación para luego sincronizar el proceso del filtrado durante la recuperación, por primera vez se logró encriptar y descriptar en tiempo real un video por medio de un procesador óptico. Una ventaja notable del proceso de multiplexado es que la información del video encriptado ópticamente está contenida en un solo dato.

A partir de estas contribuciones, con las que se encripta y desencripta un video binario (**Paganin**, 2011), se desarrolló un protocolo completamente óptico para encriptar y desencriptar un video a color (**Mosso et al.**, 2011b). En el proceso de encriptación de un video a color cada una de las escenas que lo componen son divididas en sus tres canales cromáticos y cada uno de ellos es encriptado y modulado. Con este procedimiento se obtiene por separado la información encriptada, modulada y multiplexada de cada uno de los tres canales cromáticos de todas las escenas que componen el video. Durante la recuperación, los tres canales que componen cada una de las escenas se desencriptan simultáneamente sin la influencia de las otras escenas, de manera que se puede recuperar una sola escena de color. Por lo tanto, al sincronizar la etapa de filtrado para cada uno de los canales correspondientes a una escena, es posible recuperar un video a color.

Los desarrollos y avances posteriores condujeron a técnicas que permiten la encriptación experimental de múltiples videos (**Barrera-Ramírez, et al.**, 2012), la encriptación computacional de un video usando la transformada de Fourier fraccional (**Zhong, et al.**, 2014), la compresión y encriptación simultánea aplicada a secuencias de video (**Aldossari, et al.**, 2014) y la protección de videos usando máscaras caóticas (**Saini & Sinha**, 2015).

Recuperación libre de ruido

A pesar de los avances en la reducción del ruido, los usuarios requieren que su información esté protegida y que la información recuperada sea fiel a la original. Con este objetivo, a principios del 2013 se publicó un artículo en el que se planteó por primera vez que era posible cifrar información usando un sistema óptico y recuperarla sin ningún tipo de ruido o degradación. Dicho desarrollo estaba respaldado por resultados obtenidos mediante un sistema óptico-virtual integrado a un sistema con dos máscaras aleatorias de fase, una arquitectura óptica 4f y un procedimiento de codificación gráfica (**Barrera-Ramírez, et al.**, 2013a). En este caso, la información que se pretende cifrar se convierte en un código de respuesta rápida, conocido ampliamente como código QR (*quick response code*, *QR code*) (**International Organization for Standardization-ISO**, 2006). Por lo tanto, en lugar de cifrar el dato original, se cifra su respectivo código QR. Al realizarse el proceso de desencriptación, el código QR recuperado presentará el ruido generado por el procesamiento óptico; y cuando el código QR recuperado es decodificado se obtiene la información original libre de ruido. En este sentido, el código QR actúa como un contenedor de información y la recuperación libre de ruido es posible gracias a la tolerancia al ruido que presenta la decodificación de los códigos QR, en tanto que el sistema óptico es el responsable de la seguridad del proceso.

Esta contribución demostró por primera vez que era posible proteger datos mediante sistemas ópticos y recuperarlos completamente libres de ruido. Posteriormente, se hizo la demostración experimental (**Barrera-Ramírez, et al.**, 2014a) utilizando una arquitectura óptica de correlador de transformada conjunta, una llave de seguridad aleatoria y física, y, como contenedor de información, un código QR (**Barrera-Ramírez, et al.**, 2011; **Barrera-Ramírez & Torroba**, 2015a; **Nomura & Javidi**, 2000; **Torroba & Barrera-Ramírez**, 2015).

Estas dos contribuciones demostraron que los sistemas ópticos de protección de información son una alternativa a los sistemas de protección digitales y de *hardware* (**Barrera-Ramírez, et al.**, 2013a; **Barrera-Ramírez, et al.**, 2014a), generando un gran impacto en la comunidad científica internacional y revitalizando el área de los sistemas ópticos de encriptación (**Graydon**, 2013; **Treacy**, 2013). Se debe destacar que estas contribuciones dieron lugar al inicio de una línea de investigación en encriptación óptica de información empleando contenedores de información, la cual ha generado aportes respaldados por sistemas experimentales coherentes (**Barrera-Ramírez, et al.**, 2014b; **Jaramillo, et al.**, 2018; **Trejos, et al.**, 2015) e incoherentes (**Cheremkhin, et al.**, 2017; **Cheremkhin, et al.**, 2021a; **Evtikhiev, et al.**, 2020; **Wang, et al.**, 2020;), y sistemas ópticos-virtuales (**Lin, et al.**, 2015; **Sui, et al.**, 2017). Además, motivaron el surgimiento de nuevas líneas de investigación y desarrollo en torno al procesamiento óptico usando contenedores en procesos

de autenticación de información (Blau, *et al.*, 2020; Carnicer, *et al.*, 2015; Chen, *et al.*, 2018; Qin, *et al.*, 2018a) y a la implementación de diferentes técnicas y materiales para la fabricación de contenedores (Li, *et al.*, 2017c; Meng, *et al.*, 2021a; Petriashvili, *et al.*, 2018; Ponjavidze, *et al.*, 2018; Wang, *et al.*, 2021). También incentivaron el desarrollo de aplicaciones en diferentes tópicos y áreas, por ejemplo, para la formación integral de imágenes (Markman, *et al.*, 2014), la protección de hologramas con marcas de agua (Li, *et al.*, 2018), la pictografía (Zhu, *et al.*, 2019), y la esteganografía (Alajmi, *et al.*, 2020).

A pesar sus ventajas, un código QR no es un contenedor ideal para los sistemas ópticos, ya que su diseño está optimizado para ser resistente a un daño localizado (ISO, 2006), en tanto que el ruido introducido por los sistemas de encriptación que usan máscaras aleatorias afecta casi uniformemente el objeto descrito (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2013a; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2014a; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2014b; Barrera-Ramírez & Torroba, 2015b). Además del espacio que ocupa la información codificada, los códigos QR contienen estructuras de posición, alineamiento, sincronización, de formato y de versión que hacen que el tamaño del código sea considerable.

Un contenedor ideal debe tener frecuencias espaciales bajas para minimizar las pérdidas por difracción, el tamaño de píxel necesario en el medio de registro, y un nivel de tolerancia al ruido controlable, de manera que se pueda garantizar una lectura eficiente. Asimismo, el contenedor debe diseñarse de manera que requiera el menor espacio posible y pueda codificar la mayor cantidad de información según las limitaciones físicas de los elementos usados en los montajes ópticos.

Siguiendo este razonamiento, se desarrolló el primer contenedor de información específicamente para sistemas ópticos, denominado *customized container for optical security* (CCOS). El CCOS satisface los criterios de un contenedor óptimo, pues su contenido espectral puede deducirse a partir de la separación y el tamaño de los bloques, y la tolerancia al ruido está directamente relacionada con el tamaño de los bloques. Además, la lectura del CCOS se lleva a cabo con tres operaciones sencillas sin necesidad de estructuras de sincronización, de formato y de versión. Además, las estructuras de posición y alineamiento en el CCOS son provistas por un borde que delimita el área de lectura (Velez-Zea, *et al.*, 2016b).

Los resultados computacionales y experimentales mostraron que un CCOS permite un gran aumento en la tolerancia al ruido en comparación con un código QR, a la vez que su encriptación satisfactoria requiere de menos espacio en el plano de entrada, aumentando la cantidad de información que puede ser procesada simultáneamente (Jaramillo-Osorio, *et al.*, 2020a; Velez-Zea, *et al.*, 2016b). Estas contribuciones demuestran que diseñar contenedores específicamente para las características del sistema óptico ayuda a superar algunas de las limitaciones causadas por el ruido.

Este nuevo contenedor ha servido de base para novedosas aplicaciones con operaciones XOR (Qin & Zhang, 2017), algoritmos de recuperación de fase (Qin, *et al.*, 2018b), imágenes fantasmas (Liansheng, *et al.*, 2019), criptosistemas asimétricos (Kumar & Nishchal, 2019) e, inclusive, implementaciones en el dominio de Fresnel (Jaramillo-Osorio, *et al.*, 2020a). Es importante tener en cuenta que la recuperación libre de ruido está limitada a los caracteres que se puedan codificar y decodificar usando los contenedores de información. Por lo tanto, cuando se trata de objetos que están por fuera de ese rango, la reducción de ruido se obtiene aplicando las técnicas mencionadas en la sección Reducción de ruido.

Los avances en estas tres vertientes están relacionados y potencian la encriptación óptica; por ejemplo, todos los avances en la reducción de ruido en un dato recuperado son fundamentales para aumentar el número de caracteres que pueden recuperarse sin ruido, ya que, al reducir significativamente el ruido en el contenedor descrito, es posible decodificar contenedores con un número significativo de información.

A partir de los avances en la reducción y eliminación del ruido, se han generado técnicas y métodos que han permitido expandir el rango de aplicabilidad de la encriptación óptica. Por ejemplo, se han presentado aplicaciones novedosas que demuestran que mediante

una técnica de multiplexado se pueden encriptar objetos que superan el límite de resolución del sistema (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2011), implementar experimentalmente un teclado encriptado ópticamente (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2013b) y aumentar la seguridad del sistema mediante un procedimiento de salteado (Velez-Zea, *et al.*, 2017c). Incluso, se presentó una contribución que aprovecha todos los avances en reducción de ruido, recuperación libre de ruido y encriptación dinámica para la protección y recuperación de mensajes libres de ruido (Trejos, *et al.*, 2015).

Sistema óptico compacto para la protección de datos

Aunque los sistemas ópticos de encriptación han demostrado un alto desempeño, su puesta en funcionamiento es muy exigente, lo que restringe su implementación en ambientes de investigación básica y limita su potencial para el uso en entornos prácticos. Esto evidencia la necesidad de desarrollar sistemas que preserven los niveles de seguridad hasta ahora alcanzados por los procesadores ópticos para la protección de datos y permitan una reducción del volumen físico que ocupa el sistema, la cantidad de elementos ópticos empleados y las exigencias de estabilidad y alineamiento, de manera que se cuente con protocolos de seguridad basados en esquemas ópticos compactos que permitan reducir los requerimientos de los sistemas convencionales. Además, estos sistemas deben admitir protocolos de seguridad en que los datos recuperados estén libres de cualquier ruido o degradación.

Uno de los sistemas ópticos de encriptación más desarrollados y estudiados, y que posee más variantes, es el sistema 4f (Refregier & Javidi, 1995). Este sistema emplea una arquitectura óptica 4f con dos lentes positivas y dos máscaras aleatorias de fase para convertir el dato original en un patrón de ruido blanco, conocido como dato encriptado. En la primera implementación experimental, la información del dato encriptado se registró usando un montaje interferométrico fuera de eje, en el cual uno de los brazos contiene el sistema 4f y el otro, una onda de referencia. En el proceso de recuperación es necesario emplear un sistema holográfico fuera de eje que permita el registro de la llave; posteriormente, la llave es multiplicada por el dato encriptado y, mediante un proceso inverso al de encriptación, es posible recuperar la información original. Una gran cantidad de elementos ópticos son necesarios para llevar a cabo el proceso de encriptación y de registro de la llave, lo que conduce a que el montaje experimental tenga grandes exigencias de alineación y estabilidad (Javidi, *et al.*, 1996).

Con el propósito de disminuir los requerimientos experimentales planteados por la arquitectura 4f, y tomando como base la arquitectura óptica JTC (Goodman, 1996; Lu, *et al.*, 1990; Millán, 2012; Vander-Lugt, 1964; Weaver & Goodman, 1966), se propuso el sistema de encriptación JTC (Nomura & Javidi, 2000). El plano de entrada del criptosistema JTC contiene el producto entre el objeto que se desea proteger y una máscara aleatoria de fase y, a una distancia determinada, se ubica otra máscara aleatoria de fase que actúa como llave de seguridad.

Experimentalmente, el plano de entrada se genera proyectando el objeto y la ventana de la llave en un modulador espacial de luz (MEL) (*spatial light modulator*, SLM), que luego se pone en contacto con un difusor (Figura 1). Esta arquitectura posee una sola lente ubicada entre los planos de entrada y de salida, de modo que ambos quedan ubicados en los puntos focales de dicha lente. En el plano de salida se registra la intensidad de la transformada de Fourier conjunta de las funciones que forman el plano de entrada y, a partir de esa intensidad, se obtiene el dato encriptado. Esto implica que el sistema JTC es más compacto, pues requiere solo de una lente, lo que reduce algunas de las exigencias del sistema 4f, característica que ha llevado a que se haya estudiado y desarrollado notablemente (Jaramillo, *et al.*, 2018; Jaramillo, *et al.*, 2020a; Rueda, *et al.*, 2009a; Rueda, *et al.*, 2009b; Vildary, *et al.*, 2017).

Aunque en el criptosistema JTC no es necesario implementar un montaje interferométrico con un brazo de referencia para registrar la intensidad que permite obtener el dato encriptado, este montaje es necesario para registrar la información de la llave de seguridad

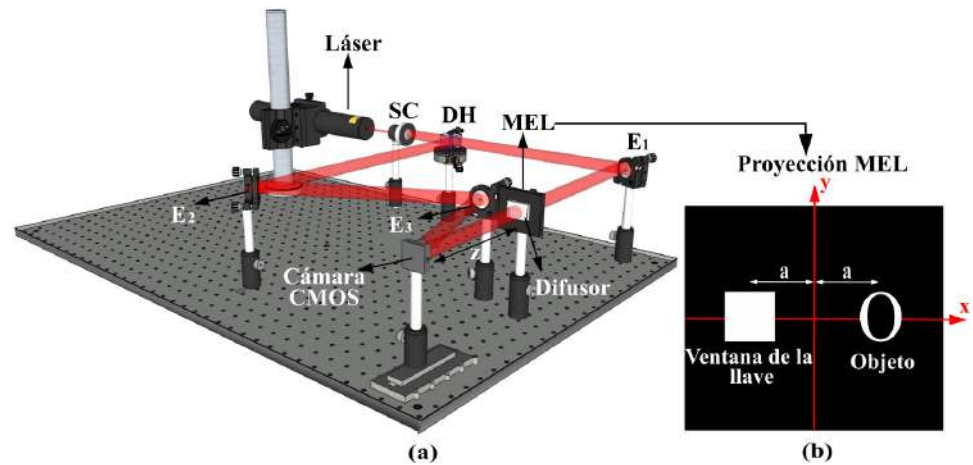


Figura 1. (a) Sistema de encriptación JTC en el dominio de Fresnel con brazo de referencia. z : separación entre el plano de entrada y el sensor de la cámara CMOS; MEL: modulador espacial de luz; SC: sistema de colimación; DH: divisor de haz; E: espejo. (b) Proyección en el MEL. $2a$: separación entre el objeto y la ventana de la llave

(Barrera-Ramírez, *et al.*, 2011; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2012; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2013b; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2013c; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2014a; Barrera-Ramírez, *et al.*, 2016; Jaramillo, *et al.*, 2018; Rueda, *et al.*, 2009a; Rueda, *et al.*, 2009b) (Figura 1). Esto implica que el sistema JTC conserva los altos requerimientos experimentales y de implementación y funcionamiento asociados con el brazo de referencia (brazo con espejos E_2 y E_3). Con el fin de evitar estos requerimientos, recientemente se desarrolló un sistema de encriptación compacto que se describe a continuación.

Obtención del dato encriptado y la llave de seguridad

El sistema compacto de protección de datos utiliza una arquitectura de encriptación de correlador de transformada conjunta en el dominio de Fresnel (Jaramillo-Osorio, *et al.*, 2020a; Jaramillo-Osorio, *et al.*, 2020b). En esta arquitectura, la información que se va a proteger y la ventana de la llave se proyectan en un MEL y se ponen en contacto con un difusor (Figura 2 a, b). Considerando que $c(x, y) = o(x, y)r(x, y)$, donde $o(x, y)$ se denomina objeto y representa la información que se desea proteger y $r(x, y)$ es la máscara aleatoria correspondiente al área del difusor que está en contacto con la información que se va a encriptar, la transmitancia del plano de entrada del sistema se puede escribir como (Figura 2 a),

$$f(x, y) = c(x, y) \otimes \delta(x - c, y + d) + l(x, y) \otimes \delta(x + c, y + d) \quad (1)$$

donde la llave de seguridad $l(x, y)$ es la región del difusor limitada por la ventana de la llave, la separación entre el objeto y la llave de seguridad es $2c$ (Figura 2 b), \otimes representa la operación de convolución y δ es la función delta de Dirac.

En el proceso de encriptación, el plano de entrada se ilumina con una onda plana monocromática y el campo que emerge del plano de entrada se propaga libremente hasta el plano de registro. Luego, en una cámara CMOS se registra la intensidad de la transformada de Fresnel (TFr) de la transmitancia del plano de entrada, intensidad que se conocida como espectro conjunto de potencias de Fresnel (ECPF),

$$F(u, v) = |C_z(u, v)|^2 + |L_z(u, v)|^2 + C_z^*(u, v)L_z(u, v) \exp(4\pi i cu) + C_z(u, v)L_z^*(u, v) \exp(-4\pi i cu) \quad (2)$$

donde z es la distancia entre el plano de entrada y el plano de registro (Figura 2 a), (u, v) son las coordenadas en el dominio de Fresnel; $C_z(u, v)$ y $L_z(u, v)$ son las TFr de $c(x, y)$ y $l(x, y)$, respectivamente, y $*$ representa el complejo conjugado.

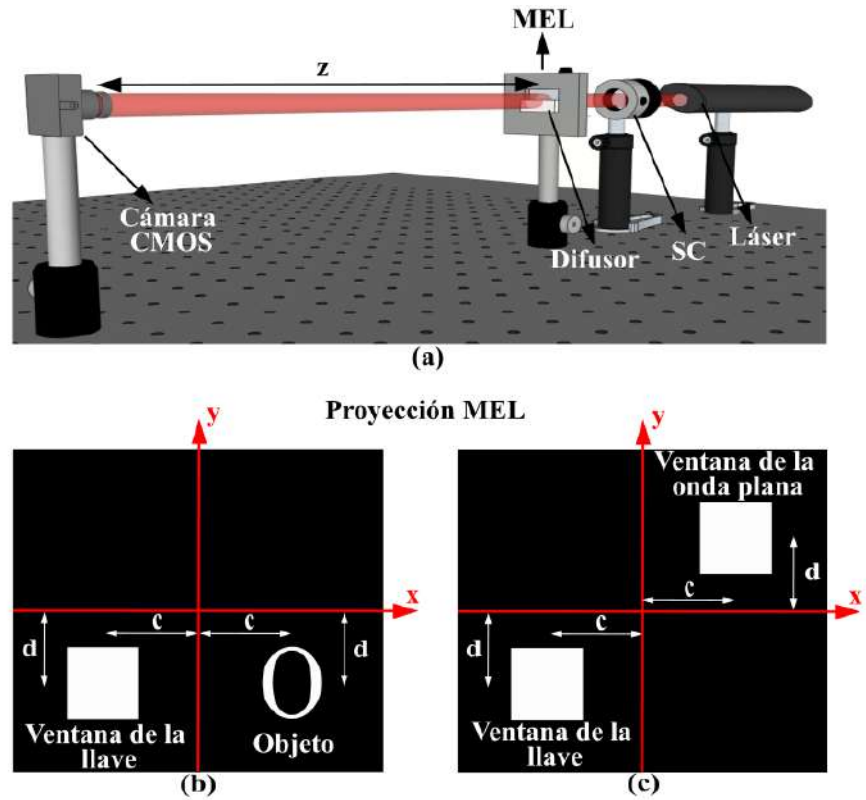


Figura 2. a) Sistema compacto de encriptación. z : separación entre el plano de entrada y el sensor de la cámara CMOS; MEL: modulador espacial de luz; SC: sistema de colimación. Proyección en el MEL para registrar: b) el objeto encriptado y c) la información de la llave de seguridad. $2c$: separación entre el objeto y la ventana de la llave; $2d$: separación entre la ventana llave y la ventana de la onda plana. El difusor cubre el área inferior del modulador donde se proyectan la ventana de la llave y el objeto

Para extraer el dato encriptado del ECPF (ecuación 2), se realiza un proceso de filtrado que consiste en registrar el término $|C_z(u, v)|^2$ proyectando en el SLM solo la ventana de la llave y $|L_z(u, v)|^2$ proyectando solo el objeto, para luego restar las intensidades $|C_z(u, v)|^2$ y $|L_z(u, v)|^2$ del ECPF y obtener

$$G(u, v) = C_z^*(u, v)L_z(u, v) \exp(4\pi i c u) + C_z(u, v)L_z^*(u, v) \exp(-4\pi i c u) \quad (3).$$

Al realizar la transformada de Fourier (FT) de la ecuación (3) se obtiene

$$g(\xi, \eta) = FT\{C_z^*(u, v)L_z(u, v)\} \otimes \delta(\xi - 2c) + FT\{C_z(u, v)L_z^*(u, v)\} \otimes \delta(\xi + 2c) \quad (4).$$

Como los dos términos en la ecuación (4) están separados espacialmente, es posible filtrar el primer término y retener el segundo. Luego, al posicionar el segundo término en las coordenadas $(0, 0)$ y realizar una TF inversa, se obtiene el objeto encriptado (Barrera-Ramírez, *et al.*, 2013c),

$$E(u, v) = C_z(u, v)L_z^*(u, v) \quad (5).$$

Recuperación del objeto

Un usuario autorizado debe poseer la información del objeto encriptado y de la llave de seguridad para poder acceder a la información original. Para la obtención de la información de la llave de seguridad se utiliza el mismo montaje experimental empleado para obtener el dato encriptado, pero se cambia la proyección en el MEL. En este caso, en el MEL se proyecta la ventana de la llave y una ventana que permite generar una onda plana (Figura 2 c). Con esta proyección, la transmitancia del plano de entrada está dada por:

$$p(x, y) = w(x, y) \otimes \delta(x - c, y - d) + l(x, y) \otimes \delta(x + c, y + d) \quad (6),$$

donde $w(x, y)$ representa la ventana de la onda plana y $2d$ es la separación entre la ventana de la llave y la ventana de la onda plana (**Figura 1 c**). En la cámara CMOS se registra la intensidad de la TFr del plano de entrada,

$$P(u, v) = |W_z(u, v)|^2 + |L_z(u, v)|^2 + L_z^*(u, v)W_z(u, v) \exp[-4\pi i(cu + dv)] \\ + L_z(u, v)W_z^*(u, v) \exp[4\pi i(cu + dv)] \quad (7),$$

donde $W_z(u, v)$ es la TFr de $w(x, y)$. Con un procedimiento de filtrado similar al aplicado en la ecuación (2) para obtener el objeto encriptado (ecuación 5), se accede a la información de la llave de seguridad $L_z(u, v)$ (**Barrera-Ramírez, et al., 2011**).

El proceso de recuperación consiste en multiplicar el dato encriptado $E(u, v)$ por la información de la llave de seguridad $L_z(u, v)$,

$$e_d(u, v) = C_z(u, v)L_z^*(u, v)L_z(u, v) \quad (8).$$

Lo ideal es que $L_z(u, v)$ sea una función solo de fase, sin embargo, en la implementación experimental un difusor provee la llave y, por lo tanto, es una función aleatoria compleja. A pesar de esto, podemos aplicar la aproximación de ancho de banda donde $L_z^*(u, v)L_z(u, v) \approx 1$ (**Unnikrishnan, et al., 1998**). Con esta aproximación y realizando la TFr inversa se obtiene el objeto desencriptado,

$$d(x, y) = c(x, y) = o(x, y)r(x, y) \quad (9).$$

Por último, la información del objeto original se recupera al calcular la intensidad del objeto desencriptado. Por otro lado, si un usuario no autorizado intenta acceder a la información original usando una llave incorrecta, una TFr inversa producirá un patrón de *speckle*, pues la información permanece encriptada.

Este sistema compacto reduce la cantidad de elementos utilizados y el volumen ocupado por el montaje experimental, manteniendo las características de seguridad presentes en los sistemas ya establecidos (**Figura 1 a, b**). Al excluir el brazo de referencia, se reducen las exigencias experimentales de estabilidad, alineación y potencia de la fuente de iluminación. Además, se evitan las aberraciones que pueden introducir los elementos ópticos asociados con el brazo de referencia.

Resultados experimentales

El montaje experimental está constituido por un láser de helio-neón con $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ como fuente de iluminación y un MEL de transmisión SLM Holoeye LC2002 con 800×600 píxeles y un tamaño de pixel de $32 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ para proyectar el objeto, la ventana de la llave y la ventana de la onda plana (**Figura 2**). Las máscaras aleatorias de fase son generadas por medio de un difusor y se emplea una cámara CMOS EO-1002M con una resolución de 3840×2748 píxeles y un tamaño de pixel de $1,67 \mu\text{m} \times 1,67 \mu\text{m}$ para registrar la información procesada ópticamente. El tamaño del objeto, la ventana de la llave y la ventana de la onda plana es de $8 \text{ mm} \times 6,4 \text{ mm}$, $3,2 \text{ mm} \times 3,2 \text{ mm}$ y $4,8 \text{ mm} \times 4,8 \text{ mm}$, respectivamente. $c = 3,2 \text{ mm}$, $d = 2,6 \text{ mm}$ y la distancia entre el plano de entrada y el plano de registro es $z = 23 \text{ cm}$.

En la **figura 3** se presentan los resultados experimentales obtenidos por medio del sistema compacto. El objeto corresponde a las letras UDEA (**Figura 3 a**); como era de esperarse el objeto encriptado (ecuación 5) es un patrón aleatorio debido al uso de las máscaras aleatorias de fase (**Figura 3 b**). Para recuperar el objeto a partir de la información encriptada se debe tener acceso a la llave de seguridad empleada en el proceso de encriptación, pues si se utiliza una llave diferente, el dato permanecerá encriptado (**Figura 3 c**), en cambio, utilizando la llave de seguridad empleada en el proceso de encriptación se recupera la información original (**Figura 3 d**). Evidentemente, la información recuperada contiene el ruido asociado con los sistemas ópticos de encriptación que usan máscaras aleatorias de fase.

Como se mencionó al inicio de esta sección, los sistemas compactos deben admitir procesos de protección de información que brinden un dato recuperado libre de ruido. Para comprobar que el sistema de compresión de datos cumple este requisito, se emplea un CCOS como contenedor de información. El CCOS es un arreglo binario cuadrado de 3x3 celdas donde cada celda contiene un bloque. La lectura del código se hace calculando la intensidad promedio de cada celda de izquierda a derecha y de arriba abajo, y luego se compara con un valor límite que depende del sistema óptico (Velez-Zea, *et al.*, 2016b). En la **figura 4** se presenta el código CCOS correspondiente al texto UDEA (**Figura 4 a**) y el respectivo código descriptado (**Figura 4 b**). La lectura del código CCOS brinda la información libre de ruido y de cualquier degradación (**Figura 4 c**) por su tolerancia al ruido.

Los resultados presentados en las **figuras 3 y 4** demuestran que con el sistema óptico compacto no solo se protege la información, sino que, además, se puede obtener una recuperación libre de ruido. La línea de trabajo en sistemas ópticos compactos para la protección

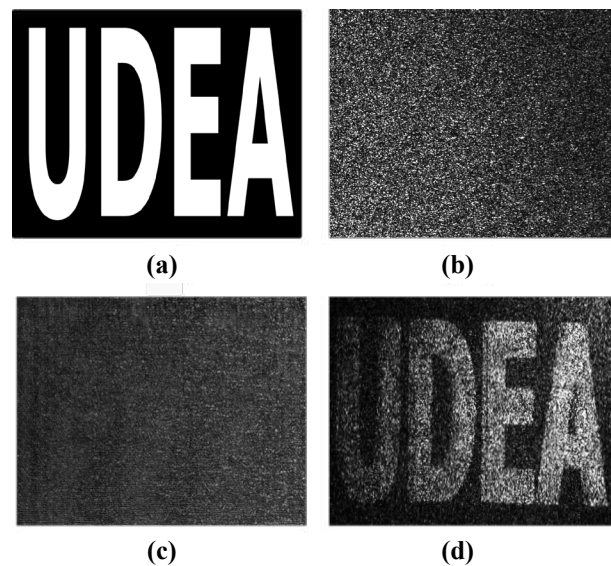


Figura 3. a) Objeto, resultados experimentales: b) objeto encriptado, objeto descriptado con c) una llave incorrecta y d) la llave correcta

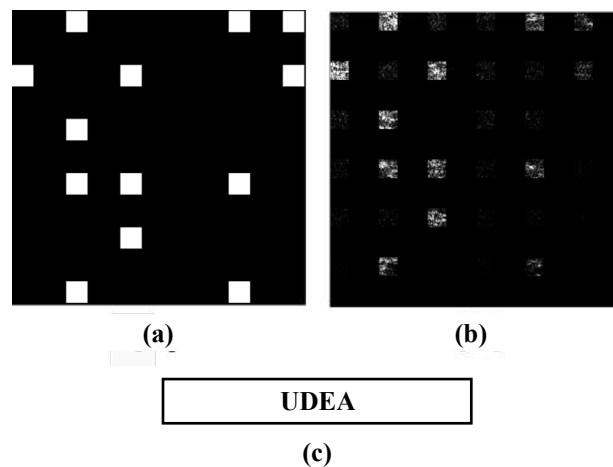


Figura 4. Resultado de la encriptación de información con recuperación libre de ruido. a) Código CCOS del texto UDEA, b) código descriptado, y c) lectura del código descriptado

de datos es una línea en desarrollo que contribuye significativamente a la potencial adopción de sistemas ópticos de seguridad. Aunque esta línea aprovecha todos los avances que se han generado en torno a los criptosistemas ópticos, óptico-digitales y óptico-virtuales, se requieren investigaciones que muestren que este tipo de sistemas pueden alcanzar un rendimiento similar al demostrado por los criptosistemas convencionales.

Perspectivas

A pesar de los grandes avances que se han logrado hasta ahora, aún hay retos que están siendo motivo de investigaciones en varios laboratorios alrededor del mundo, estudios en los que se definen las perspectivas del área de protección de la información mediante procesadores ópticos. Entre las líneas de trabajo recientes se destacan el desarrollo de sistemas ópticos compactos (**Jaramillo-Osorio, et al., 2020a; Jaramillo-Osorio, et al., 2020b**), en el que se advierten futuras aplicaciones basadas en criptosistemas ópticos que permitirán dinamizar el área de la encriptación óptica de información. También se sigue trabajando para aumentar y mejorar la seguridad (**Dou, et al., 2019**), en algunos casos implementando experimentalmente esquemas en diferentes dominios ópticos y transformadas que involucran nuevos parámetros de seguridad (**Jaramillo-Osorio, et al., 2020b; Vilardy, et al., 2019a; Vilardy, et al., 2019b**). Otras líneas que se siguen desarrollando activamente son las encaminadas a lograr una reducción de ruido para mejorar la calidad de los datos recuperados y la encriptación óptica con recuperación libre de ruido (**Cheremkhin, et al., 2021a; Cheremkhin, et al., 2021b; Evtikhiev, et al., 2020; Wang, et al., 2020**), la encriptación de múltiples datos (**He, et al., 2020; Wu, et al., 2019; Zhang, et al., 2022**) e incluso, la combinación de técnicas de multiplexado y recuperación libre de ruido (**Jaramillo-Osorio, et al., 2020b; Yan, et al., 2019**).

Debido a que los sistemas ópticos de encriptación han demostrado su gran potencialidad para aplicaciones prácticas, una de las líneas más activas actualmente es el criptoanálisis, en la cual se busca probar la seguridad de los sistemas ópticos de encriptación adaptando en el dominio óptico algunos de los ataques que se usan exclusivamente en el dominio digital (**Hai, et al., 2019; Jiao, et al., 2020; Wang, et al., 2019b; Wu, et al., 2021; Zhang, et al., 2021**). Esta es un área en desarrollo y consolidación, ya que los ataques a los sistemas ópticos experimentales están en sus primeras etapas y se prevén futuros avances que permitan fortalecer el área de la protección de datos por medio de procesadores ópticos.

Se espera que en los próximos años se produzcan desarrollos que generen sistemas ópticos aptos para proteger la información mediante un amplio espectro de posibilidades que trasciendan el trabajo realizado hasta ahora. En ese sentido, los nuevos criptosistemas deberían ser lo suficientemente flexibles para incluir todos los desarrollos en las áreas de trabajo mencionadas. Además, se pueden prever avances científicos que permitan el desarrollo de dispositivos ópticos de encriptación ultracompactos mediante, por ejemplo, dispositivos fotónicos integrados y metateriales (**Abdollahramezani, et al., 2020; Li, et al., 2017b; Meng, et al., 2021b; Reshef, et al., 2021; Wang, et al., 2016**). Obviamente, su implementación dependerá del campo en el que se obtengan los mejores desarrollos frente a las dificultades científicas y tecnológicas, así como del interés de los centros de investigación y las grandes compañías.

Conclusiones

Las contribuciones de los últimos años han permitido resolver limitaciones fundamentales del campo de la encriptación óptica, lo que ha demostrado su gran confiabilidad y efectividad para la protección de la información. Además, dichas investigaciones han dado lugar a novedosos avances y al surgimiento de diversas líneas de desarrollo en torno al procesamiento óptico de la información. En particular, el área de reducción y eliminación del ruido ha presentado un gran dinamismo y sigue vigente debido al impacto que tiene en la eventual adopción de los criptosistemas ópticos. El desarrollo teórico y los resultados experimentales presentados en esta exposición demuestran la validez del sistema óptico

de encriptación compacto y la real posibilidad de implementar protocolos de recuperación libre de ruido cuando se usan contenedores de información personalizados. Estos resultados evidencian la potencialidad del sistema y permiten visualizar el desarrollo de una línea de trabajo en esta dirección dadas las ventajas prácticas de los criptosistemas compactos. Se prevé que los desarrollos actuales y futuros en el área no solo inspiren el surgimiento y desarrollo de líneas y tópicos relevantes, sino que, además, posibiliten una transición desde el ámbito científico y académico al de la aplicación tecnológica.

Agradecimientos

Esta investigación se llevó a cabo con el apoyo del Comité para el Desarrollo de la Investigación-CODI y la Estrategia de Sostenibilidad 2020-2021 de la Universidad de Antioquia (Colombia). El autor agradece la colaboración del estudiante de Doctorado en Física M.Sc. John Alexis Jaramillo Osorio (Instituto de Física, Universidad de Antioquia), por su ayuda en los montajes experimentales que permitieron obtener los resultados aquí presentados.

Conflicto de intereses

El autor del artículo declara que no existe conflicto de intereses con relación a la publicación de este artículo.

Referencias

- Abdollahramezani, S., Hemmatyar, O., Adibi, A.** (2020). Meta-optics for spatial optical analog computing. *Nanophotonics*. **9**: 4075-4095. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0285
- Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas-ACIS.** (2020). Cifras de ciberseguridad en Colombia prenden alarmas al cierre del 2020. Fecha de consulta: noviembre de 2021. Disponible en: <https://acis.org.co/portal/content/noticiasdelsector/cifras-de-ciberseguridad-en-colombia-prenden-alarmas-al-cierre-del-2020>
- Alajmi, M., Elashry, I., El-Sayed, H.S., Farag, O.S.** (2020). Steganography of Encrypted Messages Inside Valid QR Codes. *IEEE Access*. **8**: 27861-27873. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971984>
- Aldossari, M., Alfalou, A., Brosseau, C.** (2014). Simultaneous compression and encryption of closely resembling images: application to video sequences and polarimetric images. *Opt. Express*. **22**: 22349-22368. <https://doi.org/10.1364/OE.22.022349>
- Alfalou, A.** (Ed.). (2018). *Advanced Secure Optical Image Processing for Communications*. (8-1-8-33). Bristol: United Kingdom: Institute of Physics Publishing.
- Alfalou, A. & Brosseau, C.** (2009). Optical image compression and encryption methods. *Adv. Opt. Photon.* **1**: 589-636. <https://doi.org/10.1364/AOP.1.000589>
- Alfalou, A. & Mansour, A.** (2009). Double random phase encryption scheme to multiplex and simultaneous encode multiple images. *Appl. Opt.* **48**: 5933-5947. <https://doi.org/10.1364/AO.48.005933>
- Ambis, P.** (2010). Optical computing: a 60-year adventure. *Adv. Opt. Technol.* **2010**: 372652. <https://doi.org/10.1155/2010/372652>
- Barrera-Ramírez, J.F., Henao, R., Torroba, R.** (2005a). Optical encryption method using toroidal zone plates. *Opt. Commun.* **248**: 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2004.11.086>
- Barrera-Ramírez, J.F., Henao, R., Torroba, R.** (2005b). Fault tolerances using toroidal zone plate encryption. *Opt. Commun.* **256**: 489-494. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.06.077>
- Barrera-Ramírez, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** (2006a). Multiplexing encryption-decryption via lateral shifting of a random phase mask. *Opt. Commun.* **259**: 532-536. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.09.027>
- Barrera-Ramírez, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** (2006b). Multiplexing encrypted data by using polarized light. *Opt. Commun.* **260**: 109-112. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.10.053>
- Barrera-Ramírez, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** (2006c). Multiple image encryption using an aperture-modulated optical system. *Opt. Commun.* **261**: 29-33. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.11.055>

- Barrera-Ramírez, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** (2007). Multiple-encoding retrieval for optical security. *Opt. Commun.* **276**: 231-236. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.04.040>
- Barrera-Ramírez, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** (2008). Code retrieval via undercover multiplexing. *Optik.* **119**: 139-142. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2006.07.008>
- Barrera-Ramírez, J.F., Henao, R., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** (2009a). Digital encryption with undercover multiplexing by scaling the encoding mask. *Optik.* **120**: 342-346. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2007.10.002>
- Barrera-Ramírez, J.F., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** (2009b). Multiplexing encryption technique by combining random amplitude and phase masks. *Optik.* **120**: 351-355. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2007.10.001>
- Barrera-Ramírez, J.F. & Torroba, R.** (2009c). Efficient encrypting procedure using amplitude and phase as independent channels to display decoy objects. *Appl. Opt.* **48**: 3121-3129. <https://doi.org/10.1364/AO.48.003121>
- Barrera-Ramírez, J. F., Vargas, C., Tebaldi, M., Torroba, R.** (2010a). Chosen-plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system. *Opt. Commun.* **283**: 3917-3921. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.06.009>
- Barrera-Ramírez, J.F., Vargas, C., Tebaldi, M., Torroba, R., Bolognini, N.** (2010b). Known plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system. *Opt. Lett.* **35**: 3553-3555. <https://doi.org/10.1364/OL.35.003553>
- Barrera-Ramírez, J.F. & Torroba, R.** (2010c). One step multiplexing optical encryption. *Opt. Commun.* **283**: 1268-1272. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.11.083>
- Barrera-Ramírez, J.F., Rueda, E., Ríos, C., Tebaldi, M., Bolognini, N., Torroba, R.** (2011). Experimental opto-digital synthesis of encrypted sub-samples of an image to improve its decoded quality. *Opt. Commun.* **284**: 4350-4355. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.05.035>
- Barrera-Ramírez, J.F., Tebaldi, M., Ríos, C., Rueda, E., Bolognini, N., Torroba, R.** (2012). Experimental multiplexing of encrypted movies using a JTC architecture. *Opt. Express.* **20**: 3388-3393. <https://doi.org/10.1364/OE.20.003388>
- Barrera-Ramírez, J.F., Mira-Agudelo, A., Torroba, R.** (2013a). Optical encryption and QR codes: Secure and noise-free information retrieval. *Opt. Express.* **21**: 5373-5378. <https://doi.org/10.1364/OE.21.005373>
- Barrera-Ramírez, J.F., Velez-Zea, A., Torroba, R.** (2013b). Experimental multiplexing protocol to encrypt text of any length. *J. Opt.* **15**: 055404. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/5/055404>
- Barrera-Ramírez, J.F., Trejos, S., Tebaldi, M., Torroba, R.** (2013c). Experimental protocol for packaging and encrypting multiple data. *J. Opt.* **15**: 055406. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/5/055406>
- Barrera-Ramírez, J.F., Mira-Agudelo, A., Torroba, R.** (2014a). Experimental QR code optical encryption: noise-free data recovering. *Opt. Lett.* **39**: 3074-3077. <https://doi.org/10.1364/OL.39.003074>
- Barrera-Ramírez, J.F. Velez-Zea, A., Torroba, R.** (2014b). Experimental scrambling and noise reduction applied to the optical encryption of QR codes. *Opt. Express.* **22**: 20268-20277. <https://doi.org/10.1364/OE.22.020268>
- Barrera-Ramírez, J.F., Mira-Agudelo, A., Torroba, R.** (Diciembre 18, 2015a). Aparato óptico-físico y procedimientos para la encriptación y recuperación de información libre de ruido. Patente de invención 14 98035.
- Barrera-Ramírez, J.F. & Torroba, R.** (2015b). Encriptación óptica de información con recuperación libre de ruido. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **39**: 48-54. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.259>
- Barrera-Ramírez, J.F., Jaramillo-Osorio, A., Velez-Zea, A., Torroba, R.** (2016). Experimental analysis of a joint free space cryptosystem. *Opt. Lasers Eng.* **83**: 126-130. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.03.010>
- Blau, Y., Bar-On, O., Hanein, Y., Boag, A., Scheuer, J.** (2020). Meta-hologram-based authentication scheme employing a speckle pattern fingerprint. *Opt. Express.* **28**: 8924-8936. <https://doi.org/10.1364/OE.388233>
- Carnicer, A., Hassanfiroozi, A., Latorre-Carmona, P., Huang, Y.P., Javidi, B.** (2015). Security authentication using phase-encoded nanoparticle structures and polarized light. *Opt. Lett.* **40**: 135-138. <https://doi.org/10.1364/OL.40.000135>
- Carnicer, A. & Javidi, B.** (2017). Optical security and authentication using nanoscale and thin-film structures. *Adv. Opt. Photon.* **9**: 218-256. <https://doi.org/10.1364/AOP.9.000218>

- Chen, J., Bao, N., Zhang, L.Y., Zhu, Z.** (2018). Optical information authentication using optical encryption and sparsity constraint. *Opt. Lasers Eng.* **107**: 352-363. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.04.0>
- Chen, L. & Zhao, D.** (2006). Optical image encryption with Hartley transforms. *Opt. Lett.* **31**: 3438-3440. <https://doi.org/10.1364/ol.31.003438>
- Chen, W., Javidi, B., Chen, X.** (2014). Advances in optical security systems. *Adv. Opt. Photon.* **6**: 120-155. <https://doi.org/10.1364/AOP.6.000120>
- Cheremkhin, P.A., Krasnov, V.V., Rodin, V.G., Starikov, R.S.** (2017). QR code optical encryption using spatially incoherent illumination. *Laser Phys. Lett.* **14**: 026202. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aa5242>
- Cheremkhin, P.A., Evtikhiev, N.N., Krasnov, V.V., Rodin, V.G., Ryabcev, I.P., Shifrina, A.V., Starikov, R.S.** (2021a). Lensless optical encryption with speckle-noise suppression and QR codes. *Appl. Opt.* **60**: 7336-7345. <https://doi.org/10.1364/AO.430968>
- Cheremkhin, P.A., Evtikhiev, N.N., Krasnov, V.V., Ryabcev, I.P., Shifrina, A.V., Starikov, R.S.** (2021b). New customizable digital data container for optical cryptosystems. *J. Opt.* **23**: 115701. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ac2166>
- Dou, S., Shen, X., Zhou, B., Lin, C., Lin, Y., Cheng, Y.** (2019). Security-enhanced nonlinear cryptosystem based on joint transform correlator. *Opt. Commun.* **445**: 211-221. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.04.011>
- Evtikhiev, N.N., Krasnov, V.V., Kuzmin, I.D., Molodtsov, D.Y., Rodin, V.G., Starikov, R.S., Cheremkhin, P.A.** (2020). QR-code optical encryption in the scheme with spatially incoherent illumination based on two micromirror light modulators. *Quantum Electron.* **50**: 195-196. <https://doi.org/10.1070/QEL17139>
- Françon, M.** (1975). Information processing using speckle patterns. En Dainty, C. *Laser speckle and related phenomena* (183-185). New York, Estados Unidos: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Goodman, J.W.** (1996). *Introduction to Fourier Optics* (232-2467) (2da Ed.). New York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Gluckstad, G., Riso, F.** (Junio 14, 2005). Optical encryption and decryption method and system. U.S. patent 6907124.
- Graydon, O.** (2013). Cryptography: Quick response codes. *Nat. Photon.* **7**: 343. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.127>
- Hai, H., Pan, S., Liao, M., Lu, D., He, W., Peng, X.** (2019). Cryptanalysis of random-phase-encoding-based optical cryptosystem via deep learning. *Opt. Express.* **27**: 21204-21213. <https://doi.org/10.1364/OE.27.021204>
- He, X., Jiang, Z., Kong, Y., Wang, S., Liu, C.** (2020). Optical multi-image encryption based on focal length multiplexing and multimode phase retrieval. *Appl. Opt.* **59**: 7801-7812. <https://doi.org/10.1364/AO.398459>
- Henao, R., Rueda, E., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2010). Noise-free recovery of opto-digital encrypted and multiplexed images. *Opt. Lett.* **35**: 333-335. <https://doi.org/10.1364/OL.35.000333>
- Hernández, M., Baquero, L., Gil, C., Cardenas, D.A., Gil, A.** (2018). Approach to the State of the Art of Ciberdelincuencia in Colombia. *Int. J. Appl. Eng. Res.* **13**: 16648-16655.
- International Organization for Standardization-ISO.** (2006). IEC 18004. Information technology - Automatic identification and data capture techniques - QR Code 2005 bar code symbology specification. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jaramillo-Osorio, A., Barrera-Ramírez, J.F., Velez-Zea, A., Torroba, R.** (2018). Fractional optical cryptographic protocol for data containers in a noise-free multiuser environment. *Opt. Lasers Eng.* **102**: 119-125. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.10.008>
- Jaramillo-Osorio, A., Barrera-Ramírez, J.F., Mira-Agudelo, A., Velez-Zea, A., Torroba, R.** (2020a). High performance compact optical cryptosystem without reference arm. *J. Opt.* **22**: 035702. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ab68f0>
- Jaramillo-Osorio, A., Mira-Agudelo, A., Velez-Zea, A., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2020b). Secure selective recovery protocol for multiple optically encrypted data. *Opt. Laser Eng.* **137**: 106383. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106383>
- Jaramillo-Osorio, A., Torres-Sepúlveda, W., Velez-Zea, A., Mira-Agudelo, A., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2022a). Focus-tunable experimental optical cryptosystem. *Opt. & Laser Technol.* **148**: 107689. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107689>

- Jaramillo-Osorio, A., Velez-Zea, A., Cabrera, H., Niemela, J., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2022b). Optical encryption using phase modulation generated by thermal lens effect. *J. Opt.* **24**: 025702. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ac4412>
- Javidi, B.** (Febrero, 2003). Method and Apparatus for Encryption Using Partial Information. U.S. Patent 6519340 B1.
- Javidi, B., Carnicer, A., Yamaguchi, M., Nomura, T., Pérez-Cabré, E., Millán, M.S., Nishchal, N.K., et al.** (2016). Roadmap on optical security. *J. Opt.* **18**: 083001. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/8/083001>
- Javidi, B., Esmail, A., Zhang, G.** (Marzo 23, 2010). Optical Security system using Fourier plane encoding. U.S. patent 7684098.
- Javidi, B. & Tajahuerce, E.** (Mayo 22, 2007). Information security using digital holography. U.S. patent 7221760 B2.
- Javidi, B., Towghi, N., Maghzi, N., Verrall S.C.** (2000). Error-reduction techniques and error analysis for fully phase- and amplitude-based encryption. *Appl. Opt.* **39**: 4117-4130. <https://doi.org/10.1364/AO.39.004117>
- Javidi, B., Zhang, G., Li, J.** (1996). Experimental demonstration of the random phase encoding technique for image encryption and security verification. *Opt. Eng.* **35**: 2506-2512. <https://doi.org/10.1117/1.600854>
- Jiao, S., Gao, Y., Lei, T., Yuan, X.** (2020). Known-plaintext attack to optical encryption systems with space and polarization encoding. *Opt. Express.* **28**: 8085-8097. <https://doi.org/10.1364/OE.387505>
- Jiao, S., Zhou, C., Shi, Y., Zou, W., Li, X.** (2019). Review on optical image hiding and watermarking techniques. *Opt. Laser Technol.* **109**: 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.011>
- Kafri, O. & Keren, E.** (1987). Encryption of pictures and shapes by random grids. *Opt. Lett.* **12**: 377-379. <https://doi.org/10.1364/OL.12.000377>
- Karimi, N., Basu, K., Chang, C.H., Fung, J.M.** (2021). Hardware Security in Emerging Technologies: Vulnerabilities, Attacks, and Solutions. *IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.* **11**: 223-227. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2021.3084498>
- Kaur, M., Singh, S., Kaur, M.** (2021). Computational Image Encryption Techniques: A Comprehensive Review. *Math. Probl. Eng.* **2021**: 5012496. <https://doi.org/10.1155/2021/5012496>
- Kumar, A. & Nishchal, N.** (2019). Quick response code and Interference-based optical asymmetric cryptosystem. *J. Inf. Secur. Appl.* **45**: 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2019.01.004>
- Kwok, S.K., Ting, J.S.L., Tsang, A.H.C., Lee, W.B., Cheung, B.C.F.** (2010). Design and development of a mobile EPC-RFID-based self-validation system (MESS) for product authentication. *Comput. Ind.* **61**: 624-35. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.02.001>
- Lázaro, J., Astarloa, A., Rodríguez, M., Bidarte, U., Jiménez, J.** (2021). A Survey on Vulnerabilities and Countermeasures in the Communications of the Smart Grid. *Electronics.* **10**: 1881. <https://doi.org/10.3390/electronics10161881>
- Li, H., Guo, C., Muniraj, I., Schroeder, B.C., Sheridan, J.T., Jia, S.** (2017a). Volumetric Light-field Encryption at the Microscopic Scale. *Sci. Rep.* **7**: 40113. <https://doi.org/10.1038/srep40113>
- Li, L., Jun Cui, T., Ji, W., et al.** (2017b). Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms. *Nat. Commun.* **8**: 197. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00164-9>
- Li, W.S., Shen, Y., Chen, Z.J., Cui, Q., Li, S.S., Chen, L.J.** (2017c). Demonstration of patterned polymer-stabilized cholesteric liquid crystal textures for anti-counterfeiting two-dimensional barcodes. *Appl. Opt.* **56**: 601-606. <https://doi.org/10.1364/AO.56.000601>
- Li, X., Zhao, M., Zhou, X., Wang, Q.H.** (2018). Ownership protection of holograms using quick-response encoded plenoptic watermark. *Opt. Express.* **26**: 30492-30508. <https://doi.org/10.1364/OE.26.030492>
- Liang, J., Gao, L., Hai, P., Li, C., Wang, L.V.** (2015). Encrypted Three-dimensional Dynamic Imaging using Snapshot Time-of-flight Compressed Ultrafast Photography. *Sci. Rep.* **5**: 15504. <https://doi.org/10.1038/srep15504>
- Liansheng, S., Cong, D., Minjie, X., Ailing, T., Anand, A.** (2019). Information encryption based on the customized data container under the framework of computational ghost imaging. *Opt. Express.* **27**: 16493-16506. <https://doi.org/10.1364/OE.27.016493>
- Lim, K.T.P., Liu, H., Liu, Y., Yang, J.K.W.** (2019). Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control. *Nat. Commun.* **10**: 25. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07808-4>

- Lima, J.B., Madeiro, F., Sales, F.J.R.** (2015). Encryption of medical images based on the cosine number transform. *Signal Process. Image Commun.* **35**: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.image.2015.03.005>
- Lin, C., Shen, X., Hua, B., Wang, Z.** (2015). Three-dimensional polarization marked multiple-QR code encryption by optimizing a single vectorial beam. *Opt. Commun.* **352**: 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.04.068>
- Liu, S., Guo, C., Sheridan, J.T.** (2014). A review of optical image encryption techniques. *Opt. Laser Technol.* **57**: 327-342. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.05.023>
- Liu, Z., Xu, L., Lin, C., Liu, S.** (2010). Image encryption by encoding with a nonuniform optical beam in gyrator transform domains. *Appl. Opt.* **49**: 5632-5637. <https://doi.org/10.1364/AO.49.005632>
- Lu, X.J., Yu, F.T.S., Gregory, D.A.** (1990). Comparison of Vander Lugt and joint transform correlators. *Appl. Phys. B.* **51**: 153-164. <https://doi.org/10.1007/BF00326017>
- Markman, A., Wang, J., Javidi, B.** (2014). Three-dimensional integral imaging displays using a quick-response encoded elemental image array. *Optica.* **1**: 332-335. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.1.000332>
- Meng, F., Umair, M.M., Zhang, S., Meng, Y., Tang, B.** (2021a). Facile fabrication of encryption composite materials with trilayer quasi-amorphous heterostructure. *Sci China Mater.* **64**: 909-919. <https://doi.org/10.1007/s40843-020-1500-9>
- Meng, Y., Chen, Y., Lu, L., et al.** (2021b). Optical meta-waveguides for integrated photonics and beyond. *Light Sci. Appl.* **10**: 235. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00655-x>
- Millán, M.S.** (2012). Advanced optical correlation and digital methods for pattern matching-50th anniversary of Vander Lugt matched filter. *J. Opt.* **14**: 10300. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/14/10/103001>
- Mosso, F., Tebaldi, M., Barrera-Ramírez, J.F., Bolognini, N., Torroba, R.** (2011a). All-optical encrypted movie. *Opt. Express.* **19**: 5706-5712. <https://doi.org/10.1364/OE.19.005706>
- Mosso, F., Tebaldi, M., Barrera-Ramírez, J.F., Bolognini, N., Torroba, R.** (2011b). Pure optical dynamical color encryption. *Opt. Express.* **19**: 13779-13786. <https://doi.org/10.1364/OE.19.013779>
- Mughaid, A., Al-Arjan, A., Rasmi, M., AlZu'bi, S.** (2021). Intelligent security in the era of AI: The key vulnerability of RC4 algorithm. *International Conference on Information Technology (ICIT)* (691-694). <https://doi.org/10.1109/ICIT52682.2021.9491709>
- Nomura, T. & Javidi B.** (2000). Optical encryption using a joint transform correlator architecture. *Opt. Eng.* **39**: 2031-2035. <https://doi.org/10.1117/1.1304844>
- Nomura, T., Pérez-Cabré, E., Millán, M.S., Javidi, B.** (2009). Optical Techniques for Information Security. *Proc. IEEE.* **97**: 1128-1148. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2018367>
- Paganin, D.M.** (2011). *Spotlight on Optics: All-optical encrypted movie*. Optica Publishing Group. Fecha de consulta: noviembre de 2021. Disponible en: <https://www.osapublishing.org/spotlight/summary.cfm?uri=oe-19-6-5706>
- Peng, X., Zhang, P., Wei, H., Yu, B.** (2006). Known-plaintext attack on optical encryption based on double random phase keys. *Opt. Lett.* **31**: 1044-1046. <https://doi.org/10.1364/OL.31.001044>
- Petriashvili, G., Devadze, L., Chanishvili, A., Zurabishvili, C., Sepashvili, N., Ponjavidze, N., De Santo, M.P., Barberi, R.** (2018). Spiropyran doped rewritable cholesteric liquid crystal polymer film for the generation of quick response codes. *Opt. Mater. Express.* **8**: 3708-3716. <https://doi.org/10.1364/OME.8.003708>
- Pile, D.** (2010). Optical encryption: The ghost holds a secret. *Nat. Photon.* **4**: 587. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.206>
- Ponjavidze, N., De Santo, M.P., Barberi, R.** (2018). Spiropyran doped rewritable cholesteric liquid crystal polymer film for the generation of quick response codes. *Opt. Mater. Express.* **8**: 3708-3716. <https://doi.org/10.1364/OME.8.003708>
- Qin, Y., Gong, Q., Wang, H., Wang, Z.** (2018a). Authentication-based optical cryptosystem with noise-free information retrieval. *Opt. Commun.* **426**: 325-332. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.05.079>
- Qin, Y., Wang, Z., Wang, H., Gong, Q., Zhou, N.** (2018b). Robust information encryption diffractive-imaging-based scheme with special phase retrieval algorithm for a customized data container. *Opt. Lasers Eng.* **105**: 118-124. <https://doi.org/10.1364/OE.27.016493>
- Qin, Y. & Zhang, Y.** (2017). Information Encryption in Ghost Imaging with Customized Data Container and XOR Operation. *IEEE Photon. J.* **9**: 1-8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2690314>

- Qu, G., Yang, W., Song, Q., Liu, Y., Qiu, C.W., Han, J., Tsai, D.P., Xiao, S.** (2020). Reprogrammable meta-hologram for optical encryption. *Nat. Commun.* **11**: 5484. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07808-4>
- Refregier, P. & Javidi, B.** (1995). Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding. *Opt. Lett.* **20**: 767-769. <https://doi.org/10.1364/OL.20.000767>
- Reshef, O., DelMastro, M.P., Bearne, K.K.M. et al.** (2021). An optic to replace space and its application towards ultra-thin imaging systems. *Nat. Commun.* **12**: 3512. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23358-8>
- Rueda, E., Barrera-Ramírez J.F., Henao, R., Torroba, R.** (2009a). Optical encryption with a reference wave in a joint transform correlator architecture. *Opt. Commun.* **282**: 3243-3249. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.05.022>
- Rueda, E., Barrera-Ramírez J.F., Henao, R., Torroba, R.** (2009b). Lateral shift multiplexing with a modified random mask in a joint transform correlator encrypting architecture. *Opt. Eng.* **48**: 27006. <https://doi.org/10.1117/1.3080753>
- Saini, N. & Sinha, A.** (2015). Video encryption using chaotic masks in joint transform correlator. *J. Opt.* **17**: 035701. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/3/035701>
- Shi, X. & Zhao, D.** (2011). Color image hiding based on the phase retrieval technique and Arnold transform. *Appl. Opt.* **50**: 2134-2139. <https://doi.org/10.1364/AO.50.002134>
- Singh, M., Kumar, A., Singh, K.** (2008). Multiplexing in optical encryption by using an aperture system and a rotating sandwich random phase diffuser in the Fourier plane. *Opt. Lasers Eng.* **46**: 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.10.001>
- Singh, M., Kumar, A., Singh, K.** (2009). Encryption and decryption using a sandwich phase diffuser made by using two speckle patterns and placed in the Fourier plane: Simulation results. *Optik*. **120**: 916-922. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2008.03.025>
- Situ, G. & Zhang, J.** (2005). Multiple-image encryption by wavelength multiplexing. *Opt. Lett.* **30**: 1306-1308. <https://doi.org/10.1364/OL.30.001306>
- Sui, L., Xu, M., Tian, A.** (2017). Optical noise-free image encryption based on quick response code and high dimension chaotic system in gyrator transform domain. *Opt. Laser Eng.* **91**: 106-114. <https://doi.org/10.1364/AO.59.000474>
- Tanha, M., Kheradmand, R., Ahmadi-Kandjani, S.** (2012). Gray-scale and color optical encryption based on computational ghost imaging. *Appl. Phys. Lett.* **101**: 28-31. <https://doi.org/10.1063/1.4748875>
- Tebaldi M., Horrillo, S., Pérez-Cabré, E., Millán, M.S., Amaya, D., Torroba, R. et al.** (2011). Experimental color encryption in a joint transform correlator architecture. *J. Phys. Conf. Ser.* **274**: 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/274/1/012054>
- Ting, S.L. & Tsang, A.H.C.** (2013). A two-factor authentication system using Radio Frequency Identification and watermarking technology. *Comput. Ind.* **64**: 268-79. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.11.002>
- Torroba, R. & Barrera-Ramírez, J.F.** (2015). Protección de datos usando un sistema experimental de encriptación de correlador de transformada conjunta. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **39**: 55-60. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.263>
- Treacy, S.** (2013). The creative power of Colaboration. The world Academy of Sciences TWAS. Fecha de consulta: noviembre de 2021. Disponible en: <https://twas.org/article/creative-power-collaboration>
- Trejos, S., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2015). Optimized and secure technique for multiplexing QR code images of single characters: Application to noiseless messages retrieval. *J. Opt.* **17**: 085702. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/8/085702>
- Unnikrishnan, G., Joseph, J., Singh, K.** (1998). Optical encryption system that uses phase conjugation in a photorefractive crystal. *Appl. Opt.* **31**: 8181-8186. <https://doi.org/10.1364/AO.37.008181>
- Vander-Lugt, A.** (1964). Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Trans. Inf. Theory.* **10**: 139-145. <https://doi.org/10.1109/TIT.1964.1053650>
- Velez-Zea, A., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2016a). Three-dimensional joint transform correlator cryptosystem. *Opt. Lett.* **41**: 599-602. <https://doi.org/10.1364/OL.41.000599>
- Velez-Zea A., Barrera-Ramírez J.F., Torroba, R.** (2016b). Customized data container for improved performance in optical cryptosystems. *J. Opt.* **18**: 125702. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/12/125702>
- Velez-Zea, A., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2017a). Experimental optical encryption of grayscale information. *Appl. Opt.* **56**: 5883-5889. <https://doi.org/10.1364/AO.56.005883>

- Velez-Zea, A., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2017b). Innovative speckle noise reduction procedure in optical encryption. *J. Opt.* **19**: 055704. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa6526>
- Velez-Zea, A., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2017c). Cryptographic salting for security enhancement of double random phase encryption schemes. *J. Opt.* **19**: 105703. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa8738>
- Velez-Zea, A., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2018). Optimized random phase encryption. *Opt. Lett.* **43**: 3558-3561. <https://doi.org/10.1364/OL.43.003558>
- Velez-Zea, A., Barrera-Ramírez, J.F., Torroba, R.** (2019). Secure real-time generation and display of color holographic movies. *Opt. Lasers Eng.* **122**: 239-244. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.06.010>
- Vilardy, J.M., Millán, M.S., Pérez-Cabre, E.** (2013). Improved decryption quality and security of a joint transform correlator-based encryption system. *J. Opt.* **15**: 025401. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/2/025401>
- Vilardy, J.M., Millán, M.S., Pérez-Cabré, E.** (2014). Nonlinear optical security system based on a joint transform correlator in the Fresnel domain. *Appl. Opt.* **53**: 1674. DOI: 10.1364/AO.53.001674
- Vilardy, J.M., Millán, M.S., Pérez-Cabré, E.** (2017). Nonlinear image encryption using a fully phase nonzero-order joint transform correlator in the Gyrator domain. *Opt. Lasers Eng.* **89**: 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.02.013>
- Vilardy, J.M., Barba, L., Torres, C.O.** (2019a). Image Encryption and Decryption Systems Using the Jigsaw Transform and the Iterative Finite Field Cosine Transform. *Photonics*. **6**: 121 (2019a). <https://doi.org/10.3390/photonics6040121>
- Vilardy, J.M., Pérez, R.A., Torres, C.O.** (2019b). Optical Image Encryption Using a Nonlinear Joint Transform Correlator and the Collins Diffraction Transform. *Photonics*. **6**: 115. <https://doi.org/10.3390/photonics6040115>
- Verified Market Research-VMR.** Encryption Software Market Size And Forecast to 2025. Fecha de consulta noviembre de 2021. Disponible en: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/global-encryption-software-market-size-and-forecast-to-2025/>
- Wang, C.H., Hwang, Y.S., Wang, H.C., Wang, Y.L, Tsai, K.Y.** (2020). Microstructure overlapping image application with optical decryption. *J. Opt. Soc. Am. A* **37**: 1361-1368. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.393182>
- Wang, K., Liang, J., Chen, R., Gao, Z., Zhang, C., Yan, Y., Yao, J., Zhao, Y.S.** (2021). Geometry-Programmable Perovskite Microlaser Patterns for Two-Dimensional Optical Encryption. *Nano Lett.* **21**: 6792-6799. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c01423>
- Wang, W.C. & Schipf, D.R.** (Junio 13, 2019). Fluid-optical encryption system and method thereof. US patent 0182407 A1.
- Wang, L., Wu, Q., Situ, G.** (2019). Chosen-plaintext attack on the double random polarization encryption. *Opt. Express* **27**: 32158-32167. <https://doi.org/10.1364/OE.27.032158>
- Wang, Q., Rogers, E., Gholipour, B. et al.** (2016). Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials. *Nat. Photon.* **10**: 60-65. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.247>
- Weaver, C.S., Goodman, J.W.** (1966). A Technique for Optically Convolution Two Functions. *Appl. Opt.* **5**: 1248-1249. <https://doi.org/10.1364/AO.5.001248>
- Wu, H., Li, Q., Meng, X., Yang, X., Liu, S., Yin, Y.** (2021). Cryptographic analysis on an optical random-phase-encoding cryptosystem for complex targets based on physics-informed learning. *Opt. Express*. **29**: 33558-33571. <https://doi.org/10.1364/OE.441293>
- Wu, J., Wang, J., Nie, Y., Hu, L.** (2019). Multiple-image optical encryption based on phase retrieval algorithm and fractional Talbot effect. *Opt. Express*. **27**: 35096-35107. <https://doi.org/10.1364/OE.27.035096>
- Yan, A., Lu, C., Yu, J., Tang, M., Dong, J., Hu, Z., Zhang, H.** (2019). Multiple-image encryption based on angular-multiplexing holography with quick response code and spiral phase keys. *Appl. Opt.* **58**: G6-G10.
- Yong-Liang, X., Xin, Z., Sheng, Y., Qiang, L., Yang-Cong, L.** (2009). Multiple-image optical encryption: an improved encoding approach. *Appl. Opt.* **48**: 2686-2692. <https://doi.org/10.1364/AO.48.002686>
- Zhang, L., Wang, Y., Li, D-H, Li, Q., Zhao, W., Li, X.** (2021). Cryptanalysis for a light-field 3D cryptosystem based on M-cGAN. *Opt. Lett.* **46**: 4916-4919. <https://doi.org/10.1364/OL.436049>

-
- Zhang, L., Wang, Y., Zhang, D.** (2022). Research on multiple-image encryption mechanism based on Radon transform and ghost imaging. *Opt. Commun.* **504**: 127494. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127494>
- Zhong, Z., Zhang, Y., Shan, M., Wang, Y., Zhang, Y., Xie, H.** (2014). Optical movie encryption based on a discrete multiple-parameter fractional Fourier transform. *J. Opt.* **16**: 125404. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/12/125404>
- Zhou, N., Li, H., Wang, D., Pan, S., Zhou, Z.** (2015). Image compression and encryption scheme based on 2D compressive sensing and fractional Mellin transform. *Opt. Commun.* **343**: 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.12.084>
- Zhu, L., Wang, A., Deng, M., Lu, B., Guo, X.** (2021). Experimental demonstration of multiple dimensional coding decoding for image transfer with controllable vortex arrays. *Sci. Rep.* **11**: 12012. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91553-0>
- Zhu, Y., Xu, W., Shi, Y.** (2019). High-capacity encryption system based on single-shot-ptychography encoding and QR code. *Opt. Commun.* **435**: 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.11.040>

Original article

Environmental changes during the last 1800 years in the Neguanje mangrove, Tayrona National Natural Park, Colombian Caribbean

Cambios ambientales en los últimos 1800 años en el manglar de Neguanje, Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano

Yennifer García-M., J. Orlando Rangel-Ch.*, Alexis Jaramillo-J

Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Abstract

We reconstructed changes in vegetation and climate conditions during the last 1800 years in a column of sediment 4 m deep (Playa Pozo sector, Neguanje Bay, Tayrona National Natural Park, department of Magdalena, Colombia). We characterized the main components (mineral elements, organic matter), micro-stratigraphy (types of organic matter), humidity variations (%), organic and inorganic carbon, and palynological associations (specifically pollen grains), and counted spores of fungi, algae, ferns, plant debris, and insects. The palynological associations (dominant elements) were defined and related to the current types of vegetation. The definition of the dominant groups in the palynological spectrum and their relationship with the current vegetation types was associated with the stratigraphic conditions of the sediments to detect the changes that occurred during this period. In the reconstruction of the paleoenvironments, we determined the relationship between the defined palynological associations and the stratigraphy of the sediments, the humidity (precipitation), and the covered area. For this purpose, we used the temperature calibration curves of the last 2000 years proposed by various authors. We did not recover enough palynomorphs at the base of the column between 400 and 380 cm deep (2000-1693 years BP), but organic components of marine origin predominated in the sediment, a condition associated with a warm period in the central and eastern Colombian Caribbean coastal environments. In zone I (1693-1294 years B.P.), the mangrove was consolidated and in zone II (1294-1078 years A.P.), it expanded with the vegetation of flooded areas. In zone III (1078-654 years B.P.), we detected the occurrence of the greatest mangrove development, especially by the dominant species *Rhizophora mangle*. In zones IV and V (654 years A.P.-present), the mangrove cover decreased. This period was less warm than the previous ones, similar to the prevailing conditions in the *Ciénaga Grande de Santa Marta* and its surroundings.

Keywords: Mangroves; Late Holocene; Paleoecology; Coastal environments; Colombian Caribbean.

Resumen

Se reconstruyeron los cambios en la vegetación y en las condiciones del clima durante los últimos 1800 años en una columna de sedimento de 4 m de profundidad (sector Playa Pozo, bahía de Neguanje, Parque Nacional Natural Tayrona, Magdalena, Colombia). Se caracterizaron los componentes principales (elementos minerales, materia orgánica), la micro-estratigrafía (clases de materia orgánica), las variaciones de humedad (%), el carbono orgánico e inorgánico y las asociaciones palinológicas (específicamente granos de polen). También se contaron esporas de hongos, algas, helechos, y restos de plantas e insectos. Se definieron las asociaciones palinológicas (elementos dominantes) y se relacionaron con los tipos actuales de vegetación. En la reconstrucción de los paleoambientes se estableció la relación de las asociaciones palinológicas definidas y la estratigrafía de los sedimentos con la humedad (precipitación) y el área cubierta. Se utilizaron las curvas de calibración de temperatura de los últimos 2000 años propuestas por varios autores para este propósito. En la base de la columna, entre los 400 y 380 cm de profundidad (2000-1693 años A.P.) no se recuperaron suficientes palinomorfos, pero en el sedimento predominaron los componentes

Citation: García-M. Y, Rangel-Ch. JO, Jaramillo-J A. Environmental changes during the last 1800 years in the Neguanje mangrove, Tayrona National Natural Park, Colombian Caribbean. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):90-107, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1518>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**

Orlando Rangel-Ch.;
jorangelc@unal.edu.co

Received: July 15, 2021

Accepted: November 16, 2021

Published on line: December 15, 2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

orgánicos de origen marino, condición que se asoció con un periodo cálido en ambientes costeros del Caribe colombiano. En la zona I (1693-1294 años A.P.) se consolidó el manglar y en la zona II (1294-1078 años A.P.) su extensión se amplió a la par con la vegetación de las zonas inundables. En la zona III (1078-654 años A.P.) se presentó el mayor desarrollo del manglar, especialmente de la especie dominante *Rhizophora mangle*. En las zonas IV y V (654 años A.P.-actual) disminuyó el cubrimiento del manglar y el período fue menos cálido que los anteriores, condición similar a la que prevaleció en la Ciénaga Grande de Santa Marta y alrededores.

Palabras clave: manglares; Holoceno tardío; paleoecología; ambientes costeros; Caribe colombiano.

Introduction

The physiography of the Colombian Caribbean is composed of geomorphic units associated with high coasts, such as hills and massifs, elevated abrasion platforms, marine terraces, eroded rock formations, and glacis or inclined planes, as well as units associated with coastal lowlands including coastal plains, floodplains, estuaries, coastal lagoons, mudflats, dunes, beaches, pins, rods, bars, and reef platforms (Ingeominas, 1996). Depending on rain annual amount and distribution, there are 14 climate units in three provinces: arid to dry in the north, dry to humid in the central area, and humid to very humid in the south. The Tayrona National Natural Park, Santa Marta, department of Magdalena, Colombia (between 11°18' and 11°21' N and 74°4' and 74°7' W) is a low massif with ecogeographic components such as estuaries, beaches and cliffs, lake environments, and hills (El Cielo at 500 m of altitude).

Geological formations in the study area comprise a representation of Tertiary material including Neogene sediments, Miocene and Pliocene rocks, Eocene plutonic and sedimentary rocks, and Paleocene-Eocene volcanic materials. Mesozoic materials are associated with metamorphic rocks from the Upper Cretaceous and Jurassic. The Quaternary sediments are recognizable in flat areas with valleys of colluvial and alluvial influence partly found in the maritime zone forming sedimentary lagoons behind the marine bars. Additional information on the Caribbean region of Colombia and the Tayrona National Natural Park study area can be accessed at www.colombiaversidadbiotica.com.

The soils have moderately coarse textures (loamy-sandy) on igneous or mixed materials and medium textures (loamy and loamy-silty) on metamorphic and mixed materials (Cortés, 1975). The humidity gradient varies from west to east: very dry (500 mm) near Taganga - Santa Marta, and humid (1400 mm) near Arrecifes - Cañaveral with a transition spot in the Bay of Cinto (Figure 1). The precipitation regime is bimodal and tetra-seasonal with two rainy periods (May to June and September to November) and two dry periods (December to April and July to August). The average annual temperature is 27 °C (Rangel & Carvajal, 2012).

Materials and methods

Study area

Neguanje Bay is located at the central-western coastal zone of the park bordered on the West and East by two South-North oriented hill ranges reaching up to 150 meters which separate it from the Gayraca and Cinto Bays, respectively (Figure 1). The southern limit is defined by high and low hills that gradually descend to the sea and are part of the maritime drainage system of the park hydrographic complex. These hills harbor small ravines and channels that reduced streams and remain dry for most of the year (Carbon-D. & García-Q., 2010).

Cortés-C. (2017) characterized the Caribbean mangrove vegetation and determined the phytosociological arrangement including the *Lagunculario racemosae-Avicennion germinantis* alliance present in the Neguanje area. The arboreal stratum of these forests is formed by *L. racemosa* and *Hilairanthus germinans* but *Rhizophora mangle* is very poorly represented while the fern *Acrostichum aureum* grows densely on the herbaceous

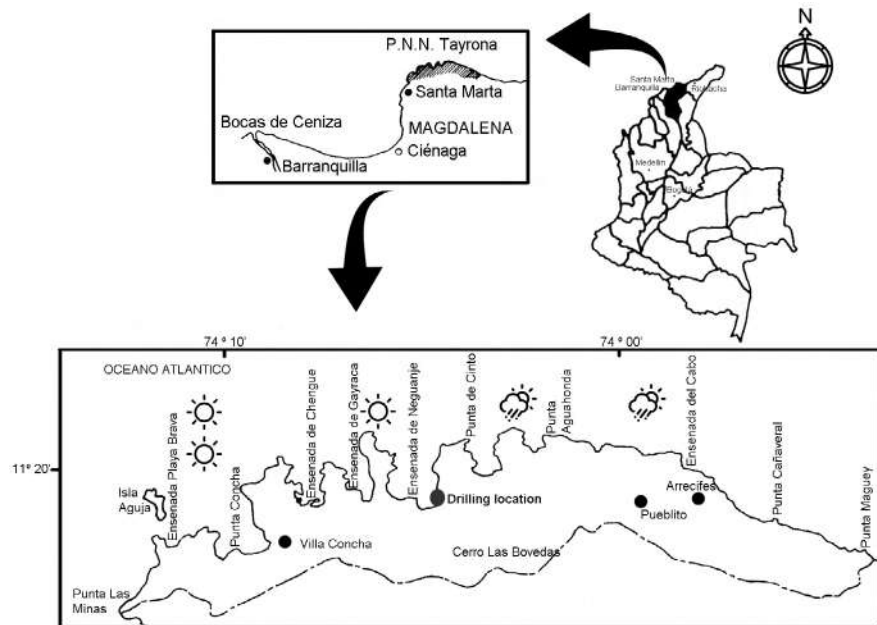


Figure 1. Location of Tayrona N.N.P. drilling at Neguanje bay and rainfall gradient on the study area

stratum. The *L. racemosae*-*A. germinantis* association also includes other species from the surrounding wet and dry forests, such as *Libidibia coriaria*, *Pithecellobium dulce*, *Ficus matiziana*, and *Maclura tinctoria*.

The beaches and flooded areas harbor larger thickets communities dominated by *Solanum campechiense* growing together with *Heliotropium indicum*, *Alternanthera paronychioides*, *Glinus radiatus*, *Portulaca oleracea*, *Mimosa dormiens*, *Euphorbia hirta*, and *Tarenaya (Cleome) spinosa*. The slopes are covered by forests composed of *Handroanthus billbergii*, *Libidibia punctata*, and *Capparis* (sensu lato) species, as well as communities dominated by *Astronium graveolens*, which is quite similar in its floristic composition to the forests located in the hills around Santa Marta (Carbonó & García, 2010; Rangel, 2012).

Landscape transformation events have occurred in the swamp including local ones: subsidence and uplift of blocks, ancient coral bars, and coastal terraces (Robertson & Martínez, 1999), as well as global ones: earthquakes and tsunamis in the Caribbean (Quintero, et al., 2020; Bolívar, et al., 2019), and fluctuations in the sea level, regressions and transgressions (Beltrán, 2015), which have influenced on the evolution of the territory. The effects of the tectonics, the variations in the sea surface temperature, and the precipitation have also been reflected in the changes in the stratigraphic and biostratigraphic sequences (Jaramillo, et al., 2012).

Fieldwork and laboratory analysis

In Neguanje (Playa Pozo sector at the Tayrona N.N.P.), we recovered a 4 m-deep column of sediment. We described the core stratigraphy in the field and then sealed and transported the sample in 50 x 5 cm plastic tubes to the palynology and paleoecology laboratory at the *Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia*. A portion of the sediments was used for detailed stratigraphic and LOI (loss on ignition) analyses and carbon-14 dating.

We used the acetolysis methodology for the physicochemical preparation to extract the palynomorphs in the sample from the column and the two samples from the surface for recent pollen sedimentation analysis (Erdtman, 1986). The final part of the samples was subjected to flotation treatment with zinc chloride ($ZnCl_2$) (D'Antoni, 2008).

The slides samples for the palynological analysis were prepared using gelatin-glycerin according to the Kisser formula (Brown, 1960). Each sample was studied under a Zeiss Primo Star light microscope and we counted the maximum number of palynomorphs (grains, fungal spores, and ferns) and other palynomorphs (algae, plant, and insect remains). We made the taxonomic identification of the pollen grains based on the atlases of Roubik & Moreno (1991), Jiménez, *et al.* (2008), and García-M., *et al.* (2011) and comparing with the reference collections of the *Palinoteca del Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia*. In some cases, the microscopic analysis effort included several sheets of one depth to reach a minimum number of palynomorphs (Table 1), which explains the lack of uniformity in the class intervals (depth).

A set of samples were selected and sent to the BETA Analytic Laboratory (Florida) and to the University of Colorado (USA) for carbon-14 dating. The dates (14C ages) supplied by the laboratories followed standardized protocols and were based on the

Table 1. Counts of palynomorphs per analyzed sample

Depth (cm)	Pollen grains + spores	Other palynomorphs (phytoclasts, fungiclasts, fungisporos)	Total palynomorphs	Included in pollen sum (grains and spores)
1	167	87	254	162
5	84	15	99	82
11	105	11	116	97
17	64	52	116	64
33	56	79	135	53
50	Loss of material			
55	94	67	161	94
60	82	33	115	81
65	58	26	84	58
70	103	108	211	102
80	130	71	201	130
87	112	75	187	111
95	95	73	168	95
100	150	101	251	150
105	116	64	180	116
110	116	49	165	116
115	101	82	183	101
120	140	31	171	139
125	160	139	299	160
130	169	179	348	169
135	117	176	293	117
140	107	110	217	107
147	67	289	356	67
155	84	142	226	84
160	82	189	271	79
167	59	152	211	58
175	81	75	156	81
182	97	301	398	97

Depth (cm)	Pollen grains + spores	Other palynomorphs	Total palynomorphs	Included in pollen sum (grains and spores)
190	93	262	355	93
195	60	244	304	60
200	71	81	152	71
212	65	266	331	65
220		Hiatus - No pollen recovery		
225		Hiatus - No pollen recovery		
230	108	157	265	106
235	104	275	379	104
240	115	280	395	113
245	91	117	208	91
252	45	189	234	44
260	63	66	129	61
265	50	91	141	50
270	82	119	201	82
275	99	320	419	97
280	115	62	177	113
285	121	236	357	119
290	100	314	414	98
295	86	299	385	84
302	57	155	212	56
310	76	85	161	76
322	93	172	265	91
332	107	129	236	107
340	90	221	311	90
345	139	308	447	137
350	97	126	223	94
355	63	120	183	63
362	101	180	281	99
372	99	246	345	98
380	99	411	510	96
385				
390				
395		Very low amount of pollen recovered		
400				

IntCal20 calibration (Reimer, *et al.*, 2020); they appear in the column marked with * in the palynological diagrams. Sedimentation rates were estimated according to the zonation of the palynological diagram. In all cases, both the depth at which the original sample was taken and the width of the intervals of each of the zones appear in the column (Table 2) We conducted sedimentological (microstratigraphic) and main components analyses for the bottom sediments (Jaramillo, *et al.*, 2012, Coronel, 2013).

To determine the reservoir capacity of the sediments, we used the loss of mass by calcination method (LOI) (Dean, 1974). We estimated LOI at 105°C (moisture %), LOI at 550°C (organic carbon %), and LOI at 950°C (inorganic carbon %) to establish the system's

Table 2. C¹⁴ ages, calibrated ages, and sedimentation rate, Playa Pozo-Neguanje

Deep (cm)	Laboratory	C ¹⁴ age	Calibrated age BP
123 (shells)	Colorado U.	1100 ± 20	1007
161 (shell/coral)		1120 ± 20	1011
197 (shells)	Beta Analytic	1120 ± 30	1039
305 (shells)		1270 ± 30	1120
377 (shells)	Colorado U.	1710 ± 20	1581
398 (shells)	Beta Analytic	2230 ± 30	1745
Estimated sedimentation rates			
Deep (cm)	Polen zone	Sedimentation rate (cm/year)	
33 – 1	V	0.12	
70 – 55	IV	0.12	
200 - 80	III	0.31	
310 - 230	II	0.90	
380 – 322	I	0.15	

organic reservoir capacity also by means of the LOI method (Dean, 1974). According to Eriksoon & Olsson (2015), the organic matter of continental origin comes from the vegetation near the study site. It may indicate high primary productivity related (in our case) to the extension or reduction of forest vegetation (flooded areas and mainland slopes). Therefore, the marine-origin organic matter is associated with mangrove vegetation; LOI values at 950 °C refer to the carbonate content in the sediments originating from elements of marine origin (corals, shells).

For the palynological diagrams, we used the Tilia software (version 1.7.16; Grimm, 2002) and the elements included in the pollen sum were those from reliable ecological and phytogeographic information sources while the spores of ferns, fungi, and other palynomorphs whose autecology and other ecological characteristics were not well documented were grouped under the name “elements not included in the pollen sum.” Finally, two surface sediment samples (recent pollen rain) were also analyzed.

For the phytoecological segregation of the palynomorphs (grains, spores) found in the sediments, we followed the recommendations of Rangel (2012), Cortés-C. & Rangel-Ch. (2013), and Cortés-C. (2017). We conducted surface sample or current pollen rainfall analyses throughout the entire column inside the palynological diagrams including the elements explained in the next section.

Elements included in the pollen sum

The following elements (genera, species), whose grains appear in the group included in the sum, were selected because their ecological characteristics and geographical distribution patterns reinforce the segregation.

Mangrove vegetation. *R. mangle*, *H. germinans*, *L. racemosa*, *Conocarpus erectus*, and *A. aureum*.

Aquatic and swamp vegetation. *Cyperus* sp., Poaceae, *Ambrosia peruviana*, and *Althernanthera* aff. *paronychioides*. Other elements with values below 1% clustered in the curve were tagged as diverse aquatic-swamp vegetation (*Cabomba* aff. *caroliniana*, *Ipomoea* sp., *Scleria* sp., *Eclipta* sp., *Persicaria* sp. (*Polygonum*) sp., *Amaranthaceae*, *Hibiscus* sp., and *Convolvulaceae*).

Floodplain vegetation included *Mascagnia macradena*, *Margaritaria nobilis*, *Phyllanthus* sp., *Cissus* aff. *biformifolia*, *Euphorbia* aff. *thymifolia*, *Solanum* sp., *S.* aff. *jamaicense*, *S.* aff. *umbellatum*, *Ficus* sp., *Bactris* sp., *Jacquemontia* sp., and *Sapium* sp. Other elements were gathered in diverse-floodable areas where their pollen representation

was less than 1%; these taxa were represented by *Cissus* aff. *fuliginea*, *Tournefortia* sp., *Euphorbia* aff. *hirta*, *Solanum* aff. *hayessii*, *Capsicum* sp., *Arrabidaea* sp., *Iseia* sp., *Hiraea* sp., *Alibertia* sp.

Slope vegetation of the mainland (tropical dry forest) was composed of *Celtis* sp., *Acalypha* sp., *Protium* sp., *Mabea* sp., *Anacardium* sp., *Handroanthus* sp., Fabaceae, Asteraceae, *Prestoea* sp., and Arecaceae. Other species were assembled in a curve under the name mainland-diverse slopes. The pollen representation of this group was below 1% and the taxa identified were *Spermacoce* sp., *Sabicea* sp., *Psychotria* sp., Rubiaceae (aff. *Psychotria*), *Alchornea* sp., *Casearia* sp., *Croton* sp., *Sida* sp., *Faramea* sp., *Faramea occidentalis*, *Maripa* sp., *Geophila* sp., *Justicia* sp., *Spondias* sp., *Schefflera* sp., *Tabebuia* sp., *Bursera* sp., *Cedrela* sp., *Jatropha* sp., *Chelonanthus* sp., *Peperomia* sp., Euphorbiaceae, Rubiaceae, Moraceae, Mimosaceae, Bignoniaceae, Boraginaceae, and Bombacoideae (Malvaceae).

Elements not included in the pollen sum

These were pollen grains: Asteraceae (indeterminate) type *Jacquemontia*, *Podocarpus* sp.; algae: *Pseudochizaea*; fern spores: *Polypodium* (Polypodiaceae); fungi spores: fungi spores, ascospores, and other palynomorphs: phytoclasts, zooclasts, and fungiclasts.

Here we document the major paleoenvironmental changes that occurred in the study area during the last 2000 years based on stratigraphic, sedimentological, and palynological analyses on a 4-m-deep borehole. Our research questions addressed the variations in the floristic composition of the vegetation types and their extension, especially the mangrove swamp, and their relationships with climatic characteristics (precipitation).

Results

Stratigraphy

In the 400-cm-deep core located in Playa Pozo (11°19' - 17.02" N; 74°04' - 35.99" W), the stratigraphic sequence corresponded mainly to clays with enriched levels of silt, sandy silt, and sands towards the middle of the column (**Figure 2**).

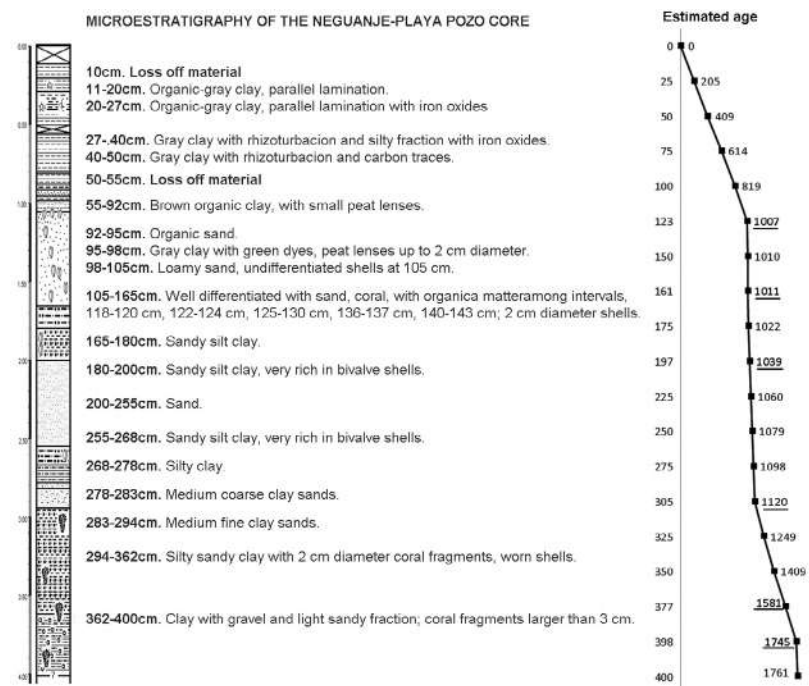


Figure 2. Microstratigraphy of the Neguanje nucleus (left) (Coronel, 2013). Age model (right)

Moisture-carbon-loss on ignition (LOI)

We differentiated four areas in the three figures that were used for the description.

Humidity (LOI at 105° C). In zone I, between 400 and 300 cm deep, the values fluctuated between 14% and 30% and up to 40%; in zone II, from 300 to 200 cm, variations were between 5% and 30% with a maximum value of 48%; in zone III, from 200 to 100 cm, values were between 10% and 20% and as high as 40% this being the zone with the lowest humidity in the entire core; in zone IV, between 100 and 1 cm, values ranged from 30% to 40% and up to a maximum of 54%, this being the zone with the highest humidity of the entire nucleus (**Figure 3A**).

Organic carbon (LOI at 550 ° C). In zone I, we registered values between 2% and 4% and as high as 36%, this being the zone with the lowest values; in zone II (300-200 cm), values ranged from 4% to 10% and reached as high as 24%; in zone III (200-100 cm), values were between 10% and 20% with up to 40%-54%, this being the highest value in this component; in zone IV (100 – 1 cm), values ranged from 4% to 6% and the extreme values reached 20% (**Figure 3B**).

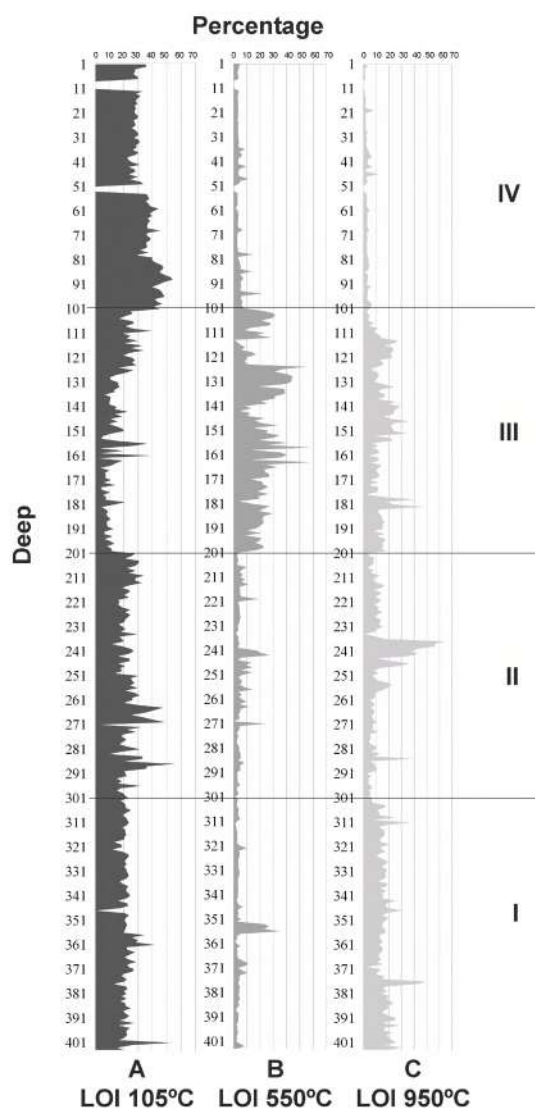


Figure 3. Moisture and organic and inorganic carbon values (LOI at 105°C, 550°C, and 950°C) from Neguanje core

Inorganic carbon (LOI at 950 ° C). In zone I, values were between 2% and 15% with extreme points of 30% and up to 48%; in zone II, we registered values from 10% to 14% and as high as 40% and 60%; zone III had the highest values ranging between 12% and 16% and as high as 32% and 40% while zone IV had the lowest values, between 4% and 10% (**Figure 3C**).

Main components and class (origin) of organic matter in sediment

Figure 4A shows the contents (%) of mineral and organic components throughout the sediment column. In the four differentiated zones (the entire nucleus), there is a high content of mineral fraction (between 60% and 80%) with the highest values in zone II.

The following was the distribution of organic matter components and their origin (continental or marine) (**Figures 4B, 4C**):

In zone I, 401 to 302-cm deep, marine origin components were predominant (corals, shells, jaws, fish bones, and an array of calcareous structures), with an average of 21% and extreme variations between 6% and a maximum of 46%, while the components of continental origin (peat, autochthonous and allochthonous coal, roots, stems, and wood) had an average value of 6.3% and values as low as 3%.

In zone II, 301 to 202 cm, there was a slight predominance of continental components with a mean of 9% and extremes of 20%, and an average of 7% with extremes of 12% in marine components.

Zone III, 201 to 102 cm, exhibited a shared domain with continental-origin components of 11.7% on average and maximum values of 23% and marine components with an average of 11.2% and maximum values of 31%.

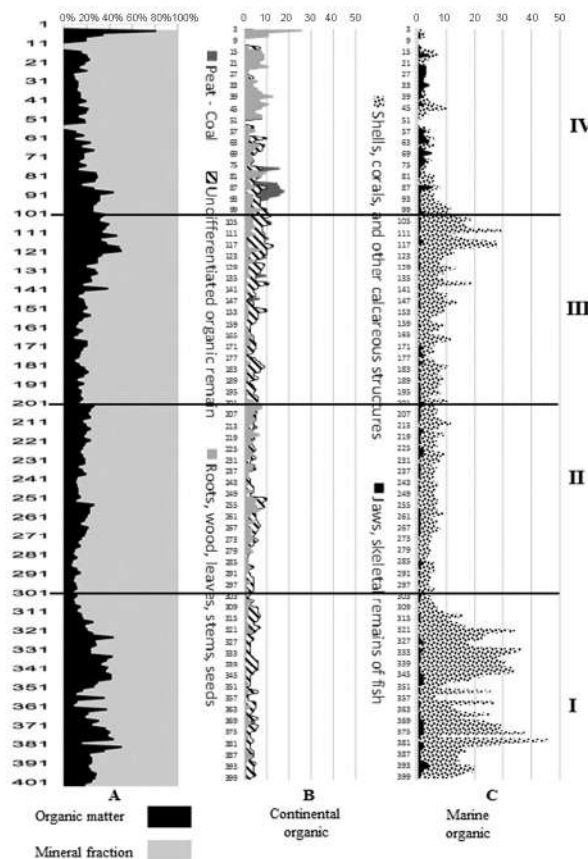


Figure 4. Main components of the Neganje core - Playa Pozo. **A.** Main components = organic matter; mineral fraction. **B.** Continental organic components. **C.** Marine organic components

Finally, in zone IV, 101 to 1cm, continental components predominated with an average of 16% and maximum values of 80% while the marine components registered an average of 6% with extreme values of 14%.

Sedimentation rates

In the deepest part (zone I), the sedimentation rate was slightly higher than that from the superficial zones (IV-V). The highest value was registered in zone II followed by zone III, which was 2.3 and 3.5 times higher than that of the deepest zone (**Table 1**). These values were also part of the variation gradient (0.06 and 0.66 cm/year) in other mangrove environments such as Laguna Camarones in the department of La Guajira (**Castaño, 2004**), Cispatá in the department of Córdoba (**Palacios, et al., 2012**), and La Caimanera in the department of Sucre (**Beltrán, 2015**).

Recent pollen sedimentation

In the two samples analyzed, we identified 36 palynomorphs belonging to 22 families and 30 genera. Pollen representation was dominated by floodplain vegetation (38%), followed by mangroves (33%), and mainland forest (25%). The swamp vegetation (aquatic-swamp) was represented but in a very low proportion (4%).

As found in groups previously classified, floodplain vegetation included *E. aff. thymifolia* with an average pollen frequency of 6%, and *S. aff. jamaicense* and *S. aff. hirtum* with a value of 4%. *Rhizophora mangle* dominated in the mangrove swamp (20%) followed by *L. racemosa* (6%), *C. erectus* (5%), and *H. germinans* (2%). In the mainland forest, we found harbor taxa such as *Protium* (6%), *Celtis* (5%), and *Mabea* (3%), and in the swamp vegetation (aquatic-swamp) *C. aff. caroliniana*, *A. peruviana*, *Ipomoea* spp., *Cyperus*, and Poaceae, with less than 1% of the pollen frequency each (**Figure 5**).

Palynological diagram

In **table 2** we present the palynomorphs (pollen grains, spores, and others) we counted. At some points, not enough materials were recovered and, therefore, the palynological diagrams show discontinuities as the intervals between samples were not constant. Between the surface and the 95-cm depth, the concentration of palynomorphs was low so it was necessary to extend the sampling interval while in most of the other sections of the column sampling was every 5 cm. There were sections in which palynomorphs were not recovered and in other their counts were very low. For example, between 380 and 400 cm, we found only four to seven grains, and, therefore, this material was not used in the analysis.

Zoning, description (palynological diagrams) and reconstruction of the vegetation changes.

Five zones were differentiated. From zones I to IV in the palynological spectrum there is a domain of mangrove-associated elements. In zone V, the outermost (recent) representation of the dry forests of the nearby slopes predominates (**Figures 6A, B and 7**). A detailed description offers us the following characteristics:

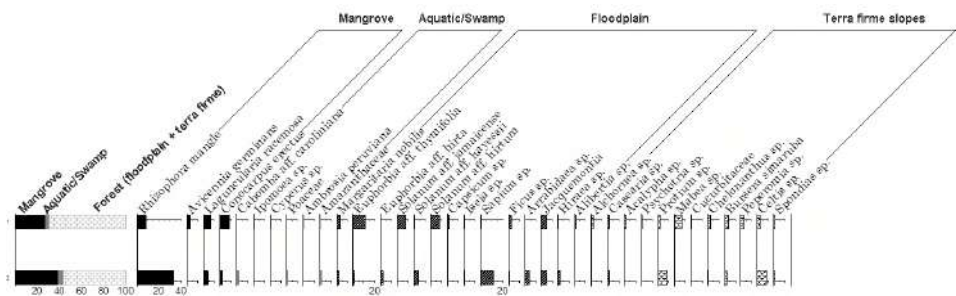


Figure 5. Recent pollen sedimentation in the Neguanje mangrove area, Playa Pozo

decreased its representation with *Mabea* sp. (5%), *Protium* sp. (5%), and three species of *Arecaceae* (10%). Aquatic-swamp vegetation was poorly represented with *Poaceae* (20%). The predominance of phytoclasts persisted among the elements not included.

Paleoenvironment: Estimated age: 1230-1064 years B.P. The distribution areas of the mangrove with *R. mangle* and the scrub-low forest of *S. aff. jamaicense*, *S. aff. umbellatum* and *Ficus* sp. vegetation in the floodplain increased while on the slopes, the area of forest dominated by *Acalypha*, *Protium*, and *Mabea* species decreased. Compared to the previous zone, humidity conditions (precipitation) were slightly lower and the marine organic components fewer.

Zone III. Depth: 230 - 80cm. The predominance of mangrove areas was represented by *R. mangle* reaching the highest values (80%) of the entire column followed by *H. germinans* (15%), *C. erectus* (5%), and *L. racemosa* (5%). The representation of flooded areas vegetation decreased with the presence of *E. aff. thymifolia* (10%), *S. aff. umbellatum* (40%), *S. aff. jamaicense* (10%), *Ficus* sp. (20%), *Bactris* sp. (10%), *Mabea* sp. (15%), and three *Arecaceae* species (20%). Aquatic vegetation in swamp areas decreased and they were dominated by *Poaceae* (10%) and *Cyperus* sp. (5%). Among the elements not included, phytoclast representation began to decrease towards the end of the zone.

Paleoenvironment: Estimated age: 1064 to 655 years B.P. Mangrove dominance and greatest extension were represented by *R. Mangle*, *H. germinans*, and *C. erectus*. The aquatic-swamp vegetation extension decreased significantly; both the scrub-low forest dominated by *Solanum* and *Ficus* species and the forests located on the slopes with *Mabea* maintained their distribution area. Humidity conditions (precipitation) in the lagoon surroundings were lower than those of the previous zone but the continental and marine organic components increased and their maximum points corresponded to the greatest coverage of the mangrove.

Zone IV. Depth: 80 - 33 cm. Although mangrove areas represented by *R. mangle* were predominant, they began to decrease drastically towards the top (10%), however, *H. germinans* (30%) and *L. racemosa* (10%) increased. Representation of hillside vegetation

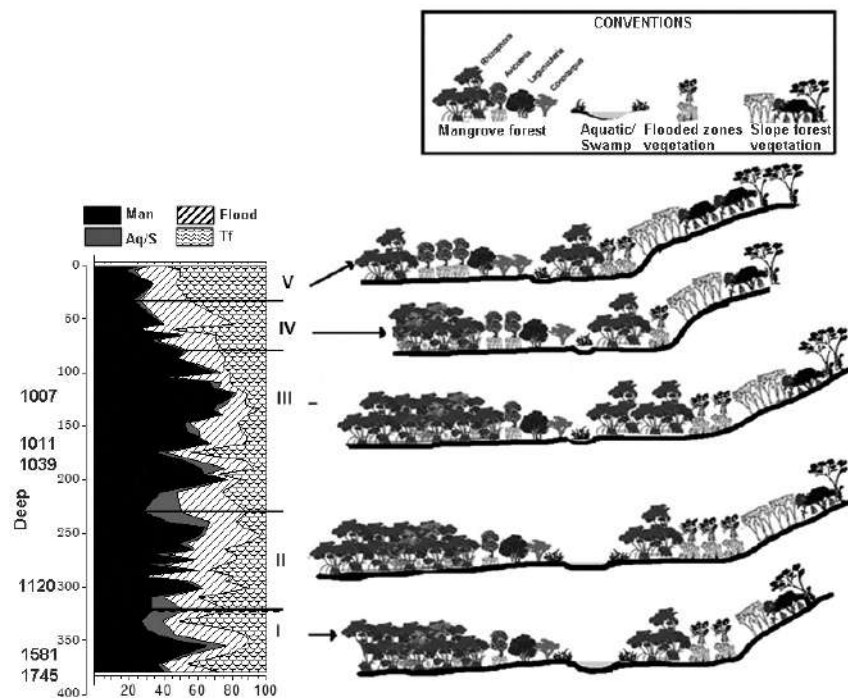


Figure 7. Reconstruction of the vegetation changes in the last 1800 years, Neguanje Bay.

(mainland) with species of *Protium* (15%) and *Mabea* (10%) increased considerably, as well as the flooded-area vegetation with *E. aff. thymifolia* (20%) and *S. aff. umbellatum* (10%). Aquatic-swamp vegetation was very poorly represented with *Cyperus* sp. and Poaceae elements (<5%). Among the elements not included, the predominance of phytoclasts prevailed, although their representation was lower compared to the previous sub-zone.

Paleoenvironment: Estimated age: 655 to 270 years B.P. The area occupied by the mangrove reduced, especially due to the strong decline of *R. mangle* while the representation of *H. germinans* and *C. erectus* increased, mainly towards the end when *A. aureum* appeared. The areas previously covered by the mangroves were occupied by scrub vegetation with *M. macradena*, *E. aff. thymifolia*, *M. nobilis*, and by floodplain vegetation. Firm land forests on the slope areas were dominated by *Protium* and *Anacardium* species extending to the flat areas adjacent to the mangrove. Organic matter of marine origin decreased (mangrove reduction) towards the end of the zone while that of continental origin increased associated with the extension of the flooded vegetation areas. Humidity conditions (precipitation) were lower than those of the previous zone.

Zone V. Depth: 33 - 0 cm. Representation of hillside vegetation (mainland) predominated with *Protium* sp. reaching up to 20%, *Mabea* sp. (20%), and other elements such as *Handroanthus* sp. (10%) and *Anacardium* sp. (5%). The representation of flooded vegetation areas with *E. aff. thymifolia* (20%), *M. macradena* (5%), and *Phyllanthus* sp. (20%) prevailed. In the mangrove community, *R. mangle* showed minimal values (15%) compared to those recorded in previous areas; the representation of *H. germinans* (25%) and *C. erectus* (20%) increased, and *A. aureum* (10%) appeared. The low representation of the aquatic and swamp vegetation persisted. Among the elements not included in the pollen sum, again phytoclasts dominated, although to a lesser extent compared to the initial zone (60%).

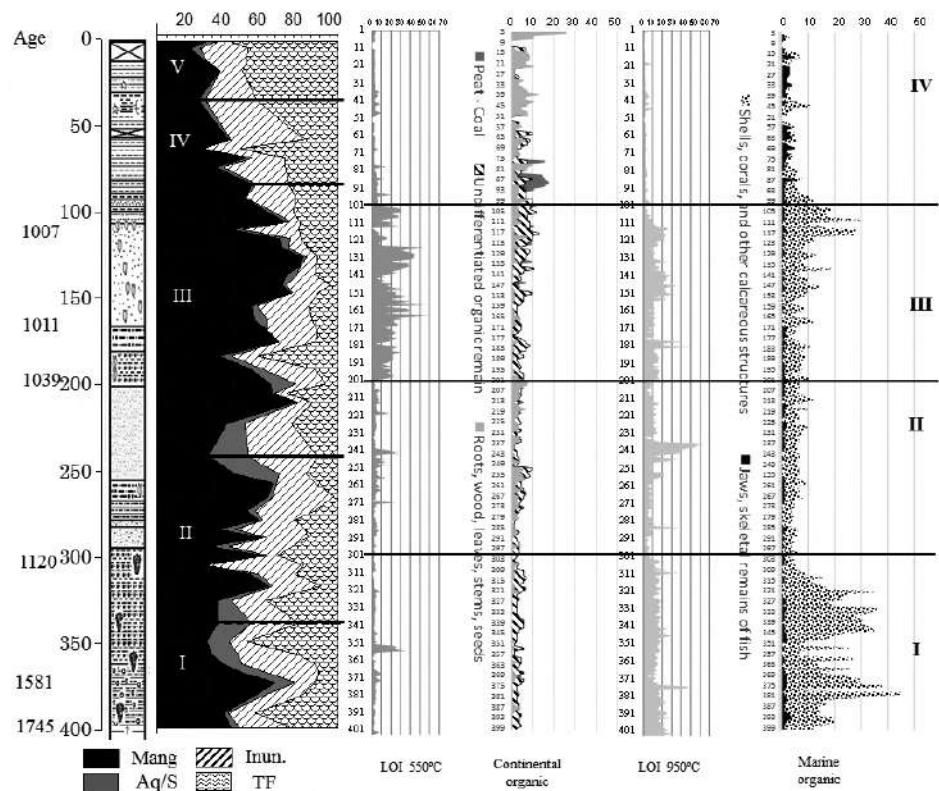


Figure 8. Summary of vegetation changes, main components, continental organic matter, and marine organic matter. Mang: Mangrove; Ac/P: Aquatic-swamp; Inun: Flood plain; TF: Mainland

Paleoenvironment: Estimated age: 270 years B.P. to present time. The area occupied by the mangrove drastically reduced due to the significant regression of *R. mangle* and *H. germinans* while *C. erectus* and *A. aureum* representation persisted. Hillside forests with *Protium*, *Mabea*, and *Handroanthus* increased their range and reached the basin. Current precipitation values (600-700 mm) qualify the region as very dry (Rangel & Carvajal, 2012). The organic matter of continental origin reached the highest values.

Organic matter components and main palynological diagram relationships

When comparing the LOI organic matter components curves and the main palynological diagram between 550 and 950°C it is possible to differentiate the following situations (Figure 8):

Zone I: Depth: 401 - 302cm. This includes zone I and the lower part of zone II in the palynological diagram. LOI values at 550 °C were between 2% and 4%, the lowest in the entire column. Marine components predominated, especially shells and other calcareous elements, which relate to LOI values at 950 °C with extreme points of 30% and up to 48%. Mangrove was the vegetation type with the greatest coverage (from 380 cm deep).

Zone II: Depth: 301 – 202 cm. This comprises three-quarters of zone II and the lower part of zone III in the palynological diagram. LOI contents were between 550 and 950° C, similar to the previous zone; organic matter decreased, especially marine components. The vegetation was dominated by mangroves communities.

Zone III: Depth: 201 - 102cm. This comprises three-quarters of zone III in the main palynological diagram. LOI values were at 550 °C (4% to 10%) and 950 °C (4% to 10%), the highest in the entire column. Compared to the previous zone, continental organic matter increased, as well as that of marine origin with an increase of calcareous remains towards the end of the zone. Regarding vegetation, here we found the mangrove area with the greatest coverage and development.

Zone IV: Depth: 101 - 1cm. This includes the upper part of zone III and zones IV and V in the palynological diagram. Compared to the previous zone, the LOI values between 550°C and 950°C decreased as seen in the reduction of marine origin organic matter. In centimeters 1 and 2, the values in continental components (differentiable plant remains) reached an extreme value of 76%. Regarding vegetation, the mangrove area reduced and the area the flooded forest increased.

Discussion

Palynological associations in sediments and affinities with current vegetation types

Table 3 shows the relationships between the palynological associations defined in this study based on their respective palynomorphs in the sediment and their correlation with current vegetation types according to their floristic composition. The correspondence grade between mangrove types dominated by *R. mangle* and by *H. germinans* was very significant as both types were associated with the same salinity conditions in the water column while the dry forest was dominated by *Mabea montana* and *Protium heptaphyllum*.

Palaeoenvironmental changes and their relationship with other Colombian Caribbean areas

For the period from 2000 to 500 years BP, **Jaramillo, et al.** (2012) and **Vélez, et al.** (2014) mentioned the presence of the vigorous development of mangrove communities in several localities of the Ciénaga Grande de Santa Marta (Boca de López, Hospitalito, La Ahuyama, Caño Perdiz, Bocas de Aracataca), and **Castaño** (2004) in Laguna Camarones, Guajira. These communities were dominated mainly by *Rhizophora* and significant values of *Hilairanthus* (*Avicennia*) were also measured. These associations were related to the dry conditions (low precipitation values) predominating in this period in the swamp sector and its surrounding areas.

Table 3. Relationship between the palynological associations detected in the sediment analysis and current vegetation types (Nevuanje)

Palynological associations (or dominant taxa) in sediments and pollen zones	Related current vegetation types in the Colombia Caribbean region (Rangel, <i>et al.</i> , 2010, 2013; Rangel, 2012; Cortés & Rangel, 2013)
<i>Mabea</i> sp. (zones V-IV-III)	Forests dominated by <i>Mabea montana</i> on Zapatos swamp (César) surrounding areas; associated species: <i>Cordia bicolor</i> and <i>Sterculia apetala</i>
<i>Protium</i> sp. (V-IV)	Forests dominated by <i>Protium heptaphyllum</i> and <i>Xylopia aromatica</i> on surrounding areas of Zapatos swamp; associated species: <i>Tapirira guianensis</i> , <i>Attalea butyracea</i> , <i>Dydimopanax morototoni</i>
<i>Euphorbia</i> aff. <i>thymifolia</i> + <i>Mascagnia macradena</i> and <i>Phyllanthus</i> sp. (V)	Thicket - <i>Phyllanthus elsiæ</i> low forest. Shores of the Caribbean swamps
<i>Hilairanthus germinans</i> + <i>Laguncularia racemosa</i> + <i>Conocarpus erectus</i> with lowered values of <i>Rhizophora mangle</i> (V)	Mangrove dominated by <i>Hilairanthus germinans</i> and <i>Laguncularia racemosa</i> (<i>Lagunculario racemosae-Avicennietum germinantis</i> association)
<i>Rhizophora mangle</i> + <i>Hilairanthus germinans</i> , with high representation of <i>Laguncularia racemosa</i> (IV)	Mangrove dominated by <i>Rhizophora mangle</i> , <i>Hilairanthus germinans</i> and <i>Laguncularia racemosa</i> (<i>Lagunculario racemosae-Rhizophoretum manglis</i>)
<i>Solanum</i> aff. <i>umbellatum</i> + <i>Euphorbia</i> sp. (IV-II)	Thicket vegetation dominated by <i>Solanum campechensis</i> growing over Colombian Caribbean beaches
<i>Rhizophora mangle</i> + <i>Hilairanthus germinans</i> + <i>Conocarpus erectus</i> (III-II-I)	<i>Rhizophora mangle</i> mangrove (with total dominance of this species)
<i>Euphorbia</i> aff. <i>jamaicense</i> + <i>Solanum</i> aff. <i>umbellatum</i> + <i>Solanum</i> aff. <i>jamaicense</i> + <i>Ficus</i> sp. + <i>Bactris</i> sp. (III)	Thicket vegetation dominated by <i>Solanum campechensis</i> growing over Colombian Caribbean beaches
<i>Mabea</i> sp. + Arecaceae (II)	Forests dominated by <i>Mabea montana</i> on Zapatos swamp (César) surrounding areas; associated species: <i>Cordia bicolor</i> , <i>Sterculia apetala</i> , <i>Attalea butyracea</i>
<i>Acalypha</i> sp. + <i>Protium</i> sp. + Arecaceae (I)	Forests dominated by <i>Protium heptaphyllum</i> and <i>Xylopia aromatica</i> . Mixed palm forests

In the Nevuanje region, the largest mangrove development (*R. Mangle*) reached values up to 60% in the pollen spectrum occurring between 1078 and 654 years B.P. (see zone III of the palynological diagram). In the Ostional swamps, Cispatá Bay, this happened ca. 1380 years B.P. (Palacios, *et al.*, 2012), and 838 years A.P. in La Caimanera (Beltrán, 2015).

In the Ciénaga Grande de Santa Marta (C.G.S.M.), sediments were associated with a warming period between 1930 and 1660 years B.P. In Nevuanje, the predominance of organic components of marine origin can also be associated with warming conditions. Between 1660 and 900 years B.P., in the C.G.S.M., a shorter warm or “cold” period was detected, which differs from Nevuanje, as the presence of organic matter in its sediments of marine components predominated, and we identified a greater dominance and coverage of mangrove vegetation. In the C.G.S.M., Jaramillo, *et al.* (2012) classified as warm the period between 900 and 570 years B.P. According to Van der Hammen & Troncoso (1992) around 750 years B.P., dry conditions prevailed in the several localities of the lower Magdalena River. In Nevuanje, at the end of this period, an increase in organic components

of marine origin was observed, which would indicate warm conditions. Between 500 years A.P. and the present, warm or “cold” periods were detected in the CGSM. In this region, a high number of mineral components were found and, in some cases, shell deposition as well. In Neguanje, we identified high contents of the mineral component, a condition that can be present in cold conditions.

Based on the temperature calibration curves of the last 2000 years (D'Arrigo, *et al.*, 2006; Christiansen, *et al.*, 2012), and the precipitation and extension data, we adapted the interpretation of the types of vegetation to the Neguanje region as follows:

Zone I. Depth: 380 – 322 cm. Estimated age: 1605-1230 A.P. Compared to current climate variations (27.3°C temperature and 650 mm annual precipitation), the temperature and humidity conditions (precipitation) in the surroundings were slightly higher. Mangrove communities were established in swamp (marsh) areas highly dominated by *R. mangle*.

Zone II. Depth: 322 – 230 cm. Estimated age: 1230 to 1064 years A.P. Compared to zone I, the temperature was slightly lower and the humidity and precipitation conditions were slightly higher. The mangrove distribution area increased in the swamp (marsh) with *R. mangle* as the dominating species.

Zone III. Depth: 230 – 80 cm. Estimated age: 1064 to 655 years A.P. This was the zone with the warmest conditions according to the sequences set up in the sediment column. The humidity conditions (precipitation) in the areas surrounding the lagoon were lower than in zone II. We detected the effects of two climatic warming peaks: one towards the base of the area, ca. 1060 years B.P., with an approximate increase of 0.3°C above the global average estimated for the territory (27.3°C). The other peak was registered towards the top part, ca. 940 yr. B.P., with an increase of 0.5°C above the average related to the medieval climate optimum (records of maximum solar activity). In this zone, we recorded the largest extension of *R. mangle* mangrove. This period can be directly associated with a very strong marine influence as corroborated by an increase in transgression velocity rates.

Zone IV. Depth: 80 - 33 cm. Estimated age: 655 to 270 years B.P. The temperature decreased with respect to zone III. A marked decrease in the water levels was also observed in the swamp due to a lower entry of seawater, a decrease in precipitation around the swamp, and a slight drop in local temperature. It is possible that the decrease in marine influence is associated with a light regression process in the territory. The extension of the mangrove community was considerably reduced, and the exhumation of the territories facilitated the extension of the floodplain scrublands and the forests on the slopes (mainland) occupying areas contiguous to the mangrove.

Zone V. Depth: 0 - 33 cm. Estimated age: 270 years A.P. to the present. The upper part reflected the current conditions of temperature (27.3°C) and precipitation in the territory (650 mm annual precipitation). Compared to zone IV, the temperature was higher (1 to 1.2°C) and precipitation was less. In the swamp (marsh), the extension of the mangrove communities decreased drastically while the area covered by tropical dry forests on the slopes increased.

Acknowledgments

The authors thank Diego Coronel for sharing his stratigraphic information; David Mencin and Roger Bilham (University of Colorado) for their help with the complimentary C14 dating information; Gerardo Aymard for the detailed review and comments on the mangrove flora, and the anonymous reviewers for their comments and suggestions.

References

- Beltrán, J. D. (2015). Historia de la vegetación, el clima y los paleoambientes presentes en la ciénaga de La Caimanera durante los últimos 6000 años (departamento de Sucre – Colombia). Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 70 pp. Bogotá. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56271>

- Bolivar-Palma, W., Quintero, J., Herrera, E.** (2019). Vulnerabilidad física en las edificaciones del sector de Boca grande, Cartagena de Indias, ante un evento de tsunami. *Boletín Científico CIOH*. **38** (2): 44-48.
- Brown, C. A.** (1960). *Palynological Techniques*. Library of Congress Catalog Carol. Number 60-14297. Baton Rouge.
- Carbonó, E. & García, H.** (2010). La vegetación terrestre de la Ensenada de Neguanje, Parque Nacional Natural Tayrona (Magdalena, Colombia). *Caldasia*. **32** (2): 235-256.
- Castaño, A. R.** (2004). Reconstrucción palinológica de los cambios de vegetación y condiciones ambientales asociados a la Laguna Camarones en la Baja Guajira en el Holoceno. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 60 pp.
- Coronel, D.** (2013). Ambiente de sedimentación de los últimos 5000 años A.P. en el registro de los sedimentos de fondo de las ciénagas de Chengue y Neguanje en el Parque Nacional Natural Tayrona. Tesis de Pregrado. Universidad de Pamplona. 348 pp.
- Cortés, A.** (1975). Estudio semidetallado de suelos del parque "Tayrona". Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección agrológica, Bogotá. Colombia. 210 pp.
- Cortés-C., D.** (2017). Vegetación estuarina y vegetación acuática de complejos cenagosos del Caribe colombiano. Tesis de doctor. Instituto de Ciencias Naturales - Universidad Nacional de Colombia. 333 pp. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59487>
- Cortés-C., D. & Rangel-Ch., J. O.** (2013). Vegetación acuática y de pantano de las ciénagas del departamento de César (Colombia). En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica XIII. Complejo cenagoso Zapatosa y ciénagas del sur del César: biodiversidad, conservación y manejo* (301-329). Universidad Nacional de Colombia - Instituto de Ciencias Naturales - CORPOCESAR. Bogotá D.C.
- Christiansen, C. & Ljungqvist, F. C.** (2012). The extra-tropical Northern Hemisphere temperature in the last two millennia: reconstructions of low-frequency variability. *Clim. Past*. **8**: 765-786.
- D'Antoni, H.** (2008). *Arqueología: sistemática y caótica*. Consejo superior de investigaciones científicas. 278 pp. España.
- D'Arrigo, R., Wilson, R., Jacoby, G.** (2006). On the long-term context for late twentieth century warming. *J. Geophys. Res.* **111**: D03103.
- Dean, Jr. E. W.** (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology*. **44** (1): 242-248.
- Erdtman, G.** (1986). *Pollen morphology and plant taxonomy*. London - New York: Leiden E.J. Brill. 553 pp.
- Eriksoon, F. & Olsson, D.** (2015). Palaeoenvironmental reconstruction of catchment processes in sediments from Bolgoda Lake, Sri Lanka. *Environmental Science Program*. Linkopings Universitet. 32 pp.
- García-M., Y., Rangel-Ch., J. O., Fernández, D.** (2011). Flora palinológica de la vegetación acuática, de pantano y de la llanura aluvial de los humedales de los departamentos de Córdoba y César (Caribe colombiano). *Caldasia*. **33** (2): 573-618.
- Grimm, E. C.** (2002). *Tilia and Tilia Graph program*. Illinois State Museum.
- Ingeominas.** (1996). *Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe colombiano*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras-Ingeominas-Unidad operativa Cartagena. Cartagena. 110 pp.
- Jaramillo, A., Rangel-Ch., J. O., Parra, L. N., Ruiz, D.** (2012). La estratigrafía de los sedimentos de fondo de ciénagas del Caribe y el registro de los cambios de clima durante los últimos 4900 años. En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica XII. La región Caribe de Colombia* (1-65). Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá, Colombia.
- Jiménez, L.C., Bogotá, R. G., Rangel-Ch., J. O.** (2008). Atlas palinológico de la amazonia colombiana -Las familias más ricas en especies-. En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica VII. Vegetación, Palinología y Paleoecología de la Amazonia colombiana* (217-416). Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá.
- Molina, A., Molina, C., Giraldo, L., Parra, C., Chevillot, P.** (1994). Dinámica marina y sus efectos sobre la geomorfología del golfo de Morrosquillo. *Boletín científico C.I.O.H.* **15**: 93-113.
- Palacios-P., L., Rodríguez-Z., P., Rangel-Ch., J. O.** (2012). Cambios en el clima y en la vegetación en ambientes estuarinos de la bahía de Cispatá (Córdoba – Caribe colombiano). En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica XII. La región Caribe de Colombia* (145-164). Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.

- Quintero-R., P.A. & Sánchez-E., R.E.** (2020). Zonas sismogénicas generadoras de tsunami en el Caribe. *Boletín Científico CIOH*. **39** (1): 8-12.
- Rangel-Ch., J.O.** (2012). La vegetación de la región Caribe de Colombia: Composición florística y aspectos de la estructura. En J.O Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia diversidad biótica XII. La región Caribe de Colombia* (365-476). Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá D.C.
- Rangel-CH., J.O., Garay, H., Avella, A.** (2010). Bosques húmedos y secos circundantes a los complejos de humedales (ciénagas) en el departamento de Córdoba. En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia diversidad biótica IX. Ciénagas de Córdoba: Biodiversidad-Ecología y manejo ambiental* (207-323). Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge-CVS, Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá D.C.
- Rangel-Ch., J. O. & Carvajal-C., J. E.** (2012). Clima de la región Caribe colombiana. En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica XII. La región Caribe de Colombia* (67-129). Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.
- Rangel-Ch., J.O., Avella, A., Rivera, O.** (2013). Los bosques de los alrededores de las ciénagas Zapatosa, Mata de Palma y La Pachita, César, Colombia. En J. O. Rangel-Ch. (Ed.), *Colombia diversidad biótica XIII. Complejo cenagoso Zapatosa y ciénagas del Sur del César. Biodiversidad, conservación y manejo* (285-299). CORPOCESAR, Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá D.C.
- Reimer, P., Austin, W., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., Talamo, S.** (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon*. **62** (4): 725-757.
- Robertson, D.K. & Martínez, A.N.** (1999). Cambios del nivel del mar durante el holoceno en el litoral caribe colombiano. *Cuadernos de geografía, Departamento de Geografía*. **8** (1): 168-198.
- Roubik, D. & Moreno, E.** (1991). Pollen and spores of Barro Colorado Island. *Monographs in systematic botany from de Missouri Botanical Garden*. Vol. 36. 268 pp. Missouri Botanical Garden, Saint Louis.
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Reimer, R.** (2021). CALIB 8.2 [WWW program] at <http://calib.org>, accessed 2021-12-8.
- Van der Hammen, T. & Noldus, G.W.** (1984). Paleoecología de la Ciénaga Grande de Santa Marta. En T. van der Hammen, Ruiz, P. (Eds.). *Studies on Tropical Andean Ecosystems: La Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). Transecto Buritacá - La Cumbre* (581-588). J. Cramer.
- Van der Hammen, T. & Ortiz-Troncoso, O. R.** (1992). Arqueología y medio ambiente en Suramérica Septentrional. En: O. R. Ortiz-Troncoso, Van der Hammen, T. (Eds). *Archeology and environment in Latin America*: 9-24. (Inst. Pre-Protohist Archeol. Univ. Amsterdam).
- Vélez, M.I., Escobar, J., Brenner, M., Rangel-Ch., J. O., Jaramillo, A., Betancourt, A., Curtis, J. H., Moreno, J. L.** (2014). Middle to late Holocene relative sea level rise, climate variability and environmental change along the Colombian Caribbean coast. *Holocene*. **24** (8): 898-907.

Artículo original

Presencia confirmada del murciélago marrón de Chiriquí, *Eptesicus chiriquinus* (Chiroptera: Vespertilionidae), en el departamento de Chocó, Colombia

Confirmed presence of the Chiriqui brown bat, *Eptesicus chiriquinus* (Chiroptera: Vespertilionidae) in the department of Choco, Colombia

✉ Víctor Danilo Palacios-Mayoral^{1,*}, ✉ Leison Palacios-Mosquera¹,
✉ Jonard David Echavarría-Rentería¹, ✉ Alex Mauricio Jimenez-Ortega¹,
✉ Hugo Mantilla-Meluk²

¹ Grupo de Investigación en Manejo y Gestión de la Vida Silvestre del Chocó, Programa de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia
² Colección de Mamíferos, Centro de Estudios de Alta Montaña (CEAM), Universidad del Quindío (CMUQ), Armenia, Colombia

Resumen

Eptesicus es un género de murciélagos de la familia Vespertilionidae con amplia distribución mundial. En Colombia se conocen seis especies, de las cuales *E. chiriquinus* es una de las más ampliamente distribuidas con presencia en 13 departamentos. Se confirma aquí la presencia de *E. chiriquinus* en el departamento del Chocó mediante la verificación de un espécimen CMCH 1285 ♂ recolectado en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó, y depositado en la Colección Teriológica del Chocó. Se comenta sobre la diferenciación entre especies de *Eptesicus* presentes en el Chocó a partir de sus caracteres externos y, por último, se presenta un mapa actualizado de su distribución en el país.

Palabras clave: Chocó; Chocó biogeográfico; *Eptesicus*, nuevos registros; Distribución geográfica.

Abstract

Eptesicus is a genus of bats of the family Vespertilionidae with a wide worldwide distribution. Six species have been registered in Colombia, among which *E. chiriquinus* is one of the most widely distributed with registers in 13 departments. We confirm here its presence in the department of Chocó after the analysis of specimen CMCH 1285 ♂ collected in the village of Pacurita, Municipality of Quibdó, and deposited in the Chocó Theriological Collection. We also comment on the differences among *Eptesicus* species present in the department of Chocó based on external characters and we include an updated map of its distribution in the country.

Keywords: Chocó; Biogeography Chocó; *Eptesicus* new records; Geographical distribution.

Introducción

El género de murciélagos *Eptesicus* (Vespertilionidae) agrupa 26 especies (Mammal Diversity Database, 2021; Ramírez-Chávez, et al., 2021a) que se distribuyen en la región paleártica, en África, y en el norte, centro y sur del continente americano (Davis & Gardner, 2008; Simmons, 2005; Solari & Martínez-Arias, 2014; Sánchez, et al., 2019; Poma-Urey, et al., 2019; Acosta-S, et al., 2021; Ramírez-Chávez, et al., 2021a). De estas, 11 se distribuyen en Suramérica (Davis & Gardner, 2008; Barquez, et al., 2009; Miranda, et al., 2006; Sánchez, et al., 2019; Acosta-S, et al., 2021; Ramírez-Chávez, et al., 2021a) y seis en Colombia: *E. andinus*, *E. brasiliensis*, *E. chiriquinus*, *E. furinalis*,

Citación: Palacios-Mayoral VD, Palacios-Mosquera L, Echavarría-Rentería JD, et al. Presencia confirmada del murciélago marrón de Chiriquí, *Eptesicus chiriquinus* (Chiroptera: Vespertilionidae), en el departamento de Chocó, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):108-117, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1594>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Correspondencia:**

Víctor Danilo Palacios-Mayoral;
e-victor.palacios@utch.edu.co

Recibido: 5 de noviembre de 2021

Aceptado: 19 de enero de 2022

Publicado en línea: 7 de febrero de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

E. fuscus y *E. orinocensis* (Solari, *et al.*, 2013; Ramírez-Chávez, *et al.*, 2016; Sociedad Colombiana de Mastozoología, 2018; Ramírez-Chávez, *et al.*, 2021a). En general, las especies del género se reconocen por su hocico con apariencia inflamada y orejas que, al plegarse, no superan la longitud del hocico y poseen un trago de punta redondeado. Cranealmente, las especies de este género se caracterizan por la presencia de dos pares de incisivos superiores y tres pares de incisivos inferiores (Miller, 1967; Koopman, 1994; Davis & Gardner, 2008; Wilson & Mittermeier, 2019).

Eptesicus chiriquinus fue descrita por primera vez por Thomas (1920) con base en un espécimen de cerro Chiriquí en Panamá; su validez como taxón ha sido ampliamente discutida por Simmons & Voss (1998). Al igual que los otros miembros del género, es una especie de dieta insectívora que habita en bosques tropicales y subtropicales de tierras bajas y bosques montanos (Molinari, *et al.*, 2008). En la actualidad *E. chiriquinus* está clasificada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) en la categoría de preocupación menor (LC) (Solari, 2019).

Tiene una amplia distribución en el Neotrópico y ha sido confirmada para México, Panamá, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela, Guyana, Guayana Francesa y Brasil (Handley-Jr, 1976; Simmons & Voss, 1998; Siles, 2007; Arroyo-Cabrales, *et al.*, 2008; Ramírez-Chávez, 2008; Davis & Gardner, 2008; Barquez, *et al.*, 2009; Gregorin & Loureiro, 2011; Zortéa, *et al.*, 2013; Gutiérrez-Cifuentes, *et al.*, 2013; Rodríguez-Herrera, *et al.*, 2014; IUCN, 2020). El rango de distribución altitudinal de la especie está entre los 0 y los 2.830 m s.n.m. (Asprilla-Aguilar, *et al.*, 2016; Siles, 2007). En Colombia la especie había sido documentada hasta ahora en los departamentos de Antioquia, Caldas, Caquetá, Cauca, Córdoba, Cundinamarca, Guaviare, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander, Valle del Cauca, y se sugería su presencia en el departamento del Chocó (Figura 1; Información suplementaria, Apéndice 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1594/3187>).

En el occidente de Colombia la especie se ha registrado con mayor frecuencia en ambientes andinos, con registros notables en zonas adyacentes al Chocó biogeográfico como Almaguer (departamento de Cauca), y en Belén de Umbría, departamento de Risaralda, como lo demuestra el ejemplar depositado en la Colección de la Universidad de Santa Rosa de Cabal (CUSM 189) (Berrío-Martínez, 2009).

Eptesicus chiriquinus fue reportada por Asprilla-Aguilar, *et al.* (2016) en el listado de especies de murciélagos del Chocó a partir de un registro en el municipio de Quibdó, corregimiento de Pacurita (CMCH 1285). Sin embargo, el espécimen que sustenta esta observación no había sido revisado en detalle ni comparado con otras especies, dejando abierta la posibilidad de una identificación errónea. En el presente estudio se confirmó la presencia del murciélago marrón de Chiriquí, *E. chiriquinus* en el departamento del Chocó, a partir de sus características diagnósticas externas, cráneo-dentales y morfométricas, se aportaron elementos para diferenciar las especies del género presentes en el departamento y se actualizó la distribución de la especie en el país.

Materiales y métodos

El único espécimen de *E. chiriquinus* reportado para el Chocó está depositado en la Colección Mastozoológica del Chocó, Universidad Tecnológica del Chocó (CMCH 1285 ♂), y fue recolectado en una zona de bosque primario de la recientemente creada Área de Importancia para la Conservación de Murciélagos Pacurita, Chocó-Central (AICOM; código de aprobación: A-CO-001; 5°00' -6°45' N, 77°15' -76°30' W). El individuo fue capturado el 21 de julio de 2010 hacia las 5:45 am en una red de niebla de 6 m izada con un sistema de poleas a una altura de vuelo de 11 m en el dosel del bosque.

La localidad de Pacurita forma parte del bioma de selva hiperhúmeda tropical, con bosques altamente estratificados y predominio de especies como el algarrobo o azúcar huayo (*Hymenaea palustris* Huber, 1909), el cedro (*Cedrela odorata* Linneo, 1753), el costillo (*Sagotia racemosa*, Baill, 1860), el carrá (*Huberodendron patinoi* Cuatrecasas, 1950), el

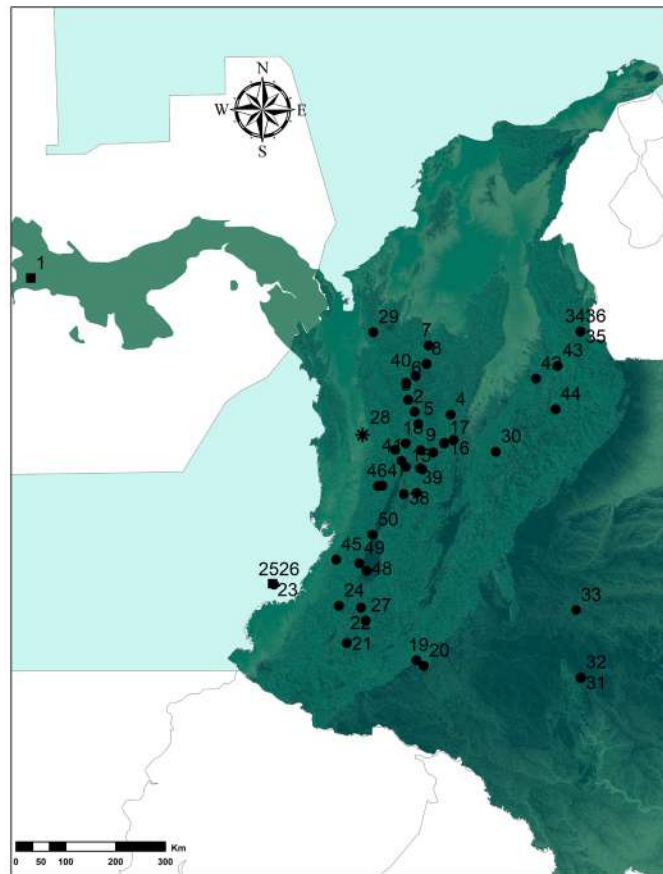


Figura 1. Distribución geográfica de *Eptesicus chiriquinus* en Colombia. Los registros previos están representados por círculos y el reporte para el Chocó, por una estrella.

algarrobo (*Ceratonia siliqua* Linneo, 1753), el peine de mono (*Apeiba membranaceae*, Spruce, 1861), el lirio (*Couma macrocarpa* Barbosa-Rodrigues, 1891), el hormigo (*Platymiscium dimorphandrum* Smith, 1904), el yarumo uva (*Cecropia peltata*, Linneo, 1759), y la palma don pedrito (*Oenacarpus mapora* H. Karst, 1857), entre otras.

Se corroboró la determinación taxonómica del ejemplar siguiendo los caracteres diagnósticos propuestos para el género *Eptesicus* y las especies que lo conforman (Davis & Gardner, 2008; Ramírez-Chávez, 2008; Aguirre, et al., 2009; Díaz, et al., 2016, 2021). Además, se tomaron 32 medidas externas y craneales del espécimen (CMCH 1285 ♂), y de uno de *E. brasiliensis* (CMCH 000394) depositados en la CMCH, dado que ambas especies son muy similares. Estas medidas se compararon con las aportadas por Ramírez-Chávez (2008) para ambas especies: longitud mayor del cráneo, longitud mayor del cráneo sin incisivos, longitud cóndilo-canino, longitud cóndilo-incisivo, longitud basicraneal, longitud del paladar, ancho del rostro, constricción posorbital, alto de la bóveda craneana, ancho de la bóveda craneana, longitud de los molariformes superiores, ancho mastoidal, ancho zigomático, constricción anterorbital, ancho entre los caninos, mayor ancho entre los molares superiores, longitud de la serie dental superior con canino, longitud de la serie dental superior con incisivos, longitud de la serie dental inferior con caninos, longitud de los molariformes inferiores, longitud de la mandíbula, altura de la mandíbula, longitud total, cola, longitud oreja, antebrazo, tercer metacarpal, cuarto metacarpal, quinto metacarpal, pie, pelaje dorsal y masa. Todas las medidas (en mm) se tomaron con un calibrador digital de una precisión de 0,01 mm. Para actualizar la distribución de *E. chiriquinus* en Colombia, se incluyeron registros recuperados de la literatura (Davis & Gardner, 2008; Ramírez-

Chávez, 2008; Berrío-Martínez, 2009; Gutiérrez-Cifuentes, *et al.*, 2013; Ramírez-Chávez, *et al.*, 2021b) y registros disponibles en bases de datos de colecciones en líneas (Global Biodiversity Information Facility-GBIF, 2020).

Resultados

Contexto taxonómico

Se confirmó que el espécimen CMCH 1285 ♂ procedente del corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó, departamento del Chocó, Colombia (5°40'04" N, 76°34'12" W, a 113 m s.n.m.) (Figura 1), pertenece a la especie *E. chiriquinus* en concordancia con las siguientes características morfológicas: orejas cortas (16,72 mm) que al ser dobladas anteriormente sobre el cráneo no se extienden más allá del hocico, el cual tiene apariencia inflamada y trago redondeado; pelaje largo mayor a 8 mm que contrasta con el pelaje corto de *E. brasiliensis*. Posee un antebrazo de 45,63 mm que lo diferencia de las especies *E. brasiliensis* y *E. andinus*, ambas con antebrazos menores a 43 mm, y de *E. furinalis*, la cual tiene antebrazo menor a 37 mm (Figura 2 a, b y c). La longitud máxima del cráneo

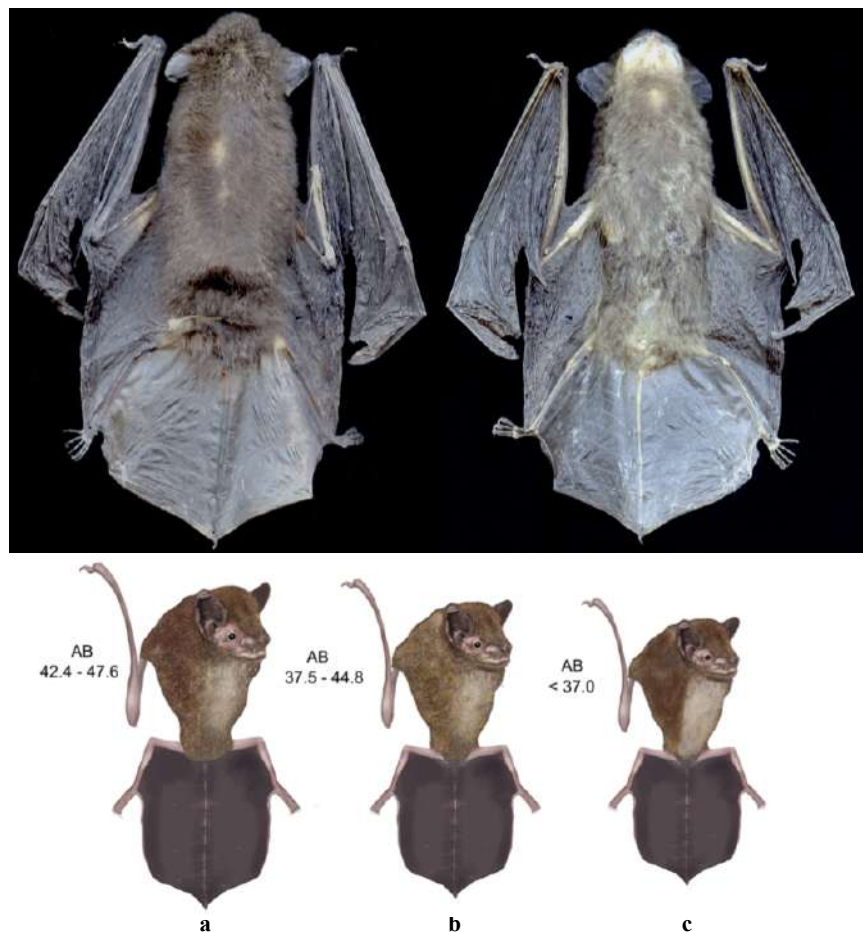


Figura 2. Superior: vistas dorsal y ventral de *Eptesicus chiriquinus* (CMCH 001285), ejemplar depositado en la Colección Mastozoológica del Chocó. Inferior: comparación de caracteres externos entre especies del género *Eptesicus* reportadas para el Chocó biogeográfico de Colombia; **a)** *E. chiriquinus*; **b)** *E. brasiliensis*; **c)** *E. furinalis*. La similitud en los caracteres externos entre las especies del género, así como la sobreposición en rangos morfométricos, hacen necesario el análisis de caracteres morfológicos internos. Externamente es importante hacer anotaciones del tamaño del antebrazo, de la cola, la oreja (Tabla 1), la forma del trago y la longitud y coloración de las bandas del pelaje.

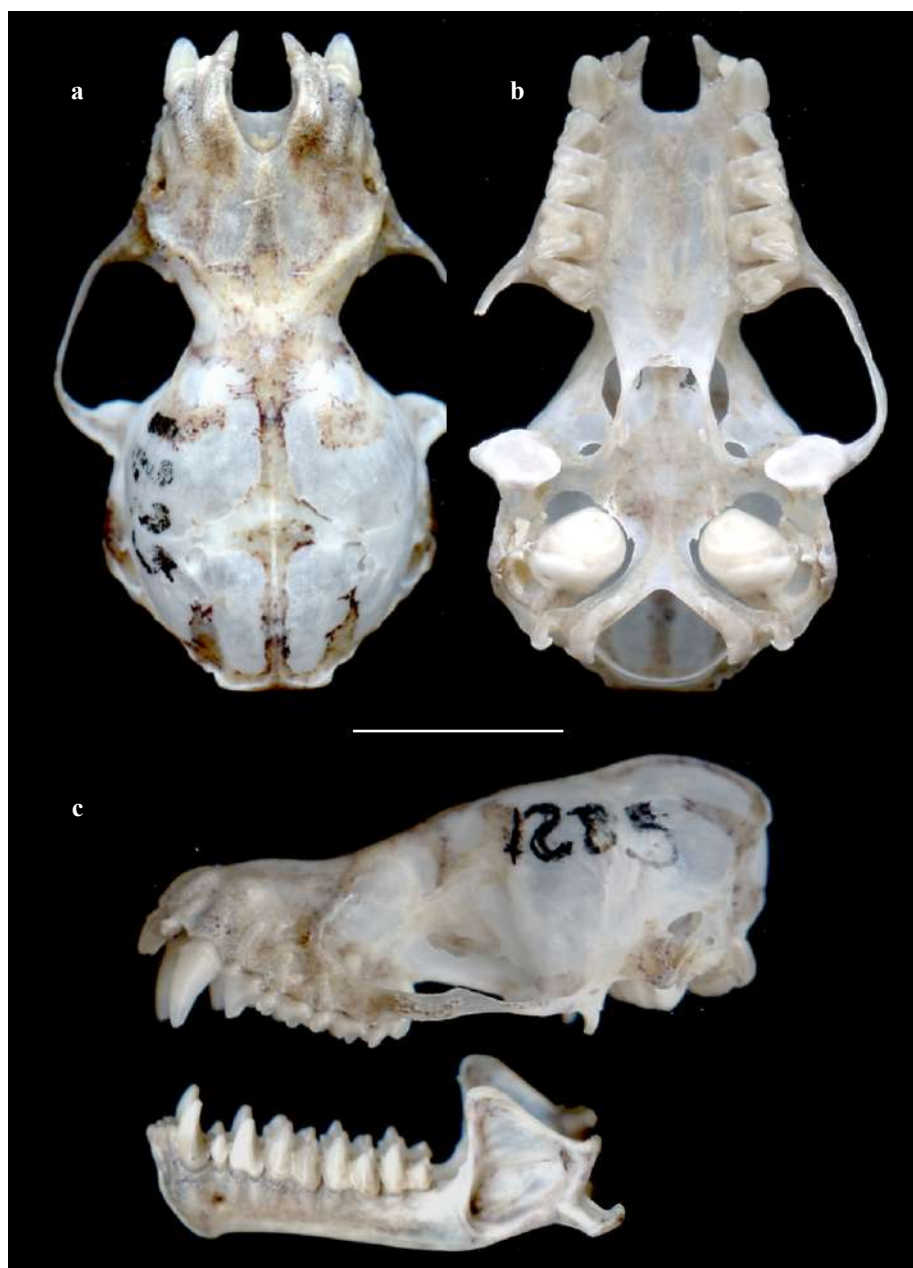


Figura 3. a) Vista dorsal, b) ventral del cráneo, y c) lateral con la mandíbula (barra escala = 5mm) de *Eptesicus chiriquinus*

del ejemplar CMCH 1285 es de 17,39 mm, superando la de la especie *E. andinus* (menor de 16 mm). Asimismo, exhibe una cresta sagital y una lambdaoidea bien desarrolladas (**Figura 3**) (**Tabla 1**), que en cambio en *E. andinus* están poco desarrolladas. Las medidas externas y craneales del espécimen y las comparaciones con datos morfométricos de otros estudios se reportan en la **tabla 1**.

Registros de *Eptesicus chiriquinus* para Colombia

Incluido el registro revisado en este trabajo, se confirmó la presencia de *E. chiriquinus* en 13 departamentos de Colombia (**Figura 1**) (**Apéndice 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1594/3187>).

Tabla 1. Medidas craneodentales y externas de *Eptesicus chiriquinus*. Medidas tomadas por Ramírez-Chávez (2008).

	<i>E. chiriquinus</i>		<i>E. brasiliensis</i>	
	CMCH001285♂	Ramírez-Chávez (2008) Media (rango) en mm (n)	CMCH000394	Ramírez-Chávez (2008) Media (rango) en mm (n)
Longitud mayor del cráneo	17,39	17,27 (16,70-18,12) (7)	16,64	16,48 (15,70-17,12) (26)
Longitud mayor del cráneo sin incisivos	16,65	16,59 (15,82-17,17) (7)	15,71	15,83 (15,04-16,85) (27)
Longitud cóndilo-canino	15,71	15,65 (15,18-16,09) (7)	15,57	14,62 (14,18-15,01) (26)
Longitud cóndilo-incisivo	16,62	16,22 (15,43-17,05) (7)	16,23	15,30 (14,74-16,18) (26)
Longitud basicraneal	14,04	13,93 (13,38-14,4) (6)	13,95	12,84 (12,41-13,30) (25)
Longitud del paladar	8,07	7,39 (7,25-7,73) (7)	7,45	6,92 (6,38-7,75) (26)
Ancho del rostro	4,87	5,51 (5,08-5,83) (8)	5,24	5,36 (4,86-5,95) (28)
Constricción postorbital	3,87	4,13 (3,96-4,38) (8)	3,69	3,81 (3,45-4,51) (28)
Alto de la bóveda craneana	6,15	6,21 (5,67-6,75) (7)	5,80	5,85 (5,32-6,49) (27)
Ancho de la bóveda craneana	7,84	7,70 (7,40-8,19) (8)	7,55	7,34 (6,92-7,92) (27)
Longitud de los molariformes superiores	5,03	5,02 (4,77-5,22) (8)	5,00	5,02 (4,77-5,22) (8)
Ancho mastoidal	8,97	8,70 (8,44-8,97) (7)	8,62	8,34 (7,67-8,69) (27)
Ancho zigomático	10,97	11,27 (10,67-11,64) (6)	10,81	10,74 (9,99-11,34) (17)
Constricción anterorbital	6,56	5,57 (5,13-5,82) (8)	5,77	5,36 (4,75-5,85) (28)
Ancho entre los caninos	5,02	5,06 (4,51-5,4) (8)	5,24	4,85 (4,05-5,23) (N=27)
Mayor ancho entre los molares superiores	6,89	7,15 (6,96-7,36) (8)	7,42	6,70 (5,81-7,22) (28)
Longitud de la serie dental superior con canino	6,45	6,98 (6,53-7,37) (8)	6,39	6,46 (5,89-7,17) (26)
Longitud de la serie dental superior con incisivos	7,52	7,42 (7,11-7,83) (8)	7,43	6,82 (5,79-7,18) (25)
Longitud de la serie dental inferior con caninos	7,09	6,98 (6,53-7,37) (8)	6,93	6,46 (5,89-7,17) (26)
Longitud de los molariformes inferiores	6,15	5,98 (5,53-6,38) (8)	6,38	5,63 (5,35-6,53) (26)
Longitud de la mandíbula	12,89	13,17 (12,85-13,61) (7)	12,68	12,33 (11,46-13,67) (26)
Altura de la mandíbula	5,08	5,10 (4,57-5,44) (7)	4,51	4,99 (4,42-5,49) (25)
Longitud total	107,62	111,39 (98,00-127,00) (7)	98,70	94,04 (82,00-106,00) (29)
Cola	42,32	41,60 (36,00-47,00) (8)	39,50	38,97 (33,00-45,00) (29)
Longitud oreja	16,72	12,13 (9,00-16,00) (8)	14,10	13,00 (9,00-19,00) (29)
Antebrazo	45,63	44,67 (42,45-47,62) (8)	44,40	40,41 (37,56-44,85) (33)
Tercer metacarpal	43,04	41,92 (39,02-45,51) (7)	42,33	37,69 (33,77-42,49) (31)
Cuarto metacarpal	41,02	39,46 (36,85-42,34) (7)	39,42	36,53 (32,95-39,56) (31)
Quinto metacarpal	37,80	37,27 (34,61-39,50) (7)	37,77	35,08 (32,47-37,06) (31)
Pie	9,31	9,69 (8,55-10,46) (8)	9,00	8,75 (7,22-9,69) (33)
Pelaje dorsal	8,20	8,34 (7,67-8,69) (27)	7,80	6,81 (5,00-9,00) (32)
Masa	8,20	7,57 (7,00-9,00) (7)	10,00	8,37 (6,10-10,40) (21)

Discusión

A pesar de la amplia distribución de la especie reportada en la literatura, aún existen áreas significativas en el rango de *E. chiriquinus* en las cuales no se cuenta con registros verificados. Con el reporte de la localidad en la que se corroboró la presencia del espécimen bajo estudio, se confirma su registro para el departamento del Chocó (Pacurita, Chocó central), aproximadamente a 725 km al sur de la localidad tipo: Boquete, provincia de

Chiriquí, Panamá (Davis & Gardner, 2008), situada a 241 km de la localidad más cercana en la región Pacífica de Colombia (Pance, Valle del Cauca) (Ramírez-Chávez, 2008) y a 83,4 km al occidente del registro andino colombiano más cercano, en el municipio de Belén de Umbría, departamento de Risaralda (Berrío-Martínez, 2009), lo que cubre un vacío de información en el rango de distribución de la especie. Cabe destacar que la localidad de Pacurita posee características ecológicas que contrastan con las localidades documentadas más cercanas. El ejemplar CMCH 1285 sustenta la presencia de *E. chiriquinus* en ambientes de selva hiperhúmeda tropical del Chocó central, una de las regiones con mayor pluviosidad del mundo (precipitación promedio de 8.000 mm/año) (Rangel & Arellano, 2004), es decir, niveles muy superiores a los mencionados por Simmons & Voss (2008) para esta especie en selvas de tierras bajas en Paracou, Guyana Francesa (precipitación promedio anual por debajo de los 4.000 mm/año). En este sentido, el registro corroborado aquí representa una adición importante al rango ecológico de la especie. Ramírez-Chávez (2008) ha reportado la especie en otras localidades de la región Pacífica de Colombia: en la Isla Gorgona, departamento de Cauca (Alberico, 1986; Cadena, *et al.*, 1990; Murillo, *et al.*, 2013) y en Pance, aproximadamente 20 km al suroccidente de Cali en ambientes piemontanos de los Farallones de Cali, Valle del Cauca (USNM 483952) (Simmons & Voss, 1998; Alberico, *et al.*, 2000), en tanto que en otros registros del GBIF también se sugiere su presencia en El Cairo y Yotoco, Valle del Cauca. Hasta la fecha no existen registros de la especie en el Pacífico ecuatoriano.

También cabe resaltar que *E. chiriquinus* se ha registrado en ecosistemas altoandinos a elevaciones superiores a los 2.000 m s.n.m.: en ecosistemas de bosque montano siempre verde en Ecuador (Lee-Jr, *et al.*, 2008), y en elevaciones por encima de los 2.800 m s.n.m. en hábitats muy secos en Bolivia (Siles, 2007).

El departamento del Chocó, y en general el Pacífico colombiano, podría considerarse la región más diversa en quirópteros del país (Asprilla-Aguilar, *et al.*, 2016), y una de las más diversas a nivel global. Con la confirmación de la presencia de *E. chiriquinus* se ratifica la importancia de la investigación continuada en esta región, lo que ha resultado en importantes aportes al conocimiento de la quiropterofauna del país. Algunos ejemplos son la descripción de una nueva especie del género *Sturnira* (McCarthy, *et al.*, 2006) y nuevos registros de *Diclidurus ingens* (Mantilla-Meluk, *et al.*, 2009), de *Sturnira koopmanhilli* (Martínez-Arias & Solari, 2013), de *Lophostoma occidentale* (Marín-Vásquez, *et al.*, 2015), de *Diphylla ecaudata* (Echavarría-Rentería, *et al.*, 2017), de *Artibeus aequatorialis* (Palacios-Mosquera, *et al.*, 2019), de *Centronyteris centralis* (Palacios-Mosquera, *et al.*, 2020) y de *Platyrrhinus ismaeli* (Ramírez-Francel, *et al.*, 2020).

Agradecimientos

Los autores agradecen al biólogo Víctor Danilo Palacios Mayoral, curador de la Colección Teriológica y al Grupo de Investigación en Manejo y Gestión de la Vida Silvestre del Chocó de la Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luis Córdoba”, y a esta por apoyar la investigación científica en el departamento del Chocó. Agradecemos, asimismo, a la comunidad de Pacurita por permitirnos estudiar sus hermosas selvas, especialmente a Luis Beltrán (Guachené) por su apoyo y colaboración en campo.

Información suplementaria

Apéndice 1. Registros de *Eptesicus chiriquinus* para Colombia. Los números en negrilla indican las localidades en el mapa (Figura 2). Ver apéndice 1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1594/3187>

Contribución de los autores

VDPM: redacción del manuscrito, identificación taxonómica, revisión de la literatura, medición del espécimen y proceso editorial; LPM: redacción del manuscrito, revisión taxonómica de especímenes, revisión de la literatura, diagnóstico del espécimen, medición

y análisis morfométrico de especímenes, georreferenciación y elaboración del mapa de distribución actualizado de la especie, y proceso editorial; JDER: elaboración del mapa de distribución actualizado de la especie, revisión de la literatura y redacción del manuscrito; AMJO: redacción del manuscrito, revisión de la literatura y proceso editorial; HMM: revisión integral de manuscrito, elaboración de figuras, diagnosis del espécimen y redacción de manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Acosta-S, L.H., Poma-Urey, J.L., Ossa-López, P.A., Rivera-Páez, F.A., Ramírez-Chávez, H.E.** (2021). A new species of *Eptesicus* (Mammalia: Chiroptera: Vespertilionidae), from the sub-Andean Forest of Santa Cruz, Bolivia. *Therya*. **12** (3): 391-409.
- Aguirre, L.F., Vargas, A., Solari, S.** (2009). Clave de identificación de los murciélagos de Bolivia. Centro de Estudios en Biología Teórica y Aplicada. Cochabamba, Bolivia. 38 p.
- Alberico, M.** (1986). Los mamíferos: pp. 193-207 (en) Von Prah, y Alberico, M. (ed.) Isla de Gorgona, Universidad del Valle, Biblioteca Banco Popular, Cali.
- Alberico, M., Cadena, A., Hernández-Camacho, J.J., Muñoz-Saba, Y.** (2000). Mamíferos (Synapsida: Theria) de Colombia. *Biota Colombiana*. **1** (1): 43-75.
- Arguero, A. & Albuja, V.** (2012). Primer registro para el Ecuador del murciélago insectívoro *Eptesicus fuscus* (Chiroptera: Vespertilionidae). *Revista Politécnica*. **30** (3): 156-159.
- Arroyo-Cabral, J., Polanco, O.J., Wilson, D.E., Gardner, A.L.** (2008). Nuevos registros de murciélagos para el Estado de Nayarit, México. *Revista Mexicana de Mastozoología*. **12**: 141-162.
- Asprilla-Aguilar, A.A., Jiménez-Ortega, A.M., Mantilla-Meluk, H.** (2016). Murciélagos (Chiroptera) del departamento del Chocó, occidente colombiano. *Revista Biodiversidad Neotropical*. **6** (2): 188-211.
- Barquez, R.M., Sánchez, M.S., Bracamonte, J.C.** (2009). Nueva especie de *Eptesicus* (Chiroptera, Vespertilionidae) para Argentina. *Mastozoología Neotropical*. **16** (1): 199 - 203.
- Berrío-Martínez, J. J.** (2009). Riqueza, composición y abundancia de murciélagos en tres tipos de cobertura en agroecosistemas cafeteros, en el municipio de Belén de Umbria, Risaralda (Colombia). Tesis. Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Medellín, 91 pp.
- Cadena, A. M., Gómez-Laverde, G., Andrade, G., Peñuela, A.** (1990). Notas sobre la fauna de murciélagos de Gorgona. pp. 236-246 (en) Aguirre, J., Rangel, O. (Ed.) *Biota y Ecosistemas de Gorgona*, Fondo para la Protección del Medio Ambiente FEN, Editorial Presencia, Bogotá.
- Davis, W. & Gardner, A.** (2008). Genus *Eptesicus* Rafinesque, 1820. pp. 440-450 (en) Gardner, A.L (ed) *Mammals of South America. Volume 1: Marsupials, Xenarthrans, Shrews, and Bats*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Díaz, M.M., Solari, S., Aguirre, L.F., Aguiar, L.M.S., Barquez, R.M.** (2016). Clave de identificación de los murciélagos de Sudamérica—Chave de Identificação dos Morcegos da America do Sul. PCMA (Programa de Conservación de los Murciélagos de Argentina). Publicación Especial. 160 p.
- Díaz, M.M., Solari, S., Gregorin, S., Aguirre, L.F., Barquez, R.M.** (2021). Clave de identificación de los murciélagos neotropicales (Programa de Conservación de los Murciélagos de Argentina). Publicación Especial N° 4. 211 p.
- Echavarría-Rentería, J.D., Pino-M, Y.L., Rengifo-M, J.T., Sánchez-L, N., Quinto-M, J.** (2017). Reporte del vampiro de patas peludas *Diphylla ecaudata* Spix, 1823 (Chiroptera: Desmodontinae) para el Chocó biogeográfico colombiano. *Rev Colombiana Cienc Anim.* **9** (2): 198-202.
- Global Biodiversity Information Facility.** (2020). Occurrence Download (October 21, 2020). <https://doi.org/10.15468/dl.v75xdw>.
- Gutiérrez-Cifuentes, D.F., Brand-Alape, A., Mantilla-Meluk, H.** (2013). Primer espécimen de la Colección de Mamíferos de la Universidad del Quindío (CMUQ): registro de *Eptesicus chiriquinus* (Chiroptera: Vespertilionidae) por atropellamiento en la Autopista del Café, Quindío, Colombia. *Rev. Biodivers. Neotrop.* **3** (2): 131-136.

- Handley-Jr, C.O.** (1976). Mammals of the Smithsonian Venezuelan Project. Brigham Young University Science Bulletin, Biological Series. **20**: 1-91.
- Koopman, K.F.** (1994). Chiroptera: Systematics. Handbook of Zoology, vol. VIII, pt. 60, Mammalia., 1-217. Berlin de Gruyter, 217 p.
- Lee-Jr, T.E., Burneo, S.F., Marchán, M.R., Roussos, S.A., Vizcarra-Váscomez.** (2008). The Mammals of the Temperate Forests of Volcán Sumaco, Ecuador. Occasional Papers Museum of Texas Tech University. (276): 1-12.
- Mammal Diversity Database.** (2021). Mammal Diversity Database (1.31) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4429371>
- Mantilla-Meluk, H., Jiménez, A.M., Palacios, L., Baker, R.J.** (2009). Hallazgo inesperado de *Didelphis inermis*, Hernández-Camacho, 1955 Chiroptera, Emballonuridae, en el Chocó Biogeográfico colombiano. Mastozoología Neotropical. **16** (1): 229-252.
- McCarthy, T.J., Albuja-V. L., Alberico, M.S.** (2006). A new species of Chocoan *Sturnira* (Chiroptera: Phyllostomidae: Stenodermatinae) from western Ecuador and Colombia. Annals of Carnegie Museum. **75** (2): 97-110.
- Marín-Vásquez, A., Ramírez-Chávez, H.E., Rivas-Pava, P., Mantilla-Meluk, H.** (2015). New records of the Western Rounded Ear Bat, *Lophostoma occidentale* (Davis & Carter, 1978) (Chiroptera: Phyllostomidae), from Colombia. Check List. **11** (1): 1-5.
- Martínez-Arias, V.M. & Solari, S.** (2013). Extensión del área de distribución de *Sturnira koopmanhilli* McCarthy et al. 2006 en Colombia. Therya. **4** (3): 617-625.
- Miller, G.S. JR.** (1967). The families and genera of bats. Historiae Naturalis Classica LVII. Wheldon & Wesley, New York. 195-210 p.
- Miranda, J.M.D., Bernardi, I.P., Passos. F.C.** (2006). A new species of *Eptesicus* (Mammalia: Chiroptera: Vespertilionidae) from the Atlantic Forest, Brazil. Zootaxa. **1383**: 57-68.
- Molinari, J., Aguirre, L., Samudio, R.** (2008). *Eptesicus chiriquinus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2008: e. T136524A4304373.
- Murillo, O.E., Bedoya, M.J., Velandia-Perilla, J.H., Yusti-Muñoz, A.P.** (2013). Riqueza de especies, nuevos registros y actualización del listado taxonómico de la comunidad de murciélagos del Parque Nacional Natural Gorgona, Colombia. Revista de Biología Tropical. **62** (1): 407-417.
- Palacios-Mosquera, L., Copete-Mosquera, Y.C., Jiménez-Ortega, A.M., Mantilla-Meluk, H., Velazco, P. M.** (2019). New record of *Artibeus aequatorialis* Andersen, 1906 (Chiroptera: Phyllostomidae) for northwestern Colombia. Therya. (1): 45-47.
- Palacios-Mosquera, L., Quinto-Mosquera, J., Echavarría-Rentería, J.D., Jiménez-Ortega, A.M., Moreno-Amud, L.A., Velazco, P.** (2020). New record of *Centronycteris centralis* Thomas, 1912 (Chiroptera: Emballonuridae) from the Chocó Biogeographic Region, with an updated distribution map. Bat Research & Conservation. **13** (1): 34-37.
- Poma-Urey, J.L., Acosta-S L.H., Ingala, M.R.** (2019). Dos especies de *Eptesicus* Rafinesque, 1820 (Chiroptera, Vespertilionidae) registradas por primera vez en Bolivia. Ecología en Bolivia. **54** (2): 155 -161.
- Rangel-Ch, O.J. & Arellano, H.P.** (2004). Clima del Chocó Biogeográfico de Colombia. pp. 39-82. En Rangel-Ch. O. J (ed.) Diversidad Biótica IV, El Chocó Biogeográfico/ Costa Pacífica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.
- Ramírez-Chávez, H.E.** (2008). Revisión taxonómica de los murciélagos del género *Eptesicus* Rafinesque, 1820 (Mammalia; Chiroptera: Vespertilionidae) para Colombia. Tesis Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 78 p.
- Ramírez-Chávez, H.E., Suárez-Castro, A.F., González-Maya, J.F.** (2016). Cambios recientes a la lista de los mamíferos de Colombia. Notas Mastozoológicas. **3** (1): 1-19.
- Ramírez-Chávez, H.E., Morales-Martínez, D.M., Pérez, W.A., Velázquez-Guarín, D., Mejía-Fontecha, I.Y., Ortiz-Giraldo, M., Ossa-López, P.A., Rivera-Páez, F.A.** (2021a). A new species of small *Eptesicus* Rafinesque (Chiroptera: Vespertilionidae) from northern South America. Zootaxa. **5020** (3): 489-520.
- Ramírez-Chávez, H.E., Velázquez-Guarín, D., Ocampo-Velázquez, J.D., Mejía-Fontecha, I.Y., Acosta, A., Colmenares-Pinzón, J.E., Harold-Castaño, J., Roncancio-Duque, N.** (2021b). Mammals of the Natural National Park Selva de Florencia, Caldas, Colombia. Therya. **12** (2): 461-475.
- Ramírez-Fráncel, L.A., García-Herrera, L.V., Reinoso-Flores, G.** (2020). Using Max Ent modeling to predict the potential distribution of *Platyrrhinus ismaeli* (Phyllostomidae). Therya. **11** (2): 203-212.

- Rodríguez-Herrera, B., Ramírez-Fernández, J.D., Villalobos-Chávez, D., Sánchez, R.** (2014). Actualización de la lista de mamíferos vivos de Costa Rica. *Mastozoología Neotropical*. **21** (2): 275-289.
- Sánchez, R.T., Montani, M.E., Tomasco, I.H., Díaz, M.M., Barquez, R.M.** (2019). A new species of *Eptesicus* (Chiroptera: Vespertilionidae) from Argentina. *Journal Mammalogy*. **100** (1): 118-119.
- Siles, L.** (2007). Noteworthy records of *Eptesicus chiriquinus* and *Eptesicus andinus* (Vespertilionidae) from Bolivia. *Bat Research News*. **48** (2): 31-33.
- Simmons, N.B., Voss, R.S.** (1998). The mammals of Paracou, French Guiana: A Neotropical lowland rainforest fauna, Part 1. Bats. *Bull. Amer. Mus. Nat. Hist.* **237**: 1-219.
- Simmons, N.B.** (2005). Order Chiroptera. En Wilson, D. E. & Reeder, D. M. (Eds.). *Mammal species of the World. A taxonomic and geographic reference*. 3rd ed. Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland. pp?
- Sociedad Colombiana de Mastozoología.** (2018). Lista de referencia de especies de mamíferos de Colombia. Versión 1.2. Conjunto de datos/Lista de especies. https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=mamiferos_col#
- Solari, S.** (2019). *Eptesicus chiriquinus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T136524A21981386. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20191.RLTS.T136524A21981386.en>
- Solari, S. & Martínez-Arias, V.** (2014). Cambios recientes en la sistemática y taxonomía de murciélagos Neotropicales (Mammalia: Chiroptera). **5** (1): 167-196.
- Solari, S., Muñoz-Saba, Y., Rodríguez-Mahecha, J.V., Deffer, T.R., Ramírez-Chávez, H.E., Trujillo, F.** (2013). Riqueza, endemismo y conservación de los mamíferos de Colombia. *Mastozoología Neotropical*. **20** (2): 301-365.
- Thomas, O.** (1920). On Neotropical bats of the genus *Eptesicus*. *Ann. Mag. Nat. Hist., ser.* **9** (5): 360-67.
- IUCN.** (2020). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-1. <https://www.iucnredlist.org/species/136524/21981386>
- Wilson, D. & Mittermeier, R.** (2019). *Handbook of the mammals of the world*. Vol. 9: Bats. Lynx Editions. p. 716-982.
- Zortéa, M., Zenha, F.S.M., Carrijo, V.A.** (2013). The occurrence of *Eptesicus chiriquinus* Thomas, 1920 (Chiroptera: Vespertilionidae) in the Brazilian Atlantic Forest with comments on the species' distribution. *Check List*. **9** (3): 672-674.

Original article

Assessment of the level of adjustment of three epidemiological models in the analysis of epidemics with incidences less than 100% such as the lethal wilt of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Evaluación del nivel de ajuste de tres modelos epidemiológicos en el análisis de epidemias con incidencias inferiores al 100% como la marchitez letal de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.)

✉ Juan Manuel López-Vásquez^{1,*}, ✉ Jairo Castaño-Zapata²

¹ Programa de Plagas y Enfermedades, Centro de Investigaciones en Palma de Aceite - Cenipalma, Santa Marta (Magdalena), Colombia

² Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Abstract

The production of oil palm is a major agricultural activity in Colombia. Lethal wilt (LW) of the oil palm is one of the most devastating diseases in the Eastern zone of the country. Several epidemiological models used in epidemic analyses assume that there is a constant area where the host will become diseased at the end of the epidemic (maximum incidence of disease = 100%). Based on the analysis of three different epidemics, we demonstrated the error in the application of the model that best fits the observed data when the maximum incidence of the disease (K_{max}) is below the assumed. We assessed the fit of the monomolecular, logistic, and Gompertz models at different final incidence values of the disease including the maximum observed ($y_i + 0,1$). We analyzed the data with linear regression and residuals variance and distribution. We measured the relative quality level of fit of the model for each K_{max} by determining coefficients (R^2) and the Akaike and Bayesian information criteria (AIC & BIC). The monomolecular model showed a tendency to increase the level of adjustment when K_{max} assumed values were close to 1 while the logistic and Gompertz models remained stable regardless of the evaluated K_{max} values. The consequences of assuming a K_{max} with values equal to 1 reflected not only the erroneous estimation of parameters such as y_0 and r but also gave rise to a misinterpretation of the temporal behavior of the epidemic.

Keywords: Lethal wilt; *Elaeis guineensis*; Epidemiology; Monomolecular; Logistic; Gompertz.

Resumen

La producción de palma de aceite es muy importante en Colombia. La marchitez letal de la palma de aceite es una enfermedad muy limitante en la zona oriental colombiana. Algunos modelos empleados en el análisis de estas epidemias se basan en el supuesto de que existe un área constante donde el hospedante llega a enfermarse al final de ellas (incidencia máxima de la enfermedad = 100%). El análisis de tres epidemias diferentes demostró el error que se comete en la aplicación del modelo que mejor se ajusta a los datos observados, con una máxima incidencia de la enfermedad (K_{max}) por debajo de la asumida. El ajuste de los modelos monomolecular, logístico y Gompertz se hizo con diferentes incidencias, incluida la máxima observada ($y_i + 0,1$). Los datos se sometieron a análisis de regresión lineal y de varianza y distribución de los residuales. La calidad del ajuste se midió mediante los coeficientes de determinación (R^2), el análisis de regresión lineal y los criterios de información Akaike (CIA) y bayesiano (CIB). Se evidenció la sensibilidad del modelo monomolecular cuando la incidencia máxima de la enfermedad se asumió por encima del valor real, contrario a lo observado

Citation: López-Vásquez JM, Castaño-Zapata J. Assessment of the level of adjustment of three epidemiological models in the analysis of epidemics with incidences less than 100% such as the lethal wilt of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):118-130, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefy.1571>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**

Juan Manuel López-Vásquez;
jlopezv@cenipalma.org

Received: October 22, 2021

Accepted: January 21, 2022

Published on line: February 7, 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

en los modelos logístico y Gompertz, cuyos valores se mantuvieron estables independientemente del aumento de la K_{max} evaluada. Las consecuencias de asumir una K_{max} con valores igual a 1 no solamente se reflejan en la estimación errónea de parámetros como el y_0 y el r , sino que también conduce a una mala interpretación del comportamiento de la epidemia.

Palabras clave: Marchitez letal; *Elaeis guineensis*; Epidemiología; Modelo monomolecular; Modelo logístico; Gompertz.

Introduction

The current lack of understanding of the causal agent of LW leads to uncertainty about the influence of various factors on the dynamics of the disease, which makes it difficult to develop a management plan. In this context, it has been necessary to largely resort to plantations history and basic management practices such as the reduction of the inoculum starting from the early elimination of diseased palms, which implies a strict follow-up, to the appearance of cases through weekly phytosanitary censuses (Cenipalma, 2019). Thus, those who have to deal with the disease have extensive records of historical data. However, there are few methodological tools that allow converting these data into information and, from there, into knowledge about the behavior of the disease on a time scale.

An epidemic in a crop can be regarded as a change in the incidence of the disease in a host population over time and space. The characterization of the progression of those changes over time can provide valuable epidemiological insights. This characterization is important to understand how diseases develop in plant populations and how management measures affect epidemics (Campbell & Madden, 1990; Van der Plank, 1963). The graphical representation of the incidence of a disease (y) versus time (t) is known as disease progression or development curve. For many purposes, this is the main description of an epidemic and focuses on the interactions occurring among the host, the pathogen, and the biological and physical environment in the development of the disease whose main objective is to understand the complex interactions occurring. This information can be used, for example, to predict the incidence of the disease at a given time, quantify the effects of management strategies on epidemics, or, ultimately, to develop a theoretical basis for determining whether an epidemic might occur, and, if it does, to identify the factors affecting both the disease development rate (r) and its final incidence (y_l) (Madden, *et al.*, 2007; Xu, 2006).

In principle, plant disease epidemics can be classified into two basic types, monocyclic and polycyclic, depending on the source of the inoculum that comes into contact with the host over the course of the disease and the number of infection cycles per crop cycle (Madden, *et al.*, 2007). Therefore, the classification of an epidemic as monocyclic or polycyclic depends on the type of behavior over time as measured by the level of adjustment of the different growth models to the values observed in the field. Thus, a monocyclic epidemic can be described quite well using a monomolecular model while a polycyclic epidemic can be described with a logistic or Gompertz model (Arneson, 2001). Epidemiological processes are characterized by using growth models with varying degrees of complexity. The selection of an appropriate model allows the characterization of an entire epidemic with few parameters. It is, therefore, relatively easy to compare epidemics and assess the effects of biological and environmental factors, as well as the possible managements for implementing more effective, efficient, and sustainable strategies in integrated disease management (Forrest, 2007; Madden, 1986). The resulting disease development curves are graphical representations of the development dynamics of the epidemics and their parameters can be fitted to the obtained data using any standard statistical package (Van Maanen & Xu, 2003; Neher, *et al.*, 1997). In this line, multiple fully functional applications have been developed in different programming languages such as Java, with the EpiModel software (Nutter & Parker, 1997) and Excel spreadsheets (Bowen, 2015), and R packages such as epihy (Gigot, 2018) and epifitter (Alves & Del Ponte, 2021).

Most of the mathematical models used for determining disease progression curves can be estimated using only two parameters such as y_0 (initial disease or constant of integration) and r (rate of disease development). Using these two, two or more epidemics can be compared and a considerable understanding of disease dynamics is achieved. However, not all epidemics can be described by two-parameter models (Madden, *et al.*, 2007). The values observed over time in the development of a disease do not often fit any specific model, which most probably reflects the fact that the biological basis of the models is only a simple approximation to a much more complex pathosystem and, consequently, the model lacks the necessary flexibility to be adapted to various aspects of the development of the disease (Park & Lim, 1985). The classical growth-curve models for epidemics analysis include several implicit assumptions, which may lead to misinterpretations about the progression of the disease if they are not considered (Neher & Campbell, 1992). Many of those models, such as the monomolecular, logistic, and Gompertz, assume a constant host area that becomes diseased by the end of the epidemic implying a maximum disease incidence of 100%. Consequently, the models used to describe epidemics assume an asymptote or a maximum disease incidence (K_{max}) equal to 1 (Campbell & Madden, 1990; Seem, 1988). However, this assumption is not valid for many diseases and the mathematical description of the epidemic is thus inaccurate, imprecise, and inappropriate. Besides, in some epidemics, such as rusts, powdery mildews, and viral diseases caused by obligate parasites, it is only possible to visualize a maximum disease intensity between 25 and 40%, far below the expected 100% (Jeger, 1982; Campbell & Madden, 1990; Gilligan, 1990; Kranz, 2003; Madden, *et al.*, 2007). This has resulted in the ongoing use of growth models for epidemiological analysis that do not consider the maximum disease intensity. Consequently, important parameters, such as the growth or disease development rate, are not properly estimated, or, simply, a given disease is analyzed in a model with different behavior.

Several researchers have reported this type of error in the description of epidemics. For example, Turner, *et al.* (1969), Kiyosawa (1972), and Analytis (1973, 1979) agreed that the value of the asymptote or the K_{max} could affect the calculation of r in generalized Logistic models in the description of epidemics. Kushalappa & Ludwing (1982) indicate that empirically determining the value of the asymptote (K_{max}) greatly improves the goodness of fit of disease development models. Park & Lim (1985) mathematically illustrate how disease development rates (r) are underestimated when calculated with traditional models under the assumption that the maximum disease incidence is 1 ($K_{max} = 1$) when really the maximum incidence is below this value ($K_{max} < 1$). Neher & Campbell (1992) quantified the magnitude of underestimation in r when values above a real incidence are assumed in models such as the monomolecular, logistic, and Gompertz. Since K_{max} affects rates of disease development, Neher & Campbell (1992) suggested for $K_{max} < 1$ shape parameters m with the values 0, 1, and 2 for the monomolecular, Gompertz and logistic functions, respectively, to use weighted mean absolute rates $\rho = rK/(2m + 2)$ with $K = K_{max}$ and the rate disease progress r calculated by the function used to fit the curve. This approach introduces the shape parameter m as a measurement term and descriptor. Parameter K can be dropped from the equation (if different with the same m) and then rK could be calculated as an overall (mean) measure of the absolute rate of disease development (Neher & Campbell, 1992). Although this approach manages to correct the underestimation of parameters such as the rate (r) of development of the disease, it fails to improve the classification of the model that best fits, which still leads to generating erroneous or biased interpretations of pathosystems with monocyclic or polycyclic behaviors completely different from the real one. The objective of the following study is to demonstrate the error committed in the classification of the model that best fits the data when K_{max} is lower based on the temporal analysis of three epidemics caused by lethal wilt (LW) in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations.

Methodology

Plot selection

We obtained the historical disease monitoring records for three plots sowed with susceptible cultivars of *E. guineensis* between January 2015 and December 2017 (36 months) at the *Luker Agrícola* (4°35'N, 72°49'W, 198 m. a.s.l.) and *Palmar de Oriente* plantations (4°29'N, 72°50'W, 195 m. a.s.l.) located in the municipality of Villanueva (Casanare), Colombia, an area with a high incidence of the disease. The three plots we selected satisfied the following characteristics (listed from highest to lowest importance): (i) final incidence with the highest record (y_f); (ii) known initial incidence (y_0), and (iii) records with the longest follow-up time (t). All historical disease-monitoring records were done palm by palm by personnel trained in the detection of plants with initial symptoms of the disease at 30-day intervals. The total population of plants evaluated from plots 1, 2, and 3 corresponded to 1,315 (8.5 ha), 2,842 (17.8 ha), and 2,835 (17.7 ha), respectively.

Models used when K_{max} is a parameter

Given that the monomolecular, logistic, and Gompertz models generally assume that the maximum disease incidence is 1, we modified the mathematical equations of the traditional models in terms of proportion to the differential, nonlinear, and linearized versions in which the maximum disease incidence was a parameter (**Table 1**).

Assessment of goodness of fit of the models

We assessed the goodness of fit of the monomolecular, logistic, and Gompertz models at different final incidences including the maximum observed ($y_f + 0.1$), which were 0.43, 0.28, and 0.25, respectively (**Table 2**). Then, we subjected the data to linear regression analysis, analysis of variance, and distribution of residuals using *R* v1.1.463 (**R Core Team**, 2018) and the statistical package ‘nlme’ v3.1-144 (**Pinheiro, et al.**, 2004). We calculated the F-test on the estimated parameters as the ratio between each of them and the asymptotic standard error to determine whether the parameters contributed to fit the model. Higher F-values are associated with higher contributions of the estimated parameters to fit the model (**Hosmer & Lemeshow**, 2000). The asymptotic standard error is used to assess the goodness of fit of the models to the real points of the epidemic using the least-squares regression associated with the coefficients estimated by each model. It is accepted that small standard errors indicate more accurate estimates (**McCullagh & Nelder**, 1992).

Comparison of the goodness of fit of the models

We used the statistical package ‘AICcmoavg’ v2.2-2 (**Mazerolle**, 2019) to compare the goodness of fit of the models for each K_{max} while the relative goodness of fit of the three models was determined from the estimated coefficients of determination (R^2) and the implementation of the Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) information criteria.

The R^2 of the linear regression analyses determines the ability of the model to replicate the results and the proportion of variation of the results that the model can explain. A coefficient value closer to 1 means less variation in the estimate. The AIC uses a relative

Table 1. Differential, nonlinear, and linearized equations of the models used to analyze the disease progression data when the maximum disease incidence (K_{max}) is a parameter

Model	dy/dt	$y =$	Linearized form
Monomolecular	$r_M * (K - y)$	$K\{1 - [(K - y_0)/K] \exp(-r_M t)\}$	$\ln[K/(K - y)] = \ln[K/(K - y_0)] + r_M t$
Logistic	$r_L y(1 - y/K)$	$K/[1 + \exp(-\{\ln[y_0/(K - y_0)] + r_L t\})]$	$\ln[y/(K - y)] = \ln[y_0/(K - y_0)] + r_L t$
Gompertz	$r_G y[\ln(K) - \ln(y)]$	$K\{\exp[\ln(y_0/K) \exp(-r_G t)]\}$	$-\ln[-\ln(y/K)] = -\ln[-\ln(y_0/K)] + r_G t$

Source: Campbell, 1998

K : K_{max} : maximum disease incidence (y) or asymptote of the disease progression curve; Y : disease in proportion at the time of observation; y_0 : disease in proportion at the first observation; r^* : disease growth rate of a specific model; t : considered time interval

Table 2. Parameters of maximum disease incidence (K_{max}) assessed in three plots of the *Luker Agrícola* and *Palmar de Oriente* plantation

Plot	Maximum observed disease incidence ($y_1 + 0.1$)							
1	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.45	0.43 ($y_1 + 0.1$)
2	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.28 ($y_1 + 0.1$)
3	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.25 ($y_1 + 0.1$)

$y_1+0.1$: maximum incidence observed per plot in proportion

value between the goodness of fit of the model and its complexity calculated by the formula $AIC = -2 \log(L(\theta|y)) + 2K$, where $\log(L(\theta|y))$ is the numerical value of the log-likelihood function at its maximum point and K is the number of estimated parameters in the function. The BIC applies a higher penalty for the number of parameters in the model calculated by the formula $BIC = -2 \log(L(\theta|y)) + K \log n$; as in the previous formula, $\log(L(\theta|y))$ is the numerical value of the log-likelihood function at its maximum point, K is the number of estimated parameters in the function, and n is the number of parameters in the model. The farther the AIC and BIC values are from zero, the higher the goodness of fit of the model to the observed values (Burnham & Anderson, 2002).

Results and discussion

After 36 months of observations in the three epidemics evaluated, 15, 22, and 18 plants died on average per month, respectively, for a total of 2,001 plants, i.e., 29% of the 6,992 plants evaluated. We assessed all models based on their goodness of fit measured by linear regression tests, analysis of variance, and 95% confidence intervals. **Table 3** shows the F-test values of the least-squares method for the analysis of variance, the coefficient estimates, the asymptotic standard error, and the 95% confidence interval for the coefficients of the three models estimated at different maximum incidences of LW in the three analyzed epidemics, respectively (**Table S1, S2, and S3**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1571/3188>).

The F-test values indicated that the estimated parameters contributed significantly to the fit of the disease progression curves in the three epidemics, regardless of the maximum disease incidence. We also found that the estimates calculated by the three models contributed significantly to the fit of the coefficients y_0 and r by confirming that the 95% confidence intervals did not contain a value equal to zero.

A more detailed analysis of the F-test and the asymptotic standard error per plot revealed variations between the models as the maximum incidence parameter was adjusted to a real value of the disease. In general, the monomolecular model showed higher F-test values and lower asymptotic standard errors when we assessed maximum asymptotes of 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, and 0.5 in the epidemics. However, there were evident changes as the maximum incidence parameter (K_{max}) was adjusted to the real observed value changing from the monomolecular to the Gompertz model in the analyzed epidemics with maximum asymptotes of 0.45 and 0.43, 0.40 and 0.28, and 0.25 (**Table 3**) corresponding to plots 1, 2, and 3, respectively.

Figures 1, 2, and 3 represent the variations when the parameter K_{max} changed from a theoretical value ($K_{max} = 1$) to a real value and its effect on the estimates of the LW development rate. The R^2 and the AIC and BIC applied to assess the relative goodness of fit of the model to the data observed showed the same trend evident in the F-test, the asymptotic standard error, and the graphic representations of the goodness of fit of the models (**Figure 4**).

Table 3. Linear regression analysis of the three growth models assessed at different asymptotes or maximum disease incidence (K_{max}) of the records corresponding to plots 1, 2 and 3

Kmax	Model	F-test values	Coefficients	Estimates	Asymptotic standard error	95% confidence interval	
						Lower limit	Upper limit
Plot 1							
1.00	Monomolecular	1431.289674**	y_0^1	0.002964367	0.00937395	-0.016085792	0.022014526
			r_L^2	0.016714745	0.00044181	0.015816878	0.017612612
	Logistic	137.0899723**	y_0	-3.071511341	0.170775253	-3.418568411	-2.724454272
			r_L	0.094241267	0.008048932	0.077883868	0.110598665
	Gompertz	287.6131306**	y_0	-1.166184266	0.053913631	-1.275749946	-1.056618586
			r_G	0.043093946	0.002541042	0.037929927	0.048257966
0.43	Monomolecular	365.7086095**	y_0	-0.57180627	0.116947313	-0.809471805	-0.334140735
			r_M	0.105407418	0.005511929	0.094205831	0.116609004
	Logistic	968.1729275**	y_0	-2.802311908	0.12473964	-3.055813357	-2.54881046
			r_L	0.182933939	0.005879194	0.170985979	0.1948819
	Gompertz	1054.969355**	y_0	-1.484957753	0.089138158	-1.666108285	-1.303807221
			r_G	0.136457343	0.004201235	0.127919406	0.14499528
Plot 2							
1.00	Monomolecular	1011.878966**	y_0^1	-0.053902304	0.006740292	-0.067600226	-0.040204383
			r_M^2	0.010105466	0.000317682	0.009459859	0.010751072
	Logistic	213.335392**	y_0	-5.280915097	0.207018695	-5.701627704	-4.86020249
			r_L	0.142512958	0.009757148	0.122684048	0.162341869
	Gompertz	706.3612045**	y_0	-1.748302626	0.036880859	-1.823253548	-1.673351703
			r_G	0.04619849	0.001738258	0.042665923	0.049731056
0.28	Monomolecular	97.77702297**	y_0	-0.75450794	0.19278383	-1.146291821	-0.362724059
			r_M	0.089846744	0.009086234	0.071381294	0.108312194
	Logistic	775.7687896**	y_0	-4.708555057	0.169305304	-5.052624831	-4.364485283
			r_L	0.222254237	0.007979651	0.206037635	0.238470838
	Gompertz	317.5515829**	y_0	-2.192142651	0.16195157	-2.521267839	-1.863017462
			r_G	0.136020897	0.007633057	0.12050866	0.151533135
Plot 3							
1.00	Monomolecular	1876.458036**	y_0^1	-0.035405942	0.004207057	-0.043955711	-0.026856173
			r_M^2	0.008589368	0.000198286	0.008186402	0.008992333
	Logistic	111.6098686**	y_0	-5.296409667	0.282329724	-5.870172699	-4.722646636
			r_L	0.140579254	0.013306687	0.113536813	0.167621696
	Gompertz	305.9106851**	y_0	-1.707792134	0.052170333	-1.813815007	-1.601769261
			r_G	0.043006516	0.002458878	0.038009475	0.048003557
0.25	Monomolecular	171.1757723**	y_0	-0.588192091	0.129213662	-0.850785846	-0.325598336
			r_M	0.079678824	0.006090063	0.067302327	0.092055321
	Logistic	385.4504086**	y_0	-4.462901455	0.228748933	-4.927775217	-3.998027693
			r_L	0.211668711	0.010781332	0.189758408	0.233579013
	Gompertz	700.4618084**	y_0	-1.968300076	0.099877178	-2.171274923	-1.765325229
			r_G	0.124586741	0.004707384	0.115020187	0.134153296

Values in bold indicate coefficients with the highest contribution to the model fit according to the standard asymptotic error test.

** Level of significance of 1%; 1y_0 : disease in proportion in the first observation; $^2r^*$: disease growth rate of a specific model

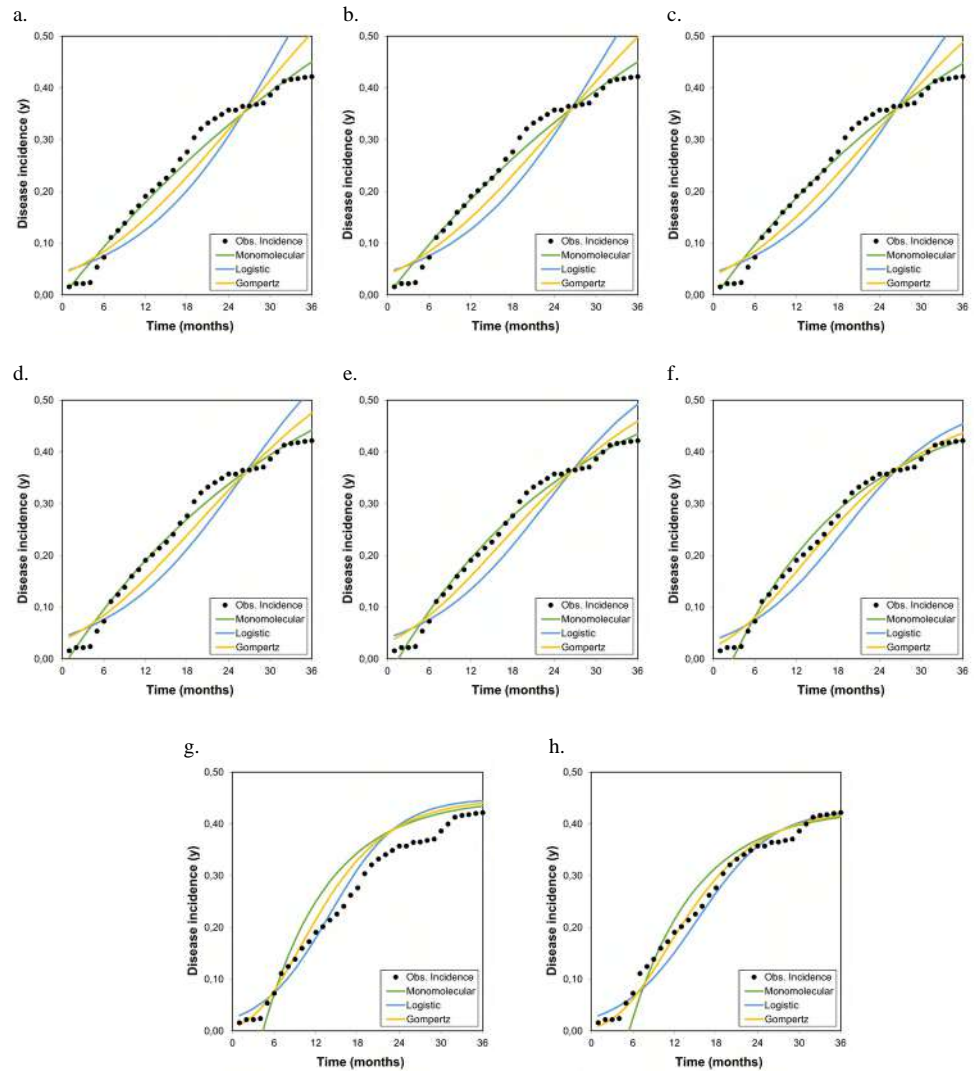


Figure 1. Graphical representation of the goodness of fit of the models to the disease progression curves at different asymptotes or maximum disease incidences (K_{max}) corresponding to the records collected from plot 1

r_M , r_L , and r_G represent the growth or disease development rates in the monomolecular, logistic, and Gompertz models, respectively.

As the K_{max} parameter approached the theoretical maximum incidence ($K_{max} = 1$), the model that best fitted the observed values in the three analyzed epidemics was the monomolecular. However, its goodness of fit in each of the tests did not faithfully represent the behavior of the disease when the actual maximum incidence was much lower than 1. When the K_{max} was assumed as the real one, i.e., 0.43, 0.28, and 0.25 for epidemics 1, 2, and 3, respectively, the goodness of fit measured by the R^2 from the linear regression analyses and the AIC and BIC showed that the model that best fitted the observed values was the Gompertz.

These results demonstrate that the monomolecular model has high sensitivity when assuming a theoretical asymptote equal to 1 ($K_{max} = 1$), which was further supported by the values obtained in the R^2 , AIC, and BIC analyses. When the asymptote was below 0.50, the goodness of fit gradually decreased and other models with better fits acquire major importance as is the case of the Gompertz model given that with the maximum

observed incidences (0.43, 0.28, and 0.25 for plots 1, 2, and 3, respectively), the LW development curves were fitted to the development curves observed in the three epidemics (**Figures 1, 2, and 3**). It was clear from these Figures that below 0.50, the best settings of LW development rate were achieved when the models were fitted to the maximum disease incidences with low values. Consequently, the underestimation of highly relevant epidemiological parameters, such as the rate (r) of disease development, is extremely likely not only in sensitive models such as the monomolecular one but also in the logistic and Gompertz models when the maximum disease incidence is assumed to be higher than the real value.

Park & Lim (1985) initially observed that assuming an asymptote equal to 1 in logistic functions can lead not only to underestimate the rate (r) of disease development but also to incorrectly classify its values when fitting a data set with real asymptotes below 1 differing from each other. **Neher & Campbell** (1992) found that the greatest underestimation of the

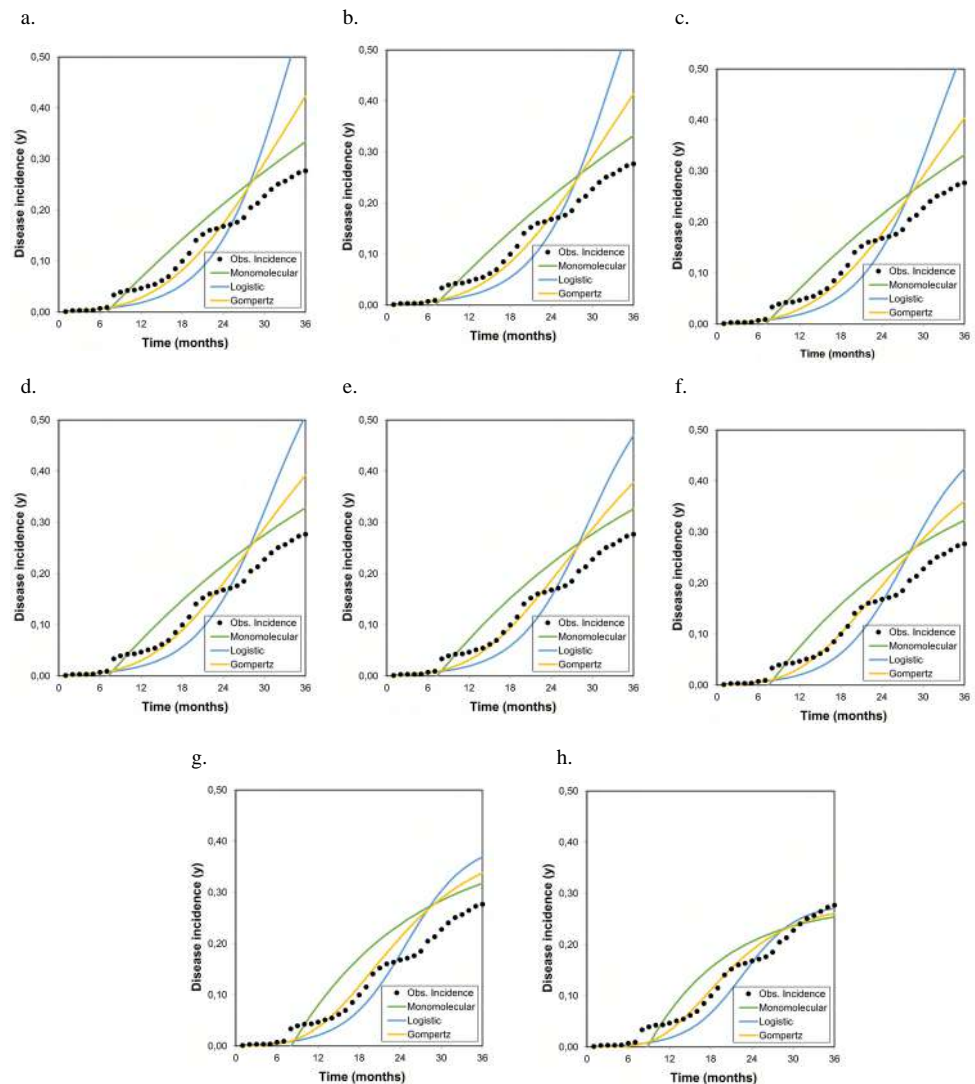


Figure 2. Graphical representation of the goodness of fit of the models to the disease progression curves at different asymptotes or maximum disease incidences (K_{max}) corresponding to the records collected from plot 2
 r_M , r_L , and r_G represent the growth or disease development rates in the monomolecular, logistic, and Gompertz models, respectively.

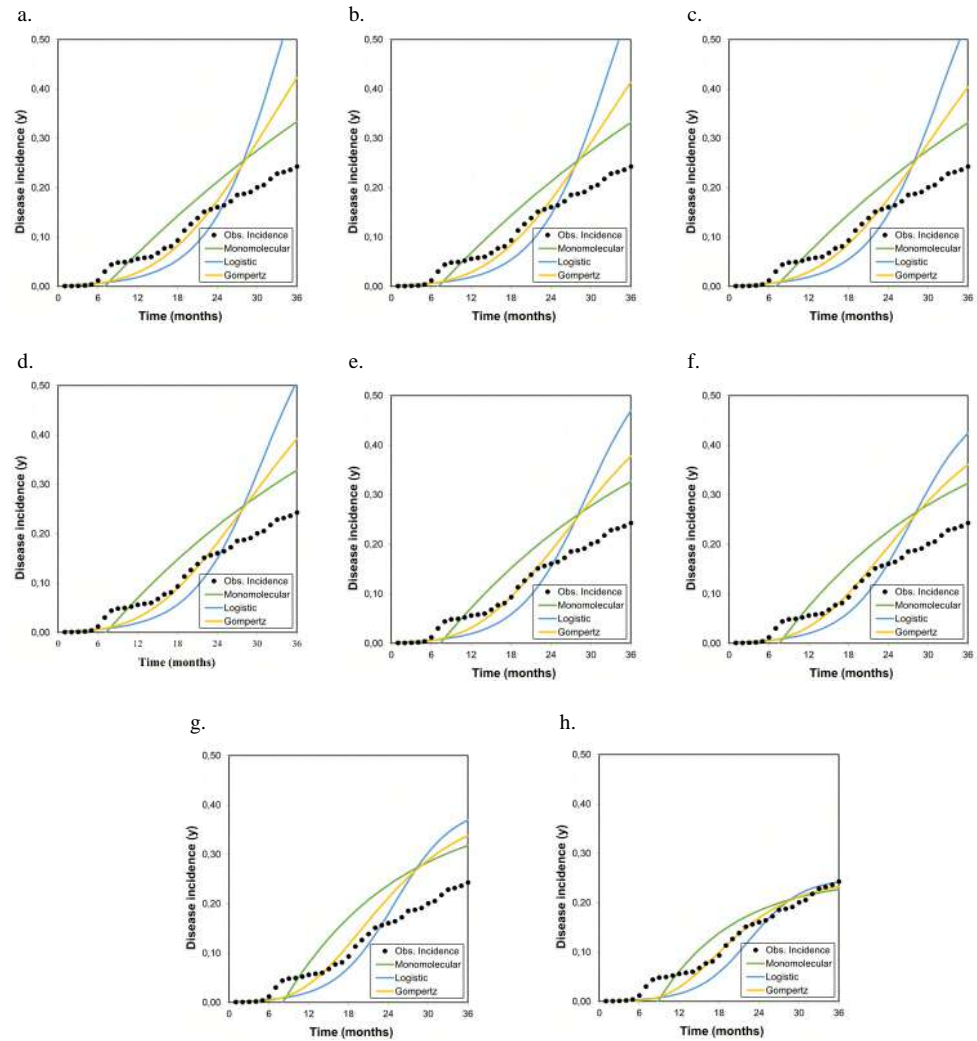


Figure 3. Graphical representation of the goodness of fit of the models to the disease progression curves at different asymptotes or maximum disease incidences (K_{max}) corresponding to the records collected from plot 3

r_M , r_L , and r_G represent the growth or disease development rates in the monomolecular, logistic, and Gompertz models, respectively.

rate (r) of disease development occurred most notably when they used the monomolecular model and the r was higher when K_{max} diminished considerably, regardless of the rate of disease development or growth rate, which agrees with our results. Furthermore, these authors concluded that the extent of disease development rate underestimation depended on the model, the disease growth rate itself, and the proximity of the real value of K_{max} to 1 because underestimations were more pronounced with lower real maximum incidence values, higher disease growth rates, and prolonged epidemics.

Recently, López-Vásquez, *et al.* (2021) conducted a study to identify suitable tools for the epidemiological analysis of the LW pathosystem and found that the exponential, monomolecular, logistic, Gompertz, and Richards models using a $K_{max} = 1$ did not meet the assumptions of normality and constant variance, which resulted in a poor fit of the models to the observed values, both in linear and nonlinear models, thereby considering the area under the disease progression curve (AUDPC) as a descriptive alternative for this disease. The variation of the models best fitted to the observed data in the three epidemics

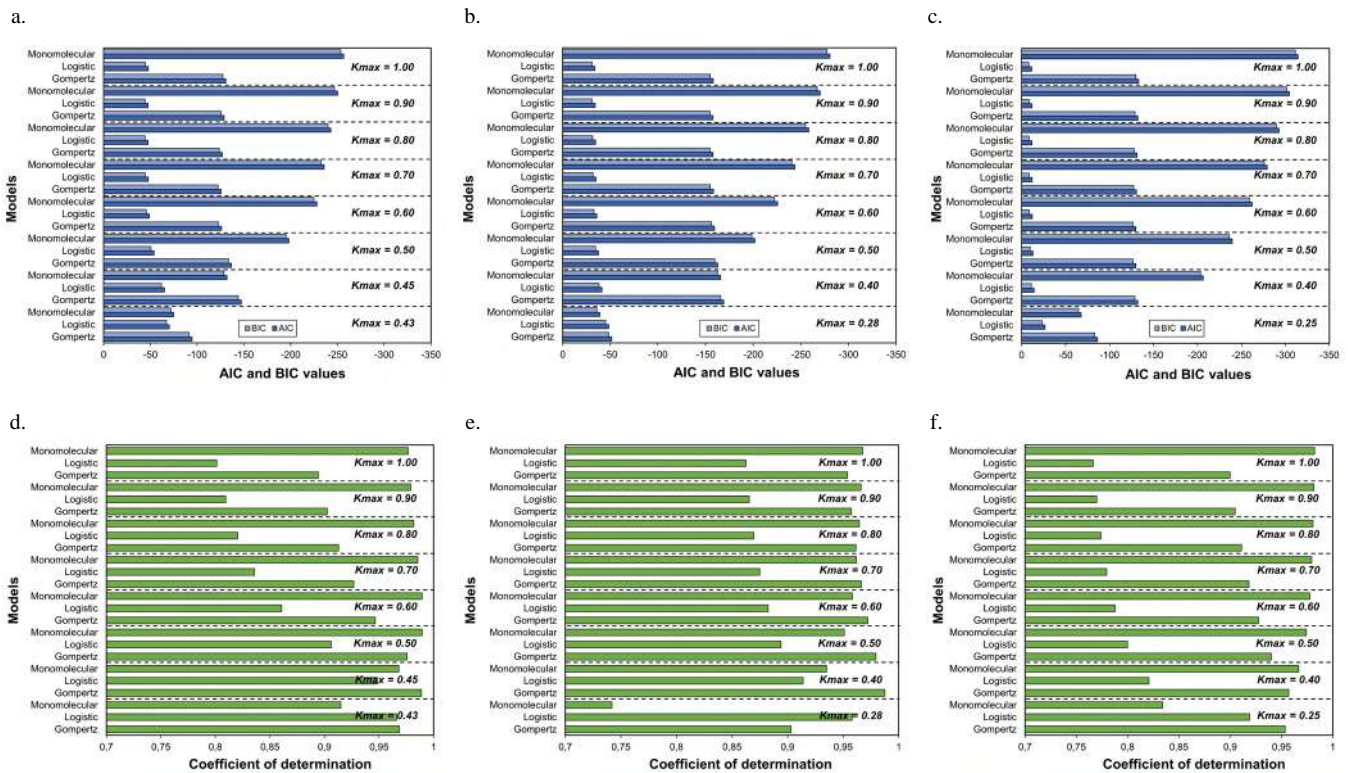


Figure 4. Goodness of fit measured by the Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) information criteria (A, B, and C) and the coefficients of determination (R^2) of the linear regression analyses (D, E, and F) for each of the three growth models analyzed at different asymptotes or maximum disease incidences (K_{max}). A and D. Plot 1; B and E. Plot 2; C and F. Plot 3

we evaluated was influenced by the change in the maximum incidence. This variation in the goodness of fit associated with the maximum incidences was more evident in the monomolecular model than in the logistics and Gompertz models as the K_{max} parameter approached the absolute value of 1. However, this trend changed when it was adjusted to the maximum real disease incidence while the Gompertz and logistic models had a better fit of the data to the observed values in the three epidemics.

Our results demonstrated the sensitivity of the monomolecular model when the maximum disease incidence was assumed as higher than the real value. Besides, this model was the only one that tended to an increase in the goodness of fit when the maximum disease incidence values were approaching 1, as opposed to the logistic and Gompertz models that had stable values regardless of the increase in the maximum incidence. All epidemiological procedures used in this study showed that assuming 100% of the maximum disease incidence ($K_{max} = 1$) when the final disease incidence was below this value had a significant effect on the epidemiological analysis producing inaccuracies not only by underestimating the rate of disease development but also in the selection of the best-fit model, which consequently led to errors in the mathematical description of the epidemic.

Our results also confirmed the empirical estimations made by **Analytis** (1973) and **Park & Lim** (1985) to conclude that calculations with $K_{max} = 1$ affected the value of r in the case of an actual asymptote of disease intensity below 100%. Hence, $K = 100\%$ as disease intensity should not be indiscriminately used in equations to compute rates. In fact, **Madden, et al.** (2007) raised the possibility of including K_{max} as an additional parameter in the characterization of the dynamics of the disease given the difficulty of the objective description of epidemics with only two parameters (y_0 ; initial disease or constant

of integration and r : rate of disease development). Currently, R packages such as *epifitter* (Alves & Del Ponte, 2021) have a function that fits modifications of the two-parameter models to account for this additional parameter as the maximum asymptote.

On the other hand, if the epidemic had been characterized with the type of model that best fitted the data when $K_{max} = 1$, the LW epidemic would have been classified as having a monocyclic behavior given that the best settings were obtained with the monomolecular model. However, when we adjusted the K_{max} to the actual $K_{max} < 1$, the LW epidemic changed from a monocyclic to a polycyclic behavior because the best-adjusted models were those of the Gompertz type. These types of results have epidemiological implications in result analyses, as well as technical implications in the strategic management of the disease because a significant part of the comprehensive management strategy of the disease is based on the type of behavior of the epidemic. It is important to note that given that WL is currently considered an official control disease in Colombia (Resolution 004170; ICA, 2014), all the plots we selected were continuously subjected to phytosanitary measures for foci management and containment. This kind of anthropogenic event explains to a certain extent why this epidemic had such low final incidences in a given time period. Additionally, we should keep in mind that time (t) is a continuous parameter and, therefore, a 36-month-period cannot be considered the total length of an epidemic in a crop such as oil palm with an eventual economic life span of up to 25 years. This could be different in a semi-annual crop that can be harvested in less than 12 months. Therefore, it is possible that a longer time (more than 36 months) of evaluation may result in additional increases in disease incidence given the availability of healthy tissue, which could reach 100 % if no management practices are performed.

Conclusions

One of the main purposes of epidemiological analyses using models is to achieve a better understanding of how diseases develop in plant populations over time and how other factors influence their development. When selecting an appropriate model, one must have the ability to understand and explain the factors associated with the estimation of the parameters that describe the epidemic. However, the models often lack the necessary flexibility to adapt to the various changes occurring during the development of a disease. In this sense, the goodness of fit of a model depends on the increase in the number of estimated parameters and, consequently, on the flexibility of the selected model.

Although the true asymptote for the development of any disease is a function of the amount of susceptible tissue available, we should be aware of the risk of assuming a theoretical value of the maximum disease incidence in the host in a generalized and arbitrary manner. There are many epidemics with a maximum incidence below 100% due to unfavorable environments, insufficient populations of insect vectors or propagules, levels of host resistance, disease reduction practices focused on the early elimination of diseased plants, or other unspecified physical or biological factors.

Our results demonstrate the importance of including K_{max} in the description of the temporal behavior of an epidemic. The consequences of using incorrect values reflect not only in the erroneous estimation of parameters, such as y_0 and r but also in the risk of incorrectly interpreting the temporal behavior of the epidemic because of a false fit of the selected model. Assuming the parameter K_{max} as unique and absolute may lead to inaccuracies in the type of epidemiological analysis and, consequently, to a biased description of reality.

Acknowledgments

The authors are grateful to engineers Marta Lya Hernández Escudero and Miguel Rubiano Infante of the *Luker Agrícola* and *Palmar del Oriente* plantations for their support. We are also grateful to Juan Pablo Tovar Molano and María Claudia Acosta of Fedepalma's Phytosanitary Management Program (Eastern Zone) for preparing the historical information records and to Eloína Mesa Fuquen and Greicy Andrea Sarria for their contributions to the editorial management of the manuscript.

Supplementary information

Table S1: Linear regression analysis of the three growth models assessed at different asymptotes or maximum disease incidence (K_{max}) of the records, corresponding to plot 1. See the table S1 in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1571/3188>

Table S2: Linear regression analysis of the three growth models assessed at different asymptotes or maximum disease incidence (K_{max}) of the records, corresponding to plot 2. See the table S1 in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1571/3188>

Table S3: Linear regression analysis of the three growth models assessed at different asymptotes or maximum disease incidence (K_{max}) of the records, corresponding to plot 3. See the table S1 in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1571/3188>

Author contributions

JML conceived the idea, conducted data analysis, and wrote the first draft of the manuscript; JCZ supervised the project and revised/conceptualized the versions of the manuscript. All authors provided feedback and approved the final manuscript.

Conflicts of interest

On behalf of all authors, the corresponding author declares there is no conflict of interest.

Funding

This study was funded by the Oil Palm Promotion Fund (FFP) administered by FEDEPALMA.

References

- Analytis, S.** (1973). Zur methodik der analyse von epidemien dargestellt am apfelschorf (*Venturia inaequalis* (Cooke) Aderh.). Acta Phytomed. **1**: 1-75.
- Analytis, S.** (1979). Die transformation von befallswerten in der quantitativen phytopathologie. Phytopathol. Z. **96**: 156-171.
- Alves, K.S. & Del Ponte, E.M.** (2021). Analysis and simulation of plant disease progress curves in R: introducing the epifitter package. Phytopathol. Res. **3**: 22. 13 p.
- Arneson, P.A.** (2001). Plant disease epidemiology: temporal aspects. The Plant Health Instructor. Accessed on: November 19, 2021. Retrieved from: <https://www.apsnet.org/edcenter/disimpactmngmnt/topc/EpidemiologyTemporal/Pages/default.aspx>
- Bowen K. L.** (2015). Models of disease progress, pp. 9-15. In: Stevenson KL, Jeger MJ, editors. Exercises in Plant Disease Epidemiology, 2nd ed. The American Phytopathological Society (APS Press). St Paul.
- Burnham, K. P. & Anderson, D.** (2002). Model selection and multimodal interference. 2nd ed. Springer-Verlag, New York. 23 pp.
- Campbell, C. L.** (1998). Disease progress in time: modelling and data analysis, pp. 181-206. In: D. Gareth Jones (ed.), The epidemiology of plant disease. Kluwer Publishers, Dordrecht.
- Campbell, C. L. & Madden, L.V.** (1990). Introduction to plant disease epidemiology. Wiley, New York. 532 pp.
- Forrest, F. W.** (2007). The role of plant disease epidemiology in developing successful integrated disease management programs, pp. 45-79. In: A. Ciancio and K. G. Mukerji (eds.), General Concepts in Integrated Pest and Disease Management. vol. 1, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Gigot, C.** (2018). Epiphy: analysis of plant disease epidemics. Accessed on: November 19, 2021. Retrieved from: <https://CRAN.R-project.org/package=epiphy>
- Gilligan, C. A.** (1990). Comparison of disease progress curves. New Phytol. **115** (2): 223-242.
- Hosmer, D. W. & Lemeshow, S.** (2000). Applied logistic regression, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. 392 pp.
- ICA.** (2014). Resolución ICA 004170: Por medio de la cual se declaran las plagas de control oficial en el cultivo de palma de aceite en el territorio nacional y se establecen las medidas fitosanitarias para su manejo y control. Accessed on: November 19, 2021. Retrieved from: <https://www.ica.gov.co/getattachment/0e5ecaac-ccb6-444f-96bb-3d488048b51f/2014R4170.aspx>

- Jeger, M. J.** (1982). Using growth curve relative rates to model disease progress of apple powdery mildew. *Prot. Ecol.* **4**: 49-58.
- Kiyosawa, S.** (1972). Mathematical studies on the curve of disease increase. *Ann. Phytopathol. Soc. Jpn.* **38**: 30-40.
- Kushalappa, A. C. & Ludwig, A.** (1982). Calculation of apparent infection rate in plant disease: Development of a method to correct for host growth. *Phytopathology.* **72**: 1373-1377.
- Kranz, J.** (2003). Comparison of temporal aspects of epidemics: the disease progress curves, pp 93-133. In: *Comparative Epidemiology of Plant Diseases*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- López-Vásquez, J. M., Mesa-Fuquen, E., Acosta, M. C. Tovar, J. P.** (2021). Descripción del comportamiento de la enfermedad marchitez letal de la palma de aceite a partir del análisis epidemiológico temporal. *Revista Palmas.* **42** (2): 69-80.
- Madden, L. V.** (1986). Statistical analysis and comparison of disease progress curves, pp. 55-84. In: K. Leonard and W. E. Fry, (eds.), *Plant Disease Epidemiology*. Macmillan Publishing Co., New York.
- Madden, L. V., Hughes, G., van den Bosch, F.** (2007). *The study of plant disease epidemics*. APS Press, St. Paul, MN. 421 pp.
- Mazerolle, M. J.** (2019). *AICcmodavg*: model selection and multimodel inference based on (Q) AIC(c). R package version 2.2-2. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- McCullagh, P. & Nelder, J. A.** (1992). *Generalized linear model*. Chapman & Hall. London. 526 pp.
- Neher, D. & Campbell, C. L.** (1992). Underestimation of disease progress rates with the Logistic, Monomolecular, and Gompertz models when maximum disease intensity is less than 100 percent. *Phytopathology.* **82** (8): 811-814.
- Neher, D. A., Reynolds, K. L. Campbell, C.L.** (1997). Analysis of disease progress curves using linear models. Chapter 7. In: L. J. Francl and D. A. Neher (eds.), *Exercises in Plant Disease Epidemiology*. APS Press. St. Paul, Minnesota. 242 pp.
- Nutter, F. W., Eggenberger, S. K., Littlejohn, K. J.** (2017). Visualizing, describing, and modeling disease progress curves using Epimodel, pp 21-30. In: Stevenson KL, Jeger MJ, editors. *Exercises in Plant Disease Epidemiology*, 2nd ed. The American Phytopathological Society (APS Press). St Paul. 276 pp.
- Park, E. W. & Lim, S. M.** (1985). Empirical estimation of the asymptotes of disease progress curves and the use of the Richards generalized rate parameters for describing disease progress. *Phytopathology.* **75**: 786-791.
- Pinheiro, J. C., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D.** (2004). *nlme*: linear and nonlinear mixed effects models. R package version **3**: 1-52. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- R Core Team.** (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rocha, P. J., Tovar, J. P., Gutiérrez, D. F., Mosquera, M.** (2007). Marchitez letal en palma de aceite. *Boletín Técnico N°22. Bogotá, Colombia.*
- Seem, R. C.** (1988). Measurement and analysis of the effects of crop development on epidemics, pp. 51-68. In: J. Kranz and J. Rotem, (eds.), *Experimental Techniques in Plant Disease Epidemiology*. Springer-Verlag, Berlin. 317 pp.
- Turner, M. G., Blumenstein, B. A., Sebaugh, J. L.** (1969). A generalization of the logistic law of growth. *Biometrics.* **25**: 557-580.
- Van Maanen, A. & Xu X.** (2003). Modelling plant disease epidemics. *Europ. J. Plant. Pathol.* **109** (7): 669-682.
- Van der Plank, J. E.** (1963). *Plant disease: epidemics and control*. Academic Press, New York, USA. 349 pp.
- Xu, X.** (2006). Modelling and interpreting disease progress in time, pp. 215-238. In: Cooke, B. M., Gareth Jones, D., and Kaye, B. (eds.) *The Epidemiology of Plant Disease*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 576 pp.

Artículo original

Caracterización de drosofilidos en zona urbana de Popayán (Cauca) Colombia

Characterization of drosophilides in the urban area of the city of Popayán (Cauca), Colombia

✉ Lorena Urbano^{1*}, ✉ Yamid Arley Mera-Velasco², ✉ Jovanna Vanessa Ramos-Angulo³

¹ Grupo de Investigación en Genética Humana Aplicada (GIGHA), Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

² Grupo de Estudios Ambientales (GEA), Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

³ Grupo de Investigación en Toxicología Genética y Citogenética, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Resumen

Los miembros del género *Drosophila*, comúnmente conocidos como moscas de la fruta, han sido ampliamente analizados como un modelo biológico de gran impacto para los estudios ambientales y genéticos dado su pequeño tamaño, su breve ciclo de vida, su fácil y asequible mantenimiento, así como su rápida reproducción y numerosa descendencia. Sin embargo, aún no se ha hecho una caracterización completa de estos individuos en zonas tropicales antropizadas, lo que puede tener un gran impacto en el desarrollo biológico de la mosca. En dicho contexto, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar la presencia de los drosofilidos en la ciudad de Popayán para generar conocimiento que pueda servir de línea base en la realización de otras investigaciones. Se recolectaron 1.033 drosofilidos del género *Drosophila* distribuidos en tres subgéneros: *Drosophila*, *Dorsilopha* y *Sophophora*, y tres grupos de especies: *D. repleta*, *D. busckii* y *D. melanogaster*, en cuatro comunas con características bióticas muy similares, una temperatura máxima de 23 °C y una humedad máxima de 85 %. Los hallazgos constituyen la primera evidencia de la coexistencia de tres drosofilidos en la zona urbana de Popayán.

Palabras clave: Zona urbana; *Drosophila*; Ambiental.

Abstract

Individuals from the *Drosophilae* genus, commonly known as “small fruit flies”, have been widely studied as biological models of great impact in environmental and genetic studies given their characteristic small size, short life cycle, easy maintenance, fast reproduction, and numerous offspring. However, they have not been completely characterized in tropical and inhabited zones which could impact the flies’ biological development. In such context, our study focused on characterizing the presence of *Drosophilae* individuals in the city of Popayán and gathering information that can help as a body of scientific knowledge for other upcoming investigation projects. We collected 1,033 members of the *Drosophilae* genus distributed in three subgenera: *Drosophila*, *Dorsilopha*, and *Sophophora*, and three species, *D. replete*, *D. busckii*, and *D. melanogaster* in four communes with very similar biotic characteristics, a maximum temperature of 23°C and a maximum humidity of 85%. These findings are the first evidence of the coexistence of three *Drosophilae* species in the urban zone of Popayán.

Keywords: Urban zone; *Drosophila*; Environmental.

Introducción

La familia *Drosophilidae* abarca cerca de 3.952 especies distribuidas aproximadamente en 73 géneros y dos subfamilias: *Steganinae* y *Drosophilinae*, esta última caracterizada por ser la más diversa, con 4.400 especies (Valadão, *et al.*, 2019); de estas, 694 especies de

Citación: Urbano L, Mera-Velasco YA, Ramos-Angulo HV. Caracterización de drosofilidos en zona urbana de Popayán (Cauca) Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):131-136, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1588>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Lorena Urbano;
alurbano@unicauca.edu.co

Recibido: 27 de octubre de 2021

Aceptado: 25 de enero de 2022

Publicado en línea: 21 de febrero de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

64 géneros se conocen en el Neotrópico (De Carvalho, *et al.*, 2012), y 176 especies de 17 géneros se han reportado en Colombia (Tidon & De Almeida, 2016), constituyendo un grupo de importancia para la diversidad y el desarrollo de estudios genéticos, comportamentales, fisiológicos, entre otros (Matthews, *et al.*, 2005; Rubin & Lewis, 2000; Salceda, 2011).

Entre las características más relevantes de los drosofilidos se encuentra su capacidad para adaptar su genoma a cambios de temperatura y humedad, lo que les permite colonizar nuevos ecosistemas alterados por el hombre (Vela & Rafael, 2004) que, en términos biológicos, favorecen a algunas especies al ofrecerles recursos necesarios para su supervivencia. Asimismo, las moscas contribuyen al equilibrio ecológico del planeta por su papel como polinizadoras y su actividad en las cadenas alimentarias saprofiticas, pues sus larvas exploran eficientemente el alimento, contribuyendo así al ciclo de nutrientes, lo que, según Throckmorton (1975), explica la amplia distribución del género *Drosophila*.

En este sentido, las relaciones ecológicas con insectos como *Drosophila repleta* en ambientes antropizados podría explicar su rol como vectores mecánicos indirectos, ya que, al estar expuestos o en contacto con microorganismos patógenos que afectan al hombre y los animales, pueden causar problemas. Así lo evidenciaron Hottel, *et al.* (2015) en instalaciones porcinas y avícolas, hábitats por los que estos insectos muestran preferencia.

Ecológicamente, la presencia de algunos drosofilidos está asociada a la presión antrópica sobre el ambiente, dada su versatilidad y la posibilidad de adaptarse a ambientes húmedos o secos y a bosques preservados o antropizados (Bizzo, 2005). A pesar del amplio conocimiento que se tiene de estos insectos, la información sobre ellos continúa siendo escasa y fragmentada (Argemí, *et al.*, 2003; Wheeler, 1986), tanto que Wheeler (1986) y Chaves & Tidon (2008) destacan la probabilidad de que aún existan especies por describir en las regiones tropicales. Martins (2001) propone que algunas de estas moscas pueden actuar como bioindicadores de alteraciones ambientales, dado que pequeñas modificaciones en el ambiente pueden afectar el tamaño de sus poblaciones (Tidon-Sklorz & Sene, 1992).

Teniendo en cuenta que no existen registros de estos especímenes en las zonas urbanas de Popayán, en este estudio se propuso ampliar el conocimiento de los drosofilidos en regiones antropizadas, con el fin de reconocer las características del ambiente urbano que permiten una frecuente convivencia doméstica de las moscas con el ser humano, y así establecer una línea de base para posteriores estudios.

Materiales y métodos

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en cuatro comunas del área urbana de la ciudad de Popayán (Figura 1), con una altura promedio de 1.760 m s.n.m., una temperatura promedio de 18 a 19 °C, y temperaturas máximas de 25 °C en julio, agosto y septiembre (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2021). Los ejemplares se recolectaron durante los meses de marzo a abril del 2021 cuando la temperatura promedio fue de 19,7 °C y la humedad de 81 %.

Fase de recolección

Se hicieron tres recolecciones de material entomológico en zonas urbanas de Popayán durante los meses de marzo a abril utilizando tres trampas por punto de muestreo a 5 m de distancia unas de otras y a un metro de altura, para un total de 48 trampas. Las trampas se distribuyeron aleatoriamente en diferentes puntos cercanos a los mercados principales de las cuatro comunas (Figura 1).

Las trampas consistían en un frasco de vidrio de 200 mL, de boca ancha, con trozos de banano como cebo. Los individuos vivos fueron capturados y traspasados posteriormente a un frasco con medio de cultivo nutritivo estándar (Ashburner, 1989). Los organismos fueron retirados con un pincel y guardados en tubos de vidrio de 20 mL que contenían etanol al 75 % para su preservación y posterior montaje.

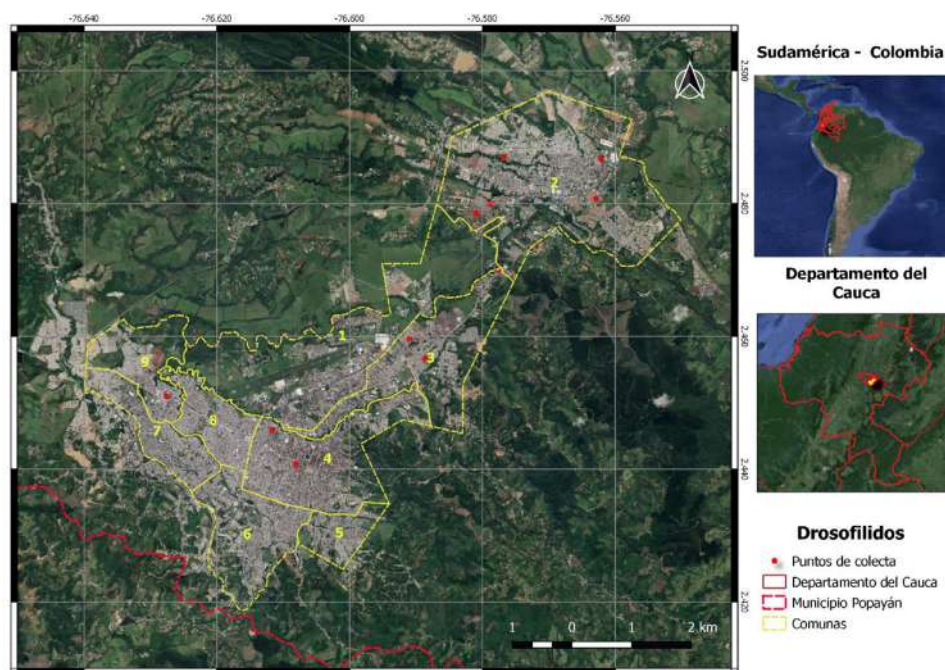


Figura 1. Puntos de recolección en las comunas de la ciudad de Popayán, Departamento del Cauca. Adaptado de **Google Earth** (s.f)

Fase de laboratorio

La manipulación de los ejemplares biológicos se hizo en uno de los laboratorios adscritos al Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación de la Universidad de Cauca. Se establecieron aislóneas poniendo hembras vírgenes en frascos de 200 mL con medio de cultivo nutritivo sólido estándar compuesto de 1 L de agua, 64 g de harina de maíz, 250 mL de melaza, 25,6 g de levadura, 9,8 g de agar y 10 mL de ácido propiónico. Los frascos se mantuvieron a una temperatura de 23 °C y 76 % de humedad en condiciones de esterilidad (autoclave Promed) y en cámara de flujo laminar (Kalstein), (Ashburner, 1989). Posteriormente, se colocaron hembras vírgenes para obtener la descendencia F1 y determinar las hembras y los machos de cada especie; estas aislóneas se mantuvieron durante dos generaciones y las unidades experimentales durante todo el ciclo biológico a temperatura ambiente.

Una vez las moscas emergieron, se procedió a dormir a los individuos utilizando acetato de etilo (C₄H₈O₂) (Sigma Aldrich, Cas No. 141-78-6) como anestésico, para establecer el sexo y hacer la caracterización morfológica de las moscas obtenidas. Los individuos se fotografiaron (morfología externa y alas) utilizando un estereomicroscopio (Eakins; STL1 SZM0745T) con cámara fotográfica incorporada (38 MP FDH V6), y se clasificaron según su fenotipo. Los cuerpos de los drosofilidos fueron montados en triángulos y depositados en la colección del Museo de Historia Natural de la Universidad del Cauca.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el programa SPSS versión 26.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE.UU.). Las variables discretas se expresaron como frecuencias y proporciones.

Resultados

Se recolectaron 1.033 drosofilidos del género *Drosophila* distribuidos en los subgéneros *Drosilopha*, *Sophophora* y *Dorsilopha* y las especies *D. repleta* Wollaston, 1858, *D. melanogaster* Meigen, 1830 y *D. busckii* Coquillett, 1901, con 475, 556 y 2 individuos,

respectivamente (**Figura 2**). Las características bióticas de los ejemplares recolectados fueron muy similares entre sí en condiciones de temperatura mínima de 20 °C y máxima de 23 °C, así como humedades mínimas de 76 % y máximas de 85 %.

En los sitios de muestreo se recolectaron tanto machos como hembras, siendo mayor la presencia de *D. melanogaster* (**Figura 2b**), con una representación del 65,7 % comparada con *D. repleta* (**Figura 2a**), la cual registró un mayor número de machos, con 51,8 %. En cuanto a la presencia de *D. busckii* (**Figura 2c**), únicamente se encontraron dos ejemplares hembras (**Tabla 1**), lo que se atribuyó a la extensión de las comunas muestreadas, que las hace blanco de especímenes que coexisten en ambientes ricos en zonas verdes y desechos orgánicos, lo cual es común, dada la diversidad de mercados y negocios de comida en este sector.

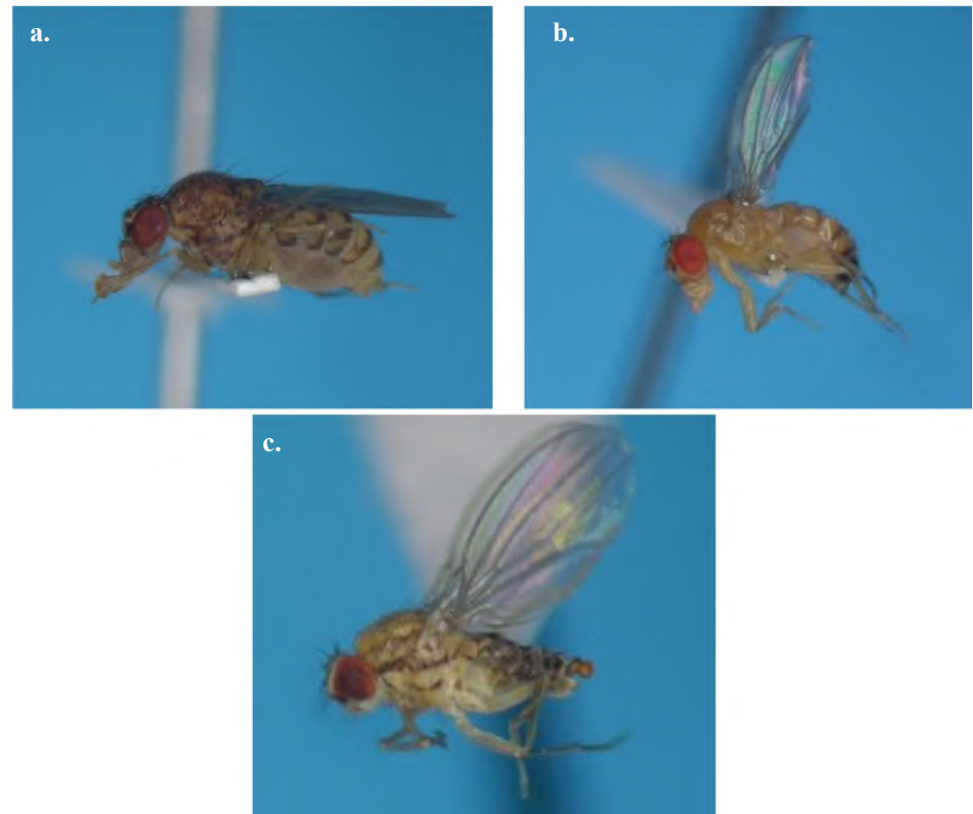


Figura 2. Ejemplares adultos de tres especies del género *Drosophila*: (a) *Drosophila repleta* Wollaston, 1858. (b) *Drosophila melanogaster* Meigen, 1830. (c) *Drosophila repleta* Wollaston, 1858, *Drosophila melanogaster* Meigen, 1830 y *Drosophila busckii* Coquillett, 1901

Tabla 1. Número de ejemplares recolectados de *Drosophila melanogaster*, *D. repleta* y *D. busckii*

Ejemplares	<i>Drosophila melanogaster</i> (%)	<i>Drosophila repleta</i> (%)	<i>Drosophila busckii</i> (%)	Total (%)
Machos	142 (34,3)	162 (51,8)	-	304(41,7)
Hembras	272 (65,7)	151 (48,2)	2 (100)	425 (58,3)
Total	414 (100)	313(100)	2 (100)	729 (100)

Discusión

Por lo general, los entornos urbanos se consideran antropizados y son bióticamente interesantes, pues en ellos es posible incorporar nuevas dimensiones en cuanto a la importancia de la biodiversidad, incluso en los sectores más edificados y poblados. Según **Blaustein** (2013), a medida que las áreas verdes urbanas se mejoran para optimizar la calidad de vida de las personas, y se abren posibilidades como la creación de huertos caseros, más atención reciben las especies que las visitan, las cuales probablemente se convierten en especies sinantrópicas que se benefician de los alimentos que les proporcionamos.

Según **Gottschalk, et al.** (2008), los drosófilidos utilizan diversos sitios de cría y alimentación para sus larvas con una dieta basada en frutas, vegetales y hongos en proceso de descomposición, características estas similares a las halladas en los ambientes urbanos muestreados en este estudio, los cuales les proporcionaron restos orgánicos y condiciones de temperatura y humedad óptimas. En tales condiciones, se evidenció que *D. busckii* era la especie menos abundante comparada con *D. repleta* y *D. melanogaster*, ambas más abundantes y ecológicamente dominantes.

La relación y la adaptación de estos organismos al ambiente urbano al parecer les permite una colonización exitosa, tal como se evidenció en la comuna dos (**Figura 2c**) cerca a los sitios de mercado conocidos como galerías y a las áreas domésticas, lo que explicaría la presencia de *D. busckii*, dada su especialización en hortalizas (**Valadão, et al.**, 2019). Por otra parte, *D. repleta* se encontró en todos los puntos de recolección cercanos a huertas y lugares de cría de animales domésticos, lo que concuerda con lo encontrado por **Hottel, et al.** (2015), quienes califican a *D. repleta* como una plaga molesta en instalaciones porcinas y avícolas debido a sus hábitos alimentarios y ecológicos.

La presencia de *D. melanogaster* en este estudio evidenció cómo este importante modelo biológico ha logrado adaptarse a las condiciones ambientales locales que le permiten la alimentación y la reproducción, lo que quedó ratificado con el buen número de individuos recolectados, la superposición de nichos y la consecuente convivencia sin evidencia de exclusión competitiva. Sin embargo, es importante estudiar estas características comportamentales más de cerca.

Por último, se observó que el comportamiento gregario puede facilitar la coexistencia de diversas especies de drosófilidos tal como se refleja en el aprovechamiento de recursos orgánicos en entornos antropizados por parte de sus larvas. En este estudio se comprobó por primera vez en el paisaje urbano de Popayán que *D. busckii* y *D. repleta* conviven en sitios semejantes a los de *D. melanogaster* y comparten de manera favorable su hábitat, lo que demuestra la abundancia y la riqueza de recursos que pueden favorecer a estas especies en zonas urbanas.

Se recomienda ampliar los sitios de muestreo en zonas comerciales y de bosque, con el fin de recolectar un mayor número de especímenes y ampliar la representatividad de drosófilidos tales como los ejemplares de la especie *D. popayan*, la cual no se registró en este estudio probablemente porque se caracteriza por habitar áreas más conservadas (**Vilela & Bächli**, 2004).

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Cauca y a su Departamento de Biología.

Contribución de los autores

LU: realizó el análisis estadístico y elaboración de medios de cultivo; YMV: realizó la identificación de los especímenes; JVRA: realizó el diseño experimental y elaboración de medios de cultivo. Todos los autores participaron en la colección de especímenes y tuvieron una contribución significativa de la idea original, toma de imágenes y posteriores revisiones del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Argemí, M., Mestres, F., Prevosti, A., Serra, L.** (2003). Microevolutionary dynamics of a community of Drosophilids. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*. **41** (1): 57-63. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0469.2003.00197.x>
- Ashburner, M.** (1989). *Drosophila. A laboratory handbook*. Cold Spring Harbor laboratory press. 1331pp.
- Bizzo, L. E. M.** (2005). Diversidade e distribuição temporal de uma assembléia de drosofilídeos (Insecta; Diptera) na restinga da praia da Joaquina, Florianópolis, Ilha de Santa Catarina. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Blaustein, R.** (2013). Urban biodiversity gains new converts. *BioScience*. **63** (2): 72-77. <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.2.3>
- Chaves, N. B. & Tidon, R.** (2008). Biogeographical aspects of drosophilids (Diptera, Drosophilidae) of the Brazilian savanna. *Revista Brasileira de Entomologia*. **52** (3): 340-348. <https://doi.org/10.1590/S0085-56262008000300005>
- Gottschalk, M. S., Hofmann, P. R. P., Valente, V. L. S.** (2008). Diptera, Drosophilidae: historical occurrence in Brazil. *Check List*. **4** (4): 485. <https://doi.org/10.15560/4.4.485>
- Google Earth.** (s.f). Direcciones de Google Earth del municipio de Popayán. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2021. Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Popay%C3%A1n,+Cauca/@2.4573831,-76.6699746,12z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e300311c028d47d:0x880bd67f0987a54e!8m2!3d2.4448143!4d-76.6147395>
- Hottel, B. A., Spencer, J. L., Ratcliffe, S. T.** (2015). Trapping *Drosophila repleta* (Diptera: Drosophilidae) using color and volatiles. *Florida Entomologist*. **98** (1): 272-275. <https://doi.org/10.1653/024.098.0144>
- IDEAM.** (2021). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Fecha de consulta: 15 de abril de 2021. Disponible en: www.ideam.gov.co
- Martins, M. B.** (2001). Drosophilid fruit-fly guilds in forest fragments. *Lessons from Amazonia: The Ecology and Conservation of a Fragmented Forest*. New Haven & London, Yale University Press, 478 p, 175-186.
- Matthews, K. A., Kaufman, T. C., Gelbart, W. M.** (2005). Research resources for *Drosophila*: The expanding universe. *Nature Reviews Genetics*. **6** (3): 179-193. <https://doi.org/10.1038/nrg1554>
- Rubin, G. M. & Lewis, E. B.** (2000). A brief history of *Drosophila's* contributions to genome research. *Science*. **287** (5461): 2216-2218.
- Salceda, V. M.** (2011). Variación espacial y temporal del género *Drosophila* (Diptera, Drosophilidae) en tres localidades de México. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*. **32** (1-2): 67-76.
- Throckmorton, L. H.** (1975). The phylogeny, ecology and geography of *Drosophila*. *Invertebrates of Genetic Interest*. **3**: 421-469.
- Tidon-Sklorz, R. & Sene, F. M.** (1992). Vertical and temporal distribution of *Drosophila* (Diptera, Drosophilidae) species in a wooded area in the state of São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Biologia*. **52** (2): 317-331.
- Tidon, R. & De Almeida, J. M.** (2016). Family drosophilidae. *Zootaxa*. **4122** (1): 719-751.
- Valadão, H., Proença, C. E. B., Kuhlmann, M. P., Harris, S. A., Tidon, R.** (2019). Fruit-breeding drosophilids (Diptera) in the Neotropics: playing the field and specialising in generalism? *Ecological Entomology*. **44** (6): 721-737. <https://doi.org/10.1111/een.12769>
- Vela, D. & Rafael, V.** (2004). Dos nuevas especies del grupo flavophilosa, género *Drosophila* (Diptera, Drosophilidae) en el Bosque Paschoa. Provincia de Pichincha. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*. **26** (1-2): 7-13.
- Vilela, C. & Bachli, G.** (2004). Revisions of the *Drosophila macroptera* and *D. rubrifrons* species groups, with description of a new Neotropical group (Diptera, Drosophilidae). *Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft*. **77**: 1-68.
- Wheeler, M. R.** (1986). Additions to the catalog of the world's Drosophilidae. *The Genetics and Biology of Drosophila*. **3**: 395-409.

Artículo original

Estructura y composición de la ictiofauna presente en el tramo bajo del río Córdoba, Sierra Nevada de Santa Marta, Caribe colombiano

Structure and composition of the ichthyofauna present in the lower section of the Córdoba River, Sierra Nevada de Santa Marta, in the Colombian Caribbean

✉ Carlos Blanco-Cervantes^{1,*}, ✉ German Blanco-Cervantes²

¹ Grupo de investigación en biodiversidad y ecología aplicada GIBEA, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

² Programa de Ingeniería Pesquera, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Resumen

En este estudio se analizaron la estructura y composición de la ictiofauna presente en el tramo bajo del río Córdoba de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) en el Caribe colombiano. Con el fin de conocer la composición y establecer posibles patrones en la estructura, la relación entre los peces y el tipo de sustrato y los parámetros fisicoquímicos durante las dos épocas climáticas, se emplearon números de Hill, modelos de distribución de especies, análisis de componentes principales (ACP), y análisis de correspondencia canónica (ACC). Se recolectaron ejemplares pertenecientes a 11 órdenes, 14 familias, 20 géneros y 27 especies dulceacuícolas, estuarinas y marinas. Los órdenes más abundantes fueron los de perciformes, gobiiformes y characiformes, y Cichlidae y Characidae, las familias más representativas. Se reportan las especies *Ctenolucius hujeta*, *Geophagus steindachneri*, *Hypostomus hondae*, *Sturisomatichthys panamense*, *Apteronotus rostratus* y *Kronoheros umbrifer*, que en Colombia se distribuyen en los ríos Magdalena y Cauca. En cuanto a la composición y riqueza de especies en los ríos de la SNSM, se informa un 28,42 % de especies descritas en un solo río, duplicando así los reportes anteriores.

Palabras clave: Distribución de abundancias; Diversidad; Ensamblaje de peces; Hábitat.

Abstract

We analyzed here the structure and composition of the ichthyofauna present in the lower reaches of the Córdoba River in the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Colombian Caribbean. To determine the composition and the possible structure patterns, we analyzed the relationship between the fish, the substrate, and the physicochemical parameters during the two climatic seasons using Hill numbers, species distribution models, principal component analysis (PCA), and canonical correspondence analysis (CCA). We collected samples of individuals from 11 orders, 14 families, 20 genera, and 27 freshwater, estuarine, and marine species. The most abundant orders were the Perciformes, Gobiiformes, and Characiformes while Cichlidae and Characidae were the most representative families. We report the presence of *Ctenolucius hujeta*, *Geophagus steindachneri*, *Hypostomus hondae*, *Sturisomatichthys panamense*, *Apteronotus rostratus*, and *Kronoheros umbrifer* that are distributed in Colombia in the Magdalena and Cauca Rivers. As for the composition and richness of species in the SNSM rivers, we report about 28 (42%) of the species described for an only river thus doubling previous reports.

Keywords: Abundance distribution; Diversity; Fish assembly; Habitat; Trophic relationship.

Citación: Blanco-Cervantes C, Blanco-Cervantes G. Estructura y composición de la ictiofauna presente en el tramo bajo del río Córdoba, Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Caribe colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):137-153, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1409>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Carlos Blanco Cervantes;
blance849@gmail.com

Recibido: 9 de marzo de 2021

Aceptado: 2 de febrero de 2022

Publicado: 23 de marzo de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Las características fisicoquímicas del agua en un río están dadas por variables ambientales específicas del sitio como la temperatura, la precipitación, la humedad, el viento, la nubosidad y la evaporación, así como por aspectos que determinan su geomorfología, como la solubilidad de las rocas, la cantidad de materiales en suspensión y el tipo de sustrato (**Welcomme**, 1992; **Allan & Castillo**, 2007). Las especies se distribuyen por zonas de acuerdo con el gradiente longitudinal del río, lo que permite la asociación de especies íntimamente relacionadas con la geomorfología o con discontinuidades de las condiciones abióticas y la estructura del hábitat (**Esselmen, et al.**, 2006). Estas zonas están determinadas por el patrón de comportamiento de variables como la velocidad de la corriente, los tipos de fondo, la cantidad de oxígeno disuelto, la temperatura del agua, la luz, la vegetación riparia y la del río (refugio), y, de forma sistémica, por la aparición de potenciales depredadores e interacciones con otras especies (**Granado-Lorencio**, 1995). Las comunidades de peces en un río funcionan como indicadores de su calidad y salud, tanto así que su declinación constituye un indicador negativo de la influencia humana en el ecosistema (**Mueller & Pyron**, 2010), la cual puede producir, por ejemplo, la disminución considerable del caudal debido a la creación de presas o las sequías producidas por la desviación del cauce para el riego de cultivos, así como procesos físicos y biológicos perturbadores como las tormentas e inundaciones. En este sentido, es necesario determinar la abundancia relativa y la distribución de estas comunidades y establecer su relación con factores bióticos y abióticos que inciden en el tamaño de sus poblaciones (**Oliveira & Pessanha**, 2014; **Montoya-Ospina, et al.**, 2018), pues se sabe que las relaciones de las variables y parámetros fisicoquímicos en los ríos, por ejemplo, las existentes entre el caudal y el flujo de agua y la temperatura y el pH, pueden influir en la distribución y abundancia de las especies (**Resh, et al.**, 1988; **Wootton**, 1990; **Montoya-Ospina, et al.**, 2018).

La información disponible acerca de la composición de la ictiofauna del río Córdoba de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) se recoge en el estudio de **López & Pulido** (2002); los autores reportaron diez especies pertenecientes a cinco órdenes, ocho familias y nueve géneros. Sin embargo, estos resultados son el producto de muestreos realizados a 500 m s.n.m. y no se tienen datos de la zona baja.

La fluctuación del régimen pluvial de la región Caribe colombiana tiene incidencias en la estructura y composición de la fauna íctica a nivel temporal y espacial. En época seca los niveles de los ríos de la SNSM descienden abruptamente, casi hasta secarse, por lo que se plantea la hipótesis de que existe variación espacial y temporal en la estructura y composición de río Córdoba. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo determinar la estructura y composición de la ictiofauna presente en el tramo bajo del río Córdoba de la SNSM, establecer los posibles patrones y relaciones de los parámetros fisicoquímicos y el tipo de sustrato a nivel espacial y temporal.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el río Córdoba (**Figura 1**) (10°59'N, 74°14'W y 11°5'N, 73°59'W) que corre por las vertientes noroccidental y suroriental de la SNSM, en la cuchilla de San Lorenzo, departamento del Magdalena, Colombia.

Fase de campo

Se seleccionaron cuatro estaciones en el tramo del río: la primera en la desembocadura (11°02'33,6" N - 74°14'32,2" W), la segunda en Papare (11°01'02,1" N- 74°13'02,7" W), la tercera en Cordobita (11°02'02,1" N - 74°13'10,0" W) y la cuarta, arriba (11°01'10,0" N- 74°11'53,7" W). Los muestreos se hicieron en época de lluvias (septiembre-noviembre de 2017) y de sequía (diciembre de 2017- abril de 2018), en remansos y rápidos. Para recolectar los peces se usaron dos atarrayas de diferente ojo de malla y una red de arrastre de 4 m con ojo de malla de 1 cm de diámetro. Después de las capturas se midieron *in*

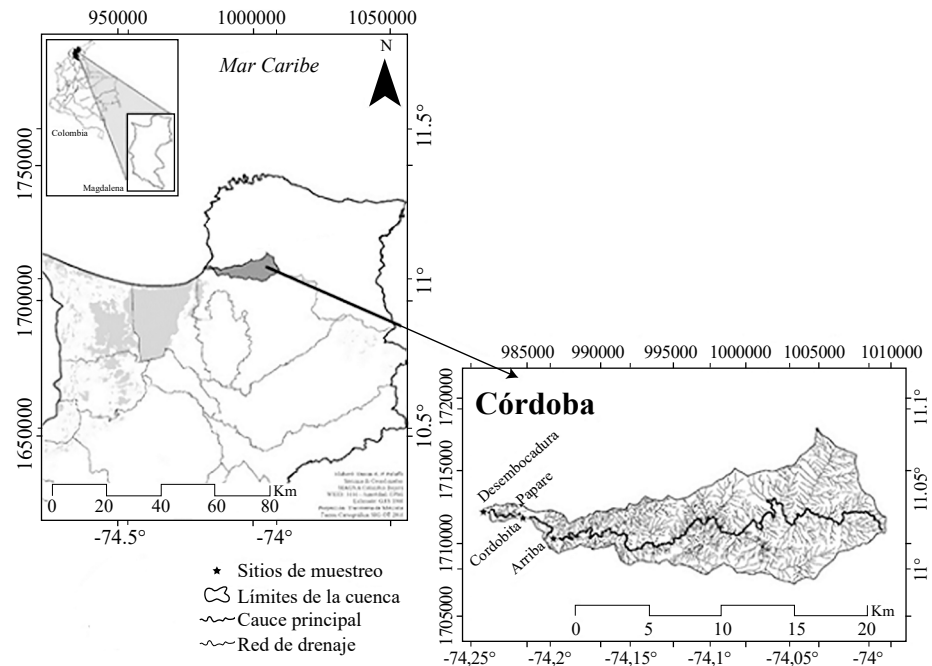


Figura 1. Área de estudio en el tramo bajo del río Córdoba

situ las variables fisicoquímicas de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura del agua con una celda multiparámetro WTW (Multi 3630 IDS SET F); asimismo se hizo una valoración cualitativa de la vegetación riparia a cada lado del río y se midió el caudal estimando la profundidad, el largo y el ancho de cada sector de muestreo del río con una varilla métrica (Rondan, 2017), en tanto que la velocidad de la corriente se calculó utilizando la técnica del flotador.

Fase de laboratorio

Los peces fueron identificados con las claves de Dahl (1971), Maldonado-Ocampo, *et al.*, (2005), Nelson (2016) y la actualización de Fricke, *et al.* (2021) y luego se trasladaron a la planta piloto pesquera de la Universidad del Magdalena ubicada en el corregimiento de Taganga (Santa Marta) para su conservación.

Representatividad del muestreo

Esta se evaluó estimando el número de especies esperadas mediante la curva de acumulación de especies empleando los estimadores Chao 1, ACE y Cole y el programa EstimateS 9.0 (Colwell, 2013).

Distribución de abundancias

Con base en la presencia y abundancia total de cada especie en los sitios de muestreo, se estimó la frecuencia de aparición y se verificó su ajuste a los modelos teóricos de abundancia de serie geométrica, log-normal y vara quebrada de MacArthur (Moreno, 2001; Magurran, 2004). Para determinar cuál de estos explicaba mejor la distribución de los datos, se utilizó la prueba de bondad de ajuste de ji al cuadrado.

Abundancia relativa

La abundancia relativa (AR%) se determinó a partir del número de individuos recolectados de cada especie y su relación con el número total de individuos de la muestra. Este parámetro se calculó para establecer la importancia y la proporción de las especies con respecto a la comunidad en las dos épocas evaluadas utilizando la siguiente fórmula: $AR = (n_i / N) \times 100$, donde AR corresponde a la abundancia relativa de la especie *i*; n_i al número

de individuos de la especie capturados u observados, y N al número total de individuos capturados u observados. La abundancia relativa se evaluó con base en las categorías establecidas por **Lasso, et al.** (1995) como especies escasas (E): <5; poco comunes (PC): 5-20; comunes (C): 21-40; abundantes (A): 41-60, y muy abundantes (MA): 61-100.

Estructura y composición de la ictiofauna en el tramo bajo del río

Para determinar la relación entre los peces y el sustrato se utilizó un análisis de componentes principales (ACP) considerando la presencia (uno) y ausencia (cero) de rocas, piedras, guijarros, grava, arena gruesa, arena fina, limo, materia orgánica en descomposición (hojarasca) y vegetación acuática en cada estación de muestreo. Asimismo, se hizo un análisis de correspondencia canónica (ACC) para determinar la correlación entre los parámetros fisicoquímicos y la composición de especies observadas, para lo cual se construyó otra matriz tomando los datos de abundancia de las especies en cada estación de muestreo. Para cumplir con los supuestos de homogeneidad de varianzas, los datos de abundancia para el ACC se ajustaron y transformaron a $\sqrt{x+1}$, y las variables del hábitat, a $\text{Log}(x+1)$ (**Zar**, 1999). Todos los análisis multivariados se hicieron con el programa estadístico Past-Program® 3.0 (**Hammer, et al.**, 2001).

Se calcularon los índices de composición del sustrato (S) y complejidad estructural de hábitat según **Winemiller, et al.** (2008), los cuales estandarizaron el índice (S) por medio de la siguiente fórmula: $S = \frac{\sum x_i}{N}$, donde S corresponde a los índices de composición del sustrato y complejidad estructural del hábitat; x_i representa cada uno de los componentes del sustrato y estructura del hábitat en cada estación muestreo, y N, el número de componentes combinados o estructura del hábitat observado en las estaciones de muestreo; los valores cercanos a 0 indican la mínima complejidad y a 1, la máxima (**Winemiller, et al.**, 2008).

Para medir la diversidad a nivel espacial se hallaron los números efectivos de especies o números de Hill con la ecuación denominada qD (**Jost**, 2006): ${}^qD = (\sum_{i=1}^j p_i^q)^{1/(1-q)}$, donde qD es la diversidad; p_i es la abundancia relativa de la especie i , es decir, la abundancia de la especie i dividida entre la suma total de abundancia de las especies que integran la comunidad, y el exponente q es el orden de la diversidad. El exponente q determina la sensibilidad del índice frente a la abundancia relativa de las especies y tiene tres componentes: la diversidad del orden cero ($q = 0$), el cual es sensible a las abundancias de las especies, y con el cual se obtiene el valor equivalente a la riqueza de las especies; la diversidad de orden 1 ($q = 1$), que incluye todas las especies con un peso exactamente proporcional a su abundancia en la comunidad y tiene en cuenta las especies comunes, y los valores de q mayores a 1 ($q = 2$), los cuales contemplan las especies dominantes (**Hill**, 1973). Para estos cálculos se utilizó el paquete estadístico PRIMER + 6 versión 1.0.1 (**Clarke & Warwick**, 2006).

Para determinar si existía una diferencia estadística significativa a nivel espacial y temporal de la diversidad en los sectores de muestreo y en las épocas evaluadas, así como entre las variables fisicoquímicas, se aplicó un ANOVA de Friedman después de una prueba de Tukey, dado que los datos no cumplieron los supuestos de normalidad; estos fueron evaluados con la prueba de Shapiro Wilk con el programa estadístico Past-Program® 3.0 (**Hammer, et al.**, 2001). Se consideró un nivel de significación del 5 %.

Resultados

Características del hábitat

El río es de aguas claras con flujo continuo en época de lluvias y, aunque en época seca los niveles descienden, la corriente se mantiene. Se presentan dos biotopos bien característicos: los remansos con velocidades medias de corriente (desembocadura y Papare), y los rabiones, que presentan zonas con rápidos de corriente y bajas profundidades caracterizadas por sustrato rocoso (Cordobita y arriba).

Se diferenciaron tres sectores: una zona baja, correspondiente a la desembocadura, donde el río drena sus aguas directamente al mar Caribe (municipio de Ciénaga); allí la vegetación riparia está conformada por pocos arbustos de higuera (*Ricinus communis*),

dividivi (*Caesalpinia coriria*), banano (*Musa paradisiaca*) y *Cecropia* sp, por lo que recibe totalmente la entrada de luz. El hábitat es de remansos, con sustrato formado por arena fina, limo o fango, vegetación acuática asociada a madre vieja conformada por enea (*Typha domingensis*), carrillo (*Phragmites australis*), tarulla (*Eichhornia crassipes*) y *Heliconia* sp, lo que brinda hábitats y recursos a la fauna íctica. El oxígeno disuelto presentó valores bajos comparados con las zonas media y alta (6 mg/l), mayores valores de conductividad (117,5 μ S/cm), pH básico (7,5) y temperatura alta (27,1 °C).

La zona media (Papare y Cordobita) presentó las siguientes características: vegetación riparia, conformada por higuera y árboles de guacamayo (*Albizia niopoides*), y abundante plantación de mango (*Mangifera indica*) y *M. paradisiaca*. El hábitat está conformado principalmente por remansos con presencia de rápidos sobre un sustrato constituido por cantos rodados, grava, piedras y materia orgánica en descomposición. En este sector hay una fuerte intervención antrópica, pues en varios sectores del río hay extracción de arena y se capta agua para el riego de cultivos de las fincas bananeras aledañas. El oxígeno disuelto registró valores similares a los de la zona baja (6,3 mg/l), menor valor de conductividad (105,53 μ S/cm), pH ácido (6,1) y menor temperatura (25,4°C) que la zona baja.

En la zona alta (arriba) la vegetación está conformada por caracolí (*Anacardium excelsum*), guamacho (*Pereskia guamacho*), higuera, orejero (*Enterolobium cyclocarpum*), *Cecropia* sp, y también hay sectores de suelo desnudo. Al borde del cauce se encuentran plantaciones tecnificadas de *M. paradisiaca*. El hábitat está conformado por remansos y rápidos, y el sustrato corresponde a cantos rodados, arena, grava, piedras, rocas y vegetación acuática en el cauce. Se registraron valores de oxígeno disuelto altos comparados con los sectores medio y bajo (7 mg/l), un pH básico (7), conductividad de 99 μ S/cm y temperaturas bajas (24,8 °C) en comparación con las zonas baja y media.

Parámetros fisicoquímicos según las temporadas climáticas

Las características físicas de las estaciones en época de lluvias evidenciaron un cauce más ancho (27 m), profundo (74 cm) y con mayor caudal (4,65 cm³.s) en la desembocadura, y menos ancho (12,42 m), profundo (36,75 cm) y caudaloso (3,2 cm³.s) arriba; por el contrario, la corriente fue más rápida arriba y en Cordobita (0,47 m/s), pero lenta en la desembocadura (0,73 m/s). En época seca la cuenca fue más ancha en Papare (22,84 m) y menor en la desembocadura (9,26 m), y más profunda en Cordobita (48,65 cm); el mayor caudal se registró en Papare (3,12 cm³.s) y el menor en Cordobita (2,14 cm³.s); la corriente fue más rápida en Cordobita (0,21 m/s) y lenta en Papare (0,37 m/s). El ANOVA de Friedman y la prueba de Tukey no mostraron diferencias significativas entre la profundidad (70,25 \pm 15,95 cm durante las lluvias y 42,37 \pm 6,51 cm durante la sequía), pero sí entre la velocidad de la corriente (0,53 \pm 0,13 m/s durante las lluvias y 0,26 \pm 0,05 m/s durante la sequía) ($p < 0,05$), el caudal (4,05 \pm 0,62 cm³/s durante las lluvias y 2,7 \pm 0,48 cm³/s durante la sequía) y el ancho (22,02 \pm 20,78 m durante las lluvias y 15,3 \pm 6,2 m durante la sequía).

En cuanto a las variables fisicoquímicas en época de lluvias, la desembocadura presentó los valores más altos de temperatura (26,7 °C) y conductividad (128,37 μ S/cm), y menos oxígeno disuelto (6,1 mg/l) y pH (6,38); la estación de arriba mostró los valores más bajos de temperatura (25,1 °C), conductividad (103,72 μ S/cm) y pH (6,5), y valores altos de oxígeno disuelto (6,8 mg/l). En la época seca los valores de temperatura (27,5 °C) y conductividad (106,7 μ S/cm) también fueron mayores en la desembocadura; el oxígeno disuelto fue mayor en la estación de arriba (6,8 mg/l) y menor en Papare (5,6 mg/l), con un pH básico en todas las estaciones. Los valores de las variables fisicoquímicas en el tramo bajo del río Córdoba durante la temporada de lluvias y la sequía no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en la temperatura (26,02 \pm 0,67°C durante las lluvias y 25,5 \pm 1,4°C durante la sequía), la conductividad (108,76 \pm 13,13 μ S/cm durante las lluvias y 103,72 \pm 14,82 μ S/cm durante la sequía) y el oxígeno disuelto (6,48 \pm 0,29 mg/l durante las lluvias y 6,2 \pm 0,5 mg/l durante la sequía), pero sí hubo diferencias en el pH (6,43 \pm 0,08 durante las lluvias y 7,7 \pm 0,71 durante la sequía).

Representatividad del muestreo

El número total de especies (S) en el río Córdoba en las épocas de lluvias y de sequía fue de 27, resultados concordantes con el 95 % del valor esperado según el estimador de riqueza Chao 1, y con el 95,7 % según los estimadores ACE y Cole; la curva de *singletons* mostró una tendencia a descender y la de *doubletons*, un comportamiento asintótico que evidenció la buena representatividad del muestreo (**Anexo 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1409/3197>).

Modelos de abundancia

En la desembocadura el río se ajustó al modelo log-normal (χ^2 : 1,50; p: 0,02), Cordobita (χ^2 : 24,1; p: 0,004), Papare (χ^2 : 1,69; p: 0,42) y arriba (χ^2 : 18,8; p: 0,004) se ajustaron al modelo de serie geométrico (**Anexo 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1409/3197>).

Composición de la ictiofauna presente en el tramo bajo del río

Se capturaron 948 individuos (692 en época de lluvias y 256 en sequía) distribuidos en 11 órdenes, 14 familias, 24 géneros y 27 especies (**Tabla 1**). Los órdenes Characiformes, Gobiiformes y Perciformes fueron los más representativos, en tanto que se recolectaron 14 especies (51,85 %) consideradas de agua dulce, 11 (42,30 %) estuarinas, y dos (7,9 %) marinas, las cuales eventualmente ingresan al río. Durante la época de lluvias se capturaron especímenes de seis órdenes, 10 familias y 21 especies, y en época seca, de ocho órdenes, 12 familias y 19 especies. Además, se capturaron más especies estuarinas en época de lluvias que en época seca. El ANOVA de Friedman y la prueba de Tukey no evidenciaron diferencias significativas entre el número de individuos (p=0,05) ni el de especies (p>0,05). Al comparar el número de especies en las dos temporadas, se encontraron diferencias significativas a nivel espacial. Las estaciones de Papare (225 especímenes en época de lluvias versus 43 en época seca) y Cordobita (256 especímenes en época de lluvias versus 34 en época seca) registraron diferencias significativas (p<0,05) en el número de individuos.

La abundancia relativa de las especies presentó algunas variaciones entre épocas. Las especies más frecuentes durante la época de lluvias (**Tabla 2**) fueron *Psalidodon fasciatus* (24,1), *Hemibrycon jabonero* (16,59), *Geophagus steindachneri* (11,69) y *Creagrutus affinis* (8,08), que en total acumularon el 76 %, en tanto que en época seca (**Tabla 3**), las más frecuentes fueron *Mugil curema* (22,1), *Sturisomathichthys panamense* (17,9), *C. affinis* (21,1) y *P. fasciatus* (12,9), con un 75 % del total de las capturas.

Estructura de la ictiofauna en el tramo bajo del río

El análisis de componentes principales (ACP) para la presencia de peces y el tipo de sustrato y vegetación acuática permitió diferenciar dos hábitats dentro del río: uno constituido por rápidos de corriente, sustrato rocoso, arena gruesa, hojarasca, bajos niveles de pH y alto oxígeno disuelto, y otro por remansos, sustrato de limo, arena fina, materia orgánica en descomposición y vegetación acuática y bajos niveles de oxígeno disuelto. Según este análisis, el 86,24 % de la varianza se debió a los dos primeros componentes (**Figura 2**): el componente uno (eje X) aportó el 59,72 % de la variabilidad, siendo la grava, los cantos rodados, las piedras, las rocas y la materia orgánica los de mayor importancia. A este tipo de sustrato se asociaron *S. panamense*, *Sicydium antillarum* y *Awaous banana*. El componente dos (eje Y) contribuyó con un 26,52 % de la variabilidad, siendo la arena fina, el limo y la vegetación acuática los de mayor importancia. Las especies *Hypostomus hondae*, *M. incilis*, *Oreochromis niloticus*, *Caranx* sp, *Roeboides dayi*, *P. fasciatus*, *Caquetaia kraussii*, *Kronoheros umbrifer* y *C. affinis* se asociaron a este sustrato.

Asimismo, en época de sequía el 73,11 % de la varianza del ACP se debió los dos primeros componentes (**Figura 3**); el componente 1 (eje X) proporcionó el 47,84 % de la variabilidad, siendo las grava, los cantos rodados, las piedras, y las rocas los de mayor importancia, en tanto que la vegetación acuática se relacionó negativamente;

Tabla 1. Composición y abundancia de la ictiofauna del tramo bajo de río Córdoba. (Ll) lluvias, (S) sequía, (Ab) abundancias

Orden	Familia	Especies	Hábitat	Ll	S
				Ab	Ab
Characiformes	Ctenoluciidae	<i>Ctenolucius hujeta</i> (Valenciennes, 1850)	Dulce	0	2
	Characidae	<i>Psalidodon fasciatus</i> (Cuvier, 1819)	Dulce	167	28
		<i>Hemibrycon jabonero</i> Schultz, 1944	Dulce	115	6
		<i>Creagrutus affinis</i> Steindachner, 1880	Dulce	56	48
		<i>Roeboides dayi</i> (Steindachner, 1878)	Dulce	12	0
Cichliformes	Cichlidae	<i>Andinoacara latifrons</i> (Steindachner, 1878)	Dulce	41	7
		<i>Geophagus steindachneri</i> (Eigenmann & Hildebrand, 1922)	Dulce	81	0
		<i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus, 1758)	Dulce	2	0
		<i>Caquetaia kraussii</i> (Steindachner, 1878)	Dulce	4	0
		<i>Kronoheros umbrifer</i> (Meek & Hildebrand, 1913)	Dulce	4	0
Gobiiformes	Gobiidae	<i>Sicydium antillarum</i> (Ogilvie-Grant, 1884)	Estuarina	21	11
	Eleotridae	<i>Awaous banana</i> (Valenciennes, 1837)	Estuarina	8	2
		<i>Eleotris amblyopsis</i> (Cope, 1871)	Estuarina	0	1
		<i>Eleotris pisonis</i> (Gmelin, 1789)	Estuarina	4	0
		<i>Dormitator maculatus</i> (Bloch, 1792)	Estuarina	5	2
Carangiformes	Carangidae	<i>Caranx sp</i>	Marina	8	4
	Centropomide	<i>Centropomus undecimalis</i> (Bloch, 1792)	Marina	4	1
Perciformes	Haemulidae	<i>Pomadasys croco</i> (Cuvier, 1830)	Estuarina	8	0
Mugiliformes	Mugilidae	<i>Mugil curema</i> Valenciennes, 1836	Estuarina	0	48
		<i>Mugil incilis</i> Hancock, 1830	Estuarina	13	31
		<i>Dajaus monticola</i> (Bancroft, 1834)	Estuarina	16	0
Siluriformes	Loricariidae	<i>Hypostomus hondae</i> (Regan, 1912)	Dulce	2	0
		<i>Sturisomatichthys panamense</i> (Eigenmann & Eigenmann, 1889)	Dulce	112	39
Cyprinodontiformes	Poeciliidae	<i>Poecilia caucana</i> (Steindachner, 1880)	Dulce	10	0
Pleuronectiformes	Achiridae	<i>Achirus lineatus</i> (Linnaeus, 1758)	Estuarina	0	1
Gymnotiformes	Apteronotidae	<i>Apteronotus rostratus</i> (Meek & Hildebrand, 1913)	Dulce	0	8
Syngnathiformes	Syngnathidae	<i>Microphis brachyurus</i> (Bleeker, 1854)	Estuarina	0	1

S. panamense, *S. antillarum* y *A. banana* se asociaron a este hábitat. El componente dos (eje Y) aportó un 25,27 % de la variabilidad y la arena fina y el limo fueron los componentes de mayor importancia. *P. fasciatus*, *H. jabonero*, *Ctenolucius hujeta*, *M. incilis*, *M. curema*, *Poecilia caucana*, *C. affinis*, *Caranx sp* y *Andinoacara latifrons* se capturaron en estos sustratos.

Relación entre la presencia de peces y los parámetros físicoquímicos

El análisis de correspondencia canónica (ACC) evidenció un gradiente asociado con las variables ambientales y las relacionadas con la forma del río. Se pudo apreciar el aumento de la profundidad y el ancho del río desde su parte alta hasta su desembocadura; la conductividad y la temperatura también presentaron este aumento. El oxígeno disuelto y el

Tabla 2. Abundancia total (AT), abundancia relativa (AR), y categoría de las especies capturadas en el tramo bajo de río Córdoba en época de lluvias. Categorías: escasa (E), poco común (PC), común (C)

Especies	AT	AR	C
<i>P. fasciatus</i>	167	24,10	C
<i>H. jabonero</i>	115	16,59	PC
<i>C. affinis</i>	56	8,08	PC
<i>R. dayi</i>	12	1,73	E
<i>A. latifrons</i>	41	5,92	E
<i>G. Steindachneri</i>	81	11,69	PC
<i>O. niloticus</i>	2	0,29	E
<i>K. umbrifer</i>	4	0,58	E
<i>C. kraussii</i>	4	0,58	E
<i>S. antillarum</i>	5	0,72	E
<i>A. banana</i>	21	3,03	E
<i>E. pisonis</i>	8	1,15	E
<i>D. maculatus</i>	6	0,87	E
<i>Caranx sp</i>	8	1,15	E
<i>C. undecimalis</i>	3	0,34	E
<i>P. croco</i>	8	1,15	E
<i>M. incilis</i>	13	1,88	E
<i>D. monticola</i>	16	2,31	E
<i>H. hondae</i>	2	0,29	E
<i>S. panamense</i>	112	16,16	PC
<i>P. caucana</i>	10	1,44	E

pH mostraron un patrón contrario al resto de las variables, ya que los sitios con mayor valor de oxígeno disuelto y menor pH se presentaron a medida que las estaciones de muestreo se alejaban de la desembocadura del río.

Según este análisis, en época de lluvias (**Figura 4**) el 78,46 % de la varianza acumulada en el *tripplot* de especies y parámetros fisicoquímicos se explicó por los dos primeros componentes. El componente 1 (eje X) aportó el 49,97 % de la variabilidad y el componente 2 (eje Y), el 28,49 %. Los valores de correlación indican que el caudal (eje X, 0,80%) y el ancho (0,58%) fueron las variables fisicoquímicas más importantes en la distribución de las especies; la composición de la ictiofauna se relacionó inversamente con el caudal y el ancho, y solamente *H. jabonero*, *G. steindachneri*, *R. dayi*, *Eliotris pisonis*, *C. affinis* y, en menor medida, *C. kraussi*, *A. banana*, *H. hondae* y *S. panamense* mostraron preferencia por estas variables. El ancho (eje Y, 0,71 %) registró el valor más alto en el componente 2. *P. fasciatus*, *S. panamense*, *O. niloticus*, *C. kraussi* y *Centropomus undecimalis* mostraron preferencia por esta variable.

En época seca (**Figura 5**) el 95,51 % de la varianza acumulada en el *tripplot* de especies y parámetros fisicoquímicos correspondió a los dos primeros componentes. El componente 1 (eje X) aportó el 58,03 % de la variabilidad y el componente 2 (eje Y), el 37,47 %. Los valores de correlación indican que el caudal (eje X 0,83%), y la velocidad (0,79%) fueron los parámetros fisicoquímicos más importantes en la distribución de las especies. La composición de la ictiofauna se relacionó inversamente con el caudal y la velocidad, *A. rostratus*, *C. affinis*, *H. jabonero* y, en menor medida, *S. panamense* y *P. fasciatus* se relacionaron positivamente con estas variables. El ancho (0,75 %) registró el valor más alto en el componente 2. *S. panamense*, *Achirus lineatus* y *Microphis brachyurus* mostraron preferencia por este parámetro.

Tabla 3. Abundancia total (AT), abundancia relativa (AR) y categoría de las especies capturadas en el tramo bajo de río Córdoba en época seca. Categorías: escasa (E), poco común (PC), común (C)

Especies	AT	AR	C
<i>C. hujeta</i>	2	0,90	E
<i>P. fasciatus</i>	28	12,9	PC
<i>H. jabonero</i>	6	2,70	E
<i>C. affinis</i>	46	21,1	C
<i>A. latifrons</i>	7	3,20	E
<i>C. kraussi</i>	1	0,40	E
<i>S. antillarum</i>	11	5,00	E
<i>A. banana</i>	2	0,92	E
<i>E. amblyopsis</i>	1	0,46	E
<i>D. maculatus</i>	2	0,90	E
<i>Caranx sp</i>	4	1,80	E
<i>C. undecimalis</i>	1	0,40	E
<i>M. curema</i>	48	22,10	C
<i>S. panamense</i>	39	17,90	PC
<i>P. caucana</i>	9	4,10	E
<i>A. lineatus</i>	1	0,40	E
<i>A. rostratus</i>	8	3,60	E
<i>M. brachyurus</i>	1	0,60	E

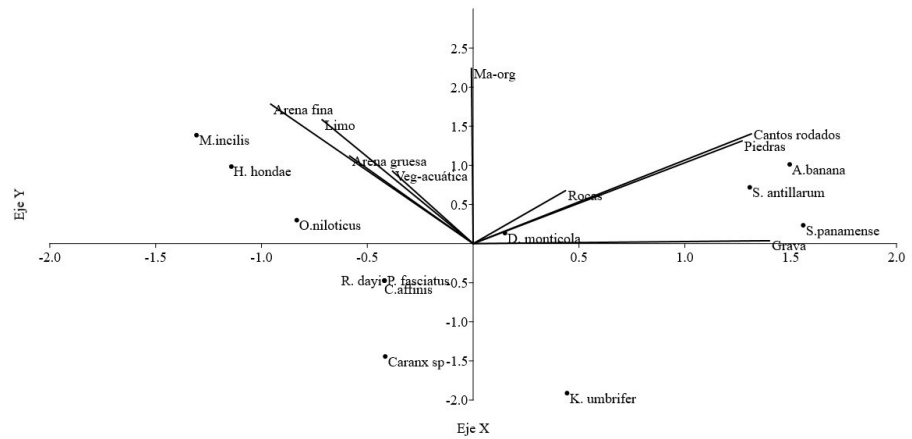


Figura 2. Análisis de componentes principales (ACP) entre los peces y el tipo de sustrato en época de lluvias. Componente 1 (eje X), componente 2 (eje Y).

La extrapolación del número de especies (⁰D) a nivel espacial evidenció que en la época de lluvias las estaciones de Cordobita (19 especies), Papare (17 especies) y la desembocadura (11 especies) presentaron mayor riqueza, en tanto que el sector de arriba (10 especies) presentó la menor riqueza de especies. En cuanto al número de especies típicas o comunes (¹D), la desembocadura (8 especies) y Cordobita (7 especies) obtuvieron los mayores valores, y los más bajos se observaron en el sector de arriba (5 especies). Con respecto al número de especies dominantes (²D), las estaciones de arriba (2 especies) y Cordobita (2 especies) registraron los valores más altos, y la desembocadura (1 especie) y Papare (1 especie), los más bajos.

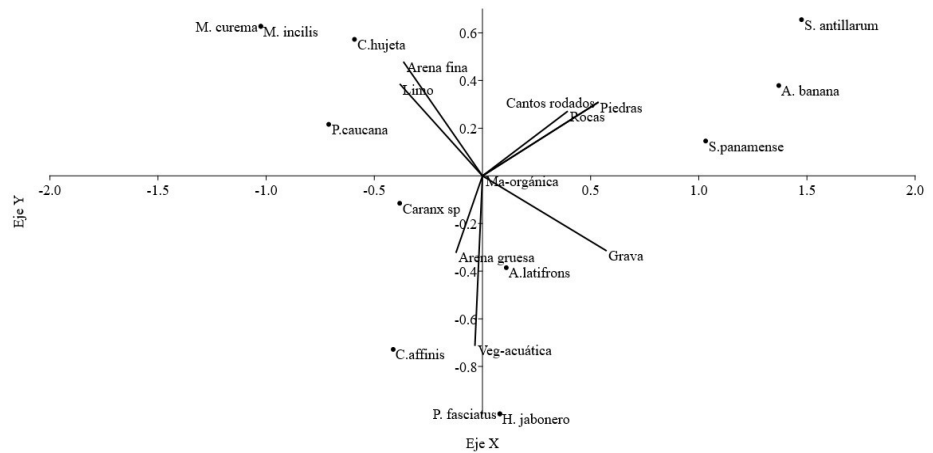


Figura 3. Análisis de componentes principales (ACP) entre los peces y el tipo de sustrato en época seca. Componente 1 (eje X), componente 2 (eje Y).

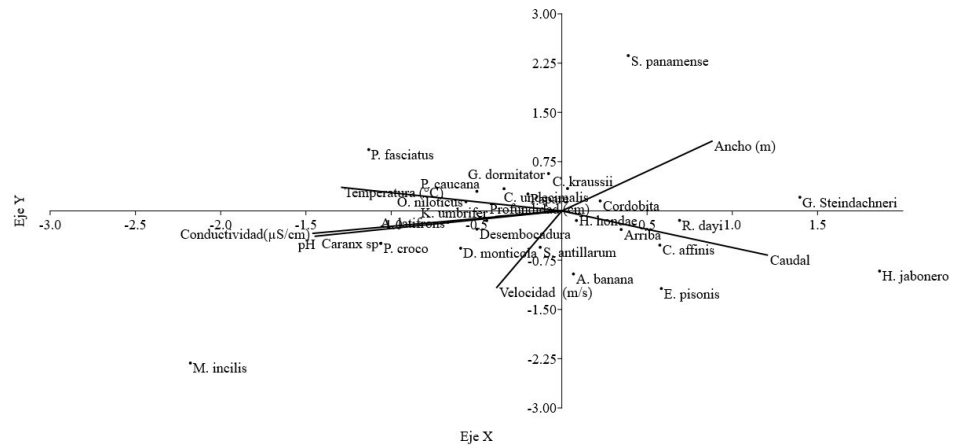


Figura 4. Análisis de correspondencia canónica (ACC) entre variables fisicoquímicas y la presencia de peces en época de lluvias. Componente 1 eje X, componente 2 eje Y

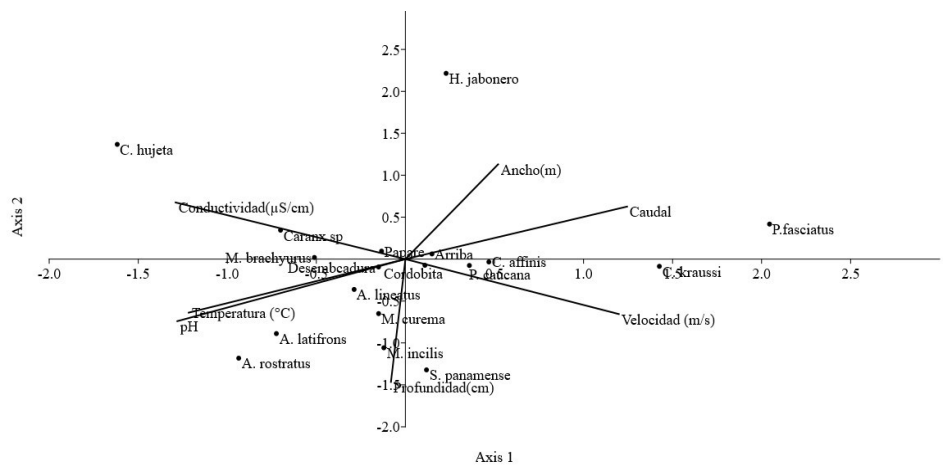


Figura 5. Análisis de correspondencia canónica (ACC) entre las variables fisicoquímicas y la presencia de peces en época seca. Componente 1 eje X, componente 2 eje Y

En la época de sequía, la desembocadura (15 especies) y Papare (6 especies) registraron la mayor riqueza de especies, en tanto que Cordobita y el sector de arriba (5 especies cada una) tuvieron la menor. A partir del número de especies típicas o comunes (¹D), se evidenció que la desembocadura y Cordobita (5 especies) registraron los mayores valores, y los más bajos se observaron en el sector de arriba (4 especies). En cuanto al número de especies dominantes (²D), Papare (2 especies) y el sector de arriba (2 especies) obtuvieron los valores más altos y los más bajos se observaron en la desembocadura (1 especie) y Cordobita (1 especie). El ANOVA de Friedman y la prueba de Tukey no evidenciaron diferencias significativas en el número efectivo de especies en los ordenes 0 (q=1), 1 (q=1) y 2 (q=2) a nivel espacial (p>0,5) o temporal (p>0,05).

Discusión

Los ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) presentan características físicas e hidrológicas afines a los sistemas costeros del Chocó biogeográfico, Centroamérica y las Antillas. En estas cuencas hidrográficas los ríos desembocan al mar siendo aún esteros de primero a cuarto orden, con distancias cortas desde sus cabeceras hasta la desembocadura (decenas de kilómetros), así como caudales reducidos (Blanco, *et al.*, 2013). En los ríos de la SNSM se hallan más de 95 especies agrupadas en 13 órdenes y 33 familias (Prosierra, 1998) y, aunque los resultados del presente trabajo equivalen solo al 28,42 % del total, se reportan más especies que las descritas por Guardiola & Torrealbo (2011) en el río Piedras, y las reportadas por López-Delgado (2002).

Las familias Cichliidae y Characidae presentaron el mayor número de organismos en los muestreos realizados, lo que posiblemente se deba a que son las más representativas de la región (Maldonado-Ocampo, *et al.*, 2008), e indica una adaptabilidad y especialización frente a los hábitats que ofrecen los ríos. Con relación al número de organismos, la especie más abundante en el río Córdoba fue *P. fasciatus*, capturada tanto en época de lluvias (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1409/3197>) como en época seca (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1409/3197>), lo que podría atribuirse a su reproducción continua a lo largo del año, con lo que mantiene elevado el número de individuos de la población (Castro-Roa, 2006). Además de ser la especie más abundante, se catalogó como la más común. *P. fasciatus* se capturó en todos los sectores de muestreo evaluados, con una leve tendencia a preferir los remansos.

La captura principalmente de especies como *M. curema* y *M. incilis* en época seca estaría relacionada con los patrones de migración de estas especies. Según Mármol-Rada, *et al.* (2010), en época de lluvias estas migran hacia el mar para desovar (octubre-noviembre) y regresan en época seca (enero-marzo), coincidiendo con la época de mayor captura de especies en este trabajo.

La ictiofauna de la SNSM hace parte de la vertiente del Magdalena, conformada por las cuencas de los ríos Cauca, Magdalena, San Jorge, Sinú, y las de la costa Caribe y el altiplano de Bogotá, y en ella se halla el 50 % de las especies que se encuentran en esta vertiente, compartiendo un total de 74 especies con dicho sistema fluvial (Mojica, 1999). Lo anterior explicaría las capturas de *C. hujeta*, *C. affinis*, *R. dayi*, *G. steindachneri*, *C. kraussii*, *K. umbrifer*, *H. hondae*, *S. panamense* y *A. rostratus*, que en Colombia se distribuyen en los ríos Magdalena y Cauca. Es de particular interés destacar la captura de *H. hondae* y *K. umbrifer*, especies que se encuentran en el Libro Rojo de Peces dulceacuícolas colombianos como casi amenazados (Mojica, *et al.*, 2012).

Otro resultado notable es una mayor captura de especies dulceacuícolas que estuarinas y marinas. Este río pertenece a la macrocuenca del Caribe, en la que el mar y la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) funcionan como barreras de asilamiento para la especiación de la fauna íctica y evitan la colonización de especies dulceacuícolas primarias en estos ríos, por lo que los peces de las cuencas del flanco norte de la SNSM presentan características marinas hacia la vertiente norte (Caribe) que les permiten soportar cambios en la salinidad (Galvis, *et al.*, 1997).

La fuerte intervención antrópica observada en los sectores de Papare y Cordobita, en los que se desvía la corriente para el riego de las plantaciones de banano de las fincas aledañas al río y se extrae arena para su comercio en el municipio de Ciénaga, incidiría en la distribución de las especies. En general, el modelo de distribución de abundancias que mejor explicó la distribución de los organismos fue el de serie geométrica, en el que solo unas pocas especies fueron abundantes y las restantes prácticamente raras, lo cual es característico de comunidades con pocas especies (riqueza específica baja) y algún grado de intervención (Hill & Hamer, 1998). McGill *et al.* (2007) arguyen que los modelos de distribución de abundancia incorporan información sobre la riqueza, la distribución y, en algunas ocasiones, el número de especies no observadas en una comunidad. Además, son una herramienta para describir la estructura de una comunidad y pueden ser indicadores de perturbaciones (Hill & Hamer, 1998).

Influencia del hábitat sobre la comunidad íctica de río Córdoba

En el presente estudio se encontraron algunas asociaciones particulares de los peces con los remansos, entre ellos, *G. steindachneri*, *C. kraussi*, *A. latifrons*, *O. niloticus*, *C. affinis*, *H. jabonero*, *M. incilis*, *M. curema*, *C. hujeta*, *A. lineatus*, *M. brachyurus*, *D. maculatus*, *K. umbrifer*, *R. dayi* y *P. caucana*, especies probablemente relacionadas con la presencia de arena fina, lodo o fango, materia orgánica en descomposición (hojarasca), vegetación riparia, bajos niveles de oxígeno disuelto y alto pH. Los rasgos ecomorfológicos de estas especies probablemente estén incidiendo en su preferencia por los hábitats lentos, entre los que se pueden destacar la forma de la natación y la alimentación (Casatti & Castro, 2006; Oliveira, *et al.*, 2010).

Sturisomatichthys panamense, *S. antillarum* y *A. banana* se capturaron en hábitats de rápidos de corriente, lo que probablemente se debe a que se alimentan de detritos y perifiton, alimentos comunes en ecosistemas lóticos. Los rasgos morfológicos de estos organismos incluyen pedúnculos caudales bien fuertes y aletas pectorales con espinas muy pequeñas que les permiten adherirse a las rocas. Estas modificaciones les facilitan afrontar la dificultad causada por las fuertes corrientes (Casatti & Castro, 2006; Oliveira, *et al.*, 2010). Los miembros de la familia Loricariidae poseen bocas inferiores con modificaciones en la cavidad oral a manera de ventosa y cuerpos comprimidos dorso-ventralmente con pedúnculos caudales desarrollados, características típicas de especies bentónicas que habitan cuerpos de agua con velocidades de corriente (Oliveira, *et al.*, 2010; López-Delgado, 2013).

Los parámetros fisicoquímicos específicos del río fueron el ancho, la velocidad de la corriente, el caudal y el pH. En este sentido, Angermeier & Kar (1993) argumentan que las características estructurales del río, como el ancho, la velocidad de la corriente, la profundidad, la depredación y la competencia, así como los parámetros fisicoquímicos, son esenciales al analizar los resultados sobre la composición de especies por estación, ya que constituirían evidencia de por qué se recolectaron dichas especies en esos sectores y en esa época climática (Maldonado-Ocampo, *et al.*, 2005). El ancho del río se relaciona directamente con el caudal, así que a mayor caudal, mayor es el ancho del río (Grenouillet, *et al.*, 2004), hecho que se corroboró en las estaciones de Papare y Cordobita, pues presentaron el mayor ancho y, por ende, el mayor caudal. Además, la riqueza local, la composición y el ensamblaje de peces tienden a incrementarse de forma directa con el ancho y volumen en los cuerpos de agua (Toepfer, *et al.*, 1998).

Los valores de temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad obtenidos se hallaron dentro de los valores aceptables para mantener a las especies vivas. La temperatura desempeña un rol esencial en todos los procesos biológicos, ya que al aumentar, acelera los procesos fisiológicos y químicos (Pankhurst & Munda, 2011) e incide en la tasa de crecimiento y el rendimiento reproductivo (Harrod, 2016). Valores de temperaturas superiores a 33 °C tienen efectos anómalos en los peces (Corcuera-Zabarburu, 2015) y valores por debajo de 8 °C corresponden a temperaturas de letargo (Hernández-Rodríguez & Bückle-Ramírez, 2010). Los valores de pH en este estudio oscilaron

entre 6 y 8, lo que se considera óptimo en aguas naturales. La mayoría de las especies ícticas habitan aguas que generalmente tiene un pH entre 6 y 9 (**Chapman & Kimtsach, 1992**). **Serafy & Harrel (1993)** mencionan que valores mayores de 9 lesionan tejidos superficiales y producen una excesiva secreción de mucus. Los valores de oxígeno disuelto también estuvieron dentro de las condiciones aceptables (**Carrillo-López, 2013**); 4 mg/l se considera como la concentración mínima letal, valor muy por debajo de los obtenidos en este estudio.

Otro factor que podría estar incidiendo en la distribución de las especies es la mayor duración de la estación seca en el Caribe colombiano como producto del cambio climático, el cual traerá consigo importantes consecuencias para los ecosistemas acuáticos. Entre sus efectos inmediatos están los cambios de temperatura y regímenes de flujo del caudal, cambios en la vegetación ribereña, alteración de la química del agua, y en las interacciones entre especies (**Poff, 1992**). El principal reto para la macrofauna lótica en los bosques secos ha sido la sequía, por lo que se han seleccionado diferentes estrategias que les han permitido adaptarse a estos ambientes (**Lytle & Poff, 2004**). Los bosques secos se caracterizan por presentar una pronunciada estacionalidad en la distribución de la precipitación, lo que genera una temporada seca de hasta seis meses (**Sánchez-Azofeifa, et al., 2005; Pennington, et al., 2006**). La precipitación influye directamente en el flujo de agua superficial, por lo que el régimen hidrológico de los arroyos del bosque seco del Caribe colombiano presenta también una marcada estacionalidad, con ausencia o intermitencia del flujo en la temporada seca (**Lake, 2003**). Es probable que estas sequías estacionales generen variaciones hidrológicas que se reflejarían en la comunidad de peces debido a la discontinuidad en el flujo del agua, el ancho del río y la conectividad entre la cabecera y los sectores medio y bajo (**Herbert & Gelwick, 2003**). Sin embargo, los resultados de nuestro estudio no sustentan dicha teoría, ya que no se observaron diferencias en la composición y estructura de la comunidad íctica en las dos épocas evaluadas. Se sugiere un efecto en el tamaño del muestreo, debido a que la relación entre la estructura de las comunidades y el régimen hidrológico no siempre puede verificarse a escalas temporales ecológicas y espaciales locales (**Herbert & Gelwick, 2003**). Ese efecto en el tamaño del muestreo se reflejó en la temporada seca, ya que fuimos expulsados del río por los trabajadores de fincas bananeras aledañas a su margen, lo que no permitió terminar los muestreos en la época seca con la consecuente incidencia en el objetivo principal del estudio; por ello, no se cumplió a nivel temporal la hipótesis planteada en el estudio.

Los números efectivos de Hill permiten una mejor interpretación de la diversidad de las comunidades a nivel espacial y temporal; en época de lluvias los mayores valores en diversidad y riqueza se registraron en Papare y Cordobita, y en la época seca, en la desembocadura, reflejando la mayor complejidad del hábitat, en tanto que los menor valores se registraron en la estación de arriba. Según **Oliveira, et al. (2010)**, el gradiente de diversidad y abundancia que se registra en un río a lo largo del curso constituye una segregación efectiva de diversas comunidades de peces en la que inciden factores físicos como la velocidad, la temperatura, el caudal, las pendientes y las barreras geográficas, por lo que la ictiofauna de estos sistemas fluviales tiende a presentar cambios en sus patrones espaciales de distribución y en el uso del hábitat debido a variaciones temporales asociadas a la precipitación, la reproducción y la búsqueda de alimento. Además, **Toepfer, et al. (1998)** argumentan que los cambios en la estructura de las comunidades de peces de un río se producen siguiendo un gradiente longitudinal desde su nacimiento hasta su desembocadura, observándose un aumento de la riqueza de las especies a medida que se desciende en el río, lo que tal vez se relaciona con una mayor oferta alimenticia (arena, hojarasca, lodo y vegetación riparia) y sugiere más refugios para las especies que facilitan la colonización de un mayor número de ellas (**Cala, 2002**), o la presencia de depredadores, o especializaciones tróficas interespecíficas e intraespecíficas, (**Machado-Allison, et al., 1993**).

Conclusión

La composición de la ictiofauna en el tramo bajo del río no presentó cambios a nivel temporal, pero sí a nivel espacial durante las dos épocas evaluadas, cambios posiblemente ocasionados por fluctuaciones del régimen pluviométrico de la región Caribe colombiana que provocan variaciones en las características físicas del cauce, es decir, en el ancho, el caudal y la velocidad de la corriente; estos cambios incidieron en la dispersión de las especies, situación que se evidenció en la abundancia debido a las características disímiles de las estaciones entre sí y a nivel temporal. En los sectores cercanos a la desembocadura se observó la mayor abundancia y diversidad de especies, con una mayor heterogeneidad del hábitat, incluida la complejidad del sustrato, y zonas de mayor ancho, lo que brinda recursos a la fauna íctica. Los resultados de este estudio concuerdan con la hipótesis de un río continuo y un pulso de inundación que implica el aumento de especies en las zonas bajas. Por último, se recomienda la continuidad de las investigaciones en este cuerpo de agua encaminadas a su protección y conservación, ya que esta es una cuenca fuertemente intervenida que alberga especies amenazadas como *Hypostomus hondae* y *Kronoheros umbrifer*.

Agradecimientos

Los autores manifiestan su agradecimiento a la Vicerrectoría de investigación de la Universidad del Magdalena, por el apoyo y la financiación del presente estudio (resolución 16891 del 22 de agosto de 2016), y a Sabrina Hernández y a Susana Contreras Rangel por el resumen en inglés.

Información suplementaria

Anexo 1S. Curva de acumulación de especies mediante los estimadores Chao 1, ACE y Cole. Ver anexo 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1409/3197>

Anexo 2S. Modelos de distribución de abundancias en los sectores de muestreo. Ver anexo 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1409/3197>

Tabla 1S. Distribución espacial de las especies en los sitios de muestreo en época de lluvias. Presencia ■, Ausencia □. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1409/3197>

Tabla 2S. Distribución espacial de las especies en los sitios de muestreo en época seca. Presencia ■, Ausencia □. Ver tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1409/3197>

Contribución de los autores

CBC: conceptualización, análisis formal, investigación, escritura, y preparación del borrador original; GBC: conceptualización, metodología, investigación, recursos, supervisión, adquisición de fondos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Referencias

- Allan, J. & Castillo, M. (2007). Stream Ecology. Structure and function of running waters. Michigan. EE.UU.436 pp. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2019. Disponible en: https://www.academia.edu/8760051/Stream_Ecology_Structure_and_Function_of_Running_Waters
- Angermeier, P. L. & Karr, J. R. (1993). Fish communities along environmental gradients in a System of Tropical streams. Environmental Biology of Fishes. 9 (2): 117-135.
- Blanco, J.F., Escobar-Sierra, C., Carvajal-Quintero, J.D. (2013). Gorgona, Baudó y Darién (Chocó Biogeográfico, Colombia): ecorregiones modelo para los estudios ecológicos de comunidades de quebradas costeras. Revista de biología tropical. 62 (1): 43-64. <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/1597810.15517/rbt.v62i0.15978>

- Cala, P.** (2002). Ictiofauna epicontinental de Colombia en el contexto global neotropical y su estado actual: Asociación Colombiana de Ictiología, una revisión bibliográfica. *Dahlia*. **4**: 3-14.
- Chapman, D. & V. Kimtsach.** (1992). Selection of water quality variables. En: D. Chapman (Ed.). *Water quality assessments*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, World Health Organization, United Nations Environment Programme, E & FN Soon, Londres. pp. 59-126.
- Carrillo-López, D., S. Carvajal-Aguilar, J. M. Coto-Campos, V. Salgado-Silva, J. Herrera-Núñez, Rojas-Cantillano, D., Benavidez, C.** (2010). Variación del oxígeno disuelto en el río Burío-Quebrada Seca, Heredia, Costa Rica, en el periodo 2005 – 2010. Universidad Nacional: Heredia. Fecha de consulta: 12 de octubre de 2021. Disponible en: http://www.una.ac.cr/observatorio_ambiental/index.php?option=com_booklibrary&task=view&id=19&catid=43&Itemid=37
- Casatti, L. & Castro R. M.** (2006). Testing the ecomorphological hypothesis in a headwater riffles fish assemblage of the río São Francisco, southeastern Brazil. *Neotropical Ichthyology*. **4** (2): 203-214. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252006000200006>
- Castro-Roa, D.** (2006). Composición y estructura de la comunidad de Characiformes en la cuenca del río Prado (Tolima-Colombia). Universidad Del Tolima. Ibagué.
- Clarke, K. R. & R. M. Warwick.** (2006). *Change in marine communities: an approach to statistical interpretation*. PRIMER-E Ltd, Plymouth, Devon. 172 pp. Fecha de consulta: 20 de junio de 2018. Disponible en: <file:///C:/Users/Dell/Downloads/PRIMER-E.pdf>
- Colwell, RK.** (2013). *Estimates: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. User's guide and application*. Fecha de consulta: 20 de junio de 2018. Disponible en: <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates/>
- Corcuera-Zababurú, C.A.** (2015). Evaluación de la temperatura letal máxima para *Hypostomus hemlecochllodon* y *Pterogoplichthys pardalis* en el centro de investigaciones Carlos Miguel Castañeda Ruiz IIAP-San Martín, Perú. Tesis de pregrado, Universidad Nacional TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA De Amazonas Perú. Fecha de consulta: 12 de octubre de 2021. Disponible en: <http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/661/EVALUACION%20DE%20LA%20TEMPERATURA%20LETAL%20M%C3%81XIMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dahl G.** (1971). *Los peces del norte de Colombia*. Ministerio de Agricultura, Instituto de Desarrollo de los Recursos Naturales Renovables (INDERENA). Talleres Litografía Arco. Bogotá D.C., Colombia. 391 pp.
- Esselmen, P.C., Freeman, M.C., Pringle, M.C.** (2006). Fish assemblage variation between geologically defined regions and across a longitudinal gradient in the Monkey River Basin, Belize. *Journal environmental society*. **25** (1): 142-156. [https://doi.org/10.1899/0887-3593\(2006\)25\[142:FVBGDR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1899/0887-3593(2006)25[142:FVBGDR]2.0.CO;2)
- Fricke, R., Eschmeyer, W.N., Van der Laan, R.** (eds) (2021). *Catálogo de peces de eschmeyer: genera, especies, referencias*. Fecha de consulta: 2 de junio de 2020. Disponible en: <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>
- Galvis, G., Mojica, I., Camargo, M.** (1997). *Los peces del Catatumbo*. De'vinni Editorial Ltda. Santa fe de Bogotá, Colombia. 118pp.
- Granado-Lorencio, C.** 1995. *Ecología de peces*. Sevilla: Universidad de Sevilla. 282pp. Fecha de consulta: 15 de febrero de 2019. Disponible en: <https://www.agapea.com/libros/ECOLOGIA-DE-PECES--9788447202423-i.htm>
- Guardiola, F. & Torrealbo, M.** (2011). *Inventario íctico del río piedras de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia*. Tesis de pregrado, Universidad del Magdalena. Facultad de Ciencias Básicas. Programa de Biología, Santa Marta D.T.C.H.
- Harrod, C.** (2016). *Climate change and freshwater fisheries*. Freshwater Fisheries Ecology, First Edition. Edited by John F. Craig. John Wiley and Sons, Ltd. Published. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2019. Disponible en: <https://www.nj.gov/dep/climatechange/pdf/Harrod2015ClimatechangeandFWfisherieschapterinCraigFreshwaterFisheriesEcology.pdf>
- Hammer, O., Harper, D.A., Rydan, P.D.** (2001). Paleontological Statistic software package for education and data analysis. *Palaeontological Electronic*. **4** (1): 1-9. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2019. Disponible en: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Herbert, M.E. & Gelwick, F. P.** (2003). Spatial variation of headwater fish assemblages explained by hydrologic variability and upstream effects of impoundement. *Copeia*. **2003** (2), 273-284. [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2003\)003\[0273:SVOHFA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2003)003[0273:SVOHFA]2.0.CO;2)

- Hill, M.O.** (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*. **52** (2): 427-432. Doi: <https://doi.org/10.2307/1934352>
- Hill, K. & Hammer, K.** (1998). Using species abundance models as indicator of habitat disturbance in tropical forests. *Journal of Applied Ecology*. **35**: 458-460. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.1998.00310.x>
- Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos*. **113** (2): 363- 375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
- Lake, P.S.** (2003). Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater Biology*. **48** (7): 1161-1172. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01086.x>
- Lasso, C., Señaris, C., Lasso-Alcalá, O., Castro-Viejo, J.** (1995). Aspectos ecológicos de una comunidad de bagres (Pisces: Siluriformes) en los llanos inundables de Venezuela. *Acta Biológica Venezolana*. **16** (1): 1-31. Fecha de consulta: 4 de mayo de 2019. Disponible en: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-259347>
- López, P. & Pulido, L.** (2002). Estudio de la ictiofauna de los ríos Córdoba y Frío, Sierra Nevada de Santa Marta. Departamento del Magdalena. Tesis de pregrado. Fundación Universidad de Bogotá. Jorge Tadeo Lozano. Fecha de consulta: 6 de agosto de 2018. Disponible en: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/1330/T629.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López-Delgado, E. O.** (2013). Composición y estructura de la comunidad de peces y sus relaciones con la calidad de la vegetación riparia y algunas variables ambientales en dos ríos de bosque seco tropical (bs-t), Tolima (Colombia). Tesis de maestría. Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.
- Lytle, D.H. & Poff, N.L.** (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology and Evolution*. **19** (2): 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.10.002>
- Machado-Allison, A.** (1993). Los peces de los llanos de Venezuela: un ensayo sobre su historia natural. Consejo de Desarrollo Científico Humanístico. Universidad Central de Venezuela. 2da ed. Caracas. 88pp. Fecha de consulta: 12 de octubre de 2019. Disponible en: <http://saber.ucv.ve/omp/index.php/editorialucv/catalog/view/26/18/79-1>
- Magurran, A. E.** (2004). *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Publishing, Oxford, 256 pp. Fecha de consulta: 5 de junio de 2018. Disponible en: https://www2.ib.unicamp.br/profs/thomas/NE002_2011/maio10/Magurran%202004%20c2-4.pdf
- Maldonado-Ocampo, J., Ortega-Lara, A., Usmá, O.S., Galvis, V.G., Villa-Navarro, F.A., Vásquez-Gamboa, L., Prada-Pedreiros, S., Ardila, R.C.** (2005). Peces de los Andes de Colombia. Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia. 346 pp. Fecha de consulta: 20 de abril de 2018. Disponible en: http://awsassets.panda.org/downloads/peces_de_los_andes_de_colombia.pdf
- Mármol-Rada, D., Vilorio, M.E., Blanco, R.J.** (2010). Efectos de la pesca sobre la biología reproductiva de la lisa Mugil incilis (PISCES: MUGILIDAE) en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigación Marítimo Costera, INVEMAR*. **39** (2): 215-231. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2019. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/mar/v39n2/v39n2a01.pdf>
- McGill, B.J., Etienne, R.S., Gray, J.S., Alonso, D., Anderson, M.J., Benecha, H.K., Dornelas, M.** (2007). Species abundance distributions: moving beyond single prediction theories to integration within an ecological framework. *Ecology letters*. **10** (10): 995-1015. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01094.x>
- Mojica, J.I.** (1999). Lista preliminar de las especies de peces dulceacuícolas de Colombia. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2019. **23**: 547-566
- Mojica, J.I., Usmá, J.S., Álvarez-León, R., Lasso, C.A. (Eds.)** (2012). Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales. Bogotá, D. C., Colombia, 319 pp. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2019. Disponible en: http://awsassets.panda.org/downloads/libro_rojo_peces_dulceacuicolas_de_colombia_dic_2012.pdf
- Montoya-Ospina, D.C., Villa-Navarro, F.A., López-Delgado, E.O.** (2018). Composición y estructura de peces de la microcuenca del río Anchique, Tolima, Colombia. *Revista Biología Tropical*. **66** (1): 336-351. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.27530>
- Moreno, C. E.** (2001). Métodos para medir la biodiversidad. M y T-Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza, 84 pp. Fecha de consulta: 5 de junio de 2018. Disponible en: <http://entomologia.rediris.es/sea/manytes/metodos.pdf>

- Nelson, J.S., Grande, T.C., Wilson, M.V.H.** (eds) (2016). *Fishes of the world*. 5^a edition. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. v – xli + 1–707. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2019. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781119174844>
- Oliveira, E.F., Goulart, E., Breda, V., Monte-Vera, V., Souza-Paiva, L.R., Rizzo-Vismera, M.** (2010). Ecomorphological patterns of the fish assemblage in a tropical floodplain: effects of trophics, spatial and phylogenetic structures. *Neotropical ichthyology*. **8** (3): 569-586. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252010000300002>
- Oliveira, R.E. & Passanha, A.L.** (2014). Fish assemblages along a morphodynamic continuum on three tropical beaches. *Neotropical Ichthyology*. **12** (1):165-175. Fecha de consulta: 31 de octubre de 2019. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/208561780>
- Pennington, T., Lewis, G., Ratter, J.** (2006). *Neotropical Savannas and Seasonally Dry Forests: Plant Diversity, Biogeography and Conservation*. CRC Press, FL, USA. Fecha de consulta: 25 de octubre de 2019. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/books/neotropical-savannas-seasonally-dry-forests-tobypennington-gwilym-lewis-james-ratter/e/10.1201/9781420004496>
- Prosierra.** (1998). Evaluación ecológica rápida de la Sierra Nevada de Santa Marta. Definición de áreas críticas para la conservación de la Sierra Nevada de Santa Marta. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2019. Disponible en: <http://www.prosierra.org/>
- Poff N.L.** (1992). Way disturbances can be predictable: a perspective on the definition of disturbance in stream. *Journal of the North American Benthological Society*. **11**: 86-92. Fecha de consulta: 23 de septiembre de 2017. Disponible en: https://pofflab.colostate.edu/wpcontent/uploads/2019/08/Poff_1992_Whydisturbancecanbepredictable.pdf
- Rondan, D.** (2017). (septiembre 23), caudal del río-método del flotador. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2019. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=v8v3wL4c2yE&ab_channel=AdrianRondan
- Sánchez-Azofeifa, G.A.** (2005). Research priorities for Neotropical dry forests. *Biotropica*. **37** (4): 477-485. <https://doi.org/10.1046/j.0950-091x.2001.00153.x-i1>
- Serafy, J.E & Harrell, R.M.** (1993) Behavioural response of fishes to increasing pH and dissolved oxygen: field and laboratory observations. *Freshwater Biology*. **30**: 53-61. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1993.tb00788.x>
- Tagliani P., Barbieri, E., Neto, A.C.** (1992) About a sporadic phenomenon of fish mortality by environmental hypoxia in the Senandes streamlet, State of Rio Grande do Sul, Brazil. *Ciencia e Cultura*. **44** (6): 404-406. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2019. Disponible en: <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-e-cultura/articulo/about-a-sporadic-phenomenon-of-fish-mortality-by-environmental-hypoxia-in-the-senandes-streamlet-state-of-rio-grande-do-sul-brazil>
- Toepfer, A.S., Williams, L.R., Martinez, A.D, Fisher W.L.** (1998). Fish and habitat heterogeneity in four streams in the central Oklahoma/ Texas plains ecoregion. *Academic Science*. **78**: 41-48. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2019. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.540.1612&rep=rep1&type=pdf>
- Welcomme, R.L.** (1992). *Cuencas fluviales*. FAO, informe técnico. Pesca, (202), 62 pp. <https://doi.org/10.1139/f05-040>
- Wootton, R.J.** (1990). *Ecology of Teleost Fishes*. Fish and Fisheries Series 1. Chapman & Hall, London, 404. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2019. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-0829-1>
- Zar, J.H.** (1999). *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall – 45h ed. New Jersey. 663 pp. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2019. Disponible en: <https://www.abebooks.com/9780131008465/Biostatistical-Analysis-5th-Edition-Zar-0131008463/plp>

Artículo original

Análisis del riesgo de invasión de malezas introducidas asociadas a cultivos de banano en el departamento del Magdalena, Colombia

Analysis of the risk of invasion of exotic weeds associated with banana crops in the department of Magdalena, Colombia

✉ Kristinne Echávez-P^{1,*}, ✉ Irma Quintero-Pertuz², ✉ Eduino Carbonó-Delaho³

¹ Maestría en Ecología y Biodiversidad, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

² Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

³ Herbario UTMC, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Resumen

Las plantas invasoras se consideran la segunda causa de pérdida de biodiversidad después de la destrucción del hábitat. Es necesario prevenir el establecimiento de nuevas poblaciones de estas plantas para evitar su impacto negativo en la productividad y biodiversidad de los ecosistemas en general. Para la detección temprana de malezas potencialmente riesgosas, propusimos identificar las especies introducidas asociadas a cultivos de banano del departamento del Magdalena y categorizar su riesgo de invasión. Para ello se revisaron inventarios de la flora asociada al cultivo y se confirmó su origen mediante consulta bibliográfica. Las especies confirmadas como introducidas (31) fueron sometidas a un análisis de riesgo de invasión con la herramienta I3N, la cual incluye 28 preguntas agrupadas en tres categorías: riesgo de invasión, impacto potencial y dificultad de control. La suma de los puntajes correspondientes a cada pregunta definió el indicador del riesgo asociado a cada especie evaluada, así: riesgo de invasión alto (valores entre 5,01 y 10,00); riesgo moderado (entre 3,01 y 4,50); riesgo bajo (entre 1,0 y 3,0), y requieren mayor análisis (entre 4,56 y 5,00). Se categorizaron 24 especies como de alto riesgo de invasión, tres de riesgo moderado y cuatro requerían mayor análisis, en tanto que ninguna especie se clasificó como de bajo riesgo. Se presentan aquí los primeros registros de 19 especies con alto riesgo de invasión en Colombia, información que puede ser útil para la prevención, manejo y control de estas malezas y para evitar su propagación e invasión en otros ecosistemas circundantes, aunque aún es necesario evaluar su distribución.

Palabras clave: Biodiversidad; Invasiones biológicas; Invasividad; Plantas exóticas.

Abstract

Invasive plants are considered the second cause of biodiversity loss after habitat destruction. It is necessary to prevent the establishment of new populations of these plants to avoid negative impacts on the productivity and biodiversity of ecosystems in general. For the early detection of potentially risky weeds, we proposed to identify the introduced species associated with banana crops in the department of Magdalena and categorize their invasion risk. To this end, we reviewed inventories of flora associated with this crop and we confirmed their origin through the available literature. The species confirmed as introduced (31) were subjected to risk analysis to determine their establishment and invasion capacity with the I3N tool, which is based on 28 questions grouped into three categories: risk of establishment, potential impact, and difficulty of control. The sum of the scores for each question defined the risk indicator associated with each species as follows: values between 5.01 and 10.0: high invasion risk; between 3.01 and 4.50: moderate risk; between 1.0 and 3.0: low risk, and between 4.56 and 5.0: further analysis required. We categorized 24 species as having high risk of invasion, three as moderate risk, and four as requiring further analysis whereas no species were categorized as low risk. We present here the first records of 19 species at high risk of invasion in Colombia. This information can be useful for the prevention, management, and control of these weeds and to avoid their spread and invasion into other surrounding ecosystems. However, it is necessary to evaluate their potential distribution.

Keywords: Biodiversity; Biological invasions; Invasiveness; Exotic plants.

Citación: Echávez-P K, Quintero-Pertuz I, Carbonó-Delaho E. Análisis del riesgo de invasión de malezas introducidas asociadas a cultivos de banano en el departamento del Magdalena, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):154-164, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1520>

Editor: Carolina Romero

***Correspondencia:**

Kristinne Echávez-P;
kristinne.echavez@gmail.com

Recibido: 21 de julio de 2021

Aceptado: 3 de febrero de 2022

Publicado en línea: 28 de febrero de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Las invasiones biológicas y la destrucción del hábitat son los factores de cambio ambiental con mayor impacto sobre la biodiversidad, la conservación de los ecosistemas y sus servicios ambientales (**Millennium Ecosystem Assessment**, 2005; **Hapca**, 2011; **IPBES**, 2019). En las últimas décadas, las invasiones biológicas han recibido cada vez mayor atención y se han logrado avances importantes en la comprensión del impacto de las especies foráneas (**Kumschick, et al.**, 2015; **Courchamp, et al.**, 2017).

Las especies foráneas o no nativas, también llamadas “exóticas” o “introducidas”, son aquellas cuya presencia en una región es atribuible a acciones humanas que les han permitido superar las barreras de su dispersión natural y cuyo impacto en el ecosistema receptor depende de su capacidad invasiva (**Russell & Blackburn**, 2017). Estos mismos autores sostienen que las especies invasoras son el subconjunto de especies exóticas que se considera de impacto negativo, en general. Sin embargo, no todas las especies exóticas son invasoras, por lo que es fundamental determinar las especificidades que las caracterizan (**Courchamp, et al.**, 2017).

La agricultura es considerada como el principal medio por el que muchas especies de plantas han sido introducidas fuera de su rango natural, ya sea de manera intencional o involuntaria (**Baptiste, et al.**, 2010; **Hapca**, 2011). Actualmente la influencia de las plantas invasoras alrededor del mundo es cada vez más notoria y se ha convertido en un problema de carácter local y global (**Early, et al.**, 2016). Se ha estimado que aproximadamente 13.186 especies de plantas han sido introducidas en cerca de 843 regiones del mundo, aunque las zonas tropicales aparecen como las menos afectadas (**Kleunen, et al.**, 2015). Sin embargo, en las últimas cinco décadas, en Suramérica se han identificado varias invasiones biológicas atribuidas a las profundas modificaciones del uso de la tierra, así como a la degradación y la destrucción de las comunidades vegetales en los países de esta región (**Gardener, et al.**, 2012). Esta situación se evidencia en Colombia en ecosistemas alterados debido a este fenómeno (**Gutiérrez**, 2006; **Andrade & Castro**, 2012).

Para hacer frente a esta problemática, en el país se han definido políticas y estrategias que han permitido reconocer especies exóticas como invasoras y sus efectos sobre el ecosistema receptor, así como la importancia de su manejo y control (**Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT**, 2010). El análisis de riesgo de invasión de plantas exóticas o trasplantadas registradas en diferentes biomas y ecosistemas ha permitido la categorización de 72 especies con alto riesgo de invasión en Colombia (**Cárdenas, et al.**, 2010; **Cárdenas, et al.**, 2011; **García-Duque, et al.**, 2016).

Cárdenas, et al. (2017), sin embargo, señalan que hay vacíos de información en los inventarios de algunas zonas del país, por lo que el número de plantas exóticas puede ser mayor; en ese sentido destacan la importancia de adelantar una adecuada gestión e investigación de las especies exóticas que proporcione información local para la prevención, manejo y control de las invasoras.

Debido al interés público y ambiental por todo tipo de especies invasoras, la atención de muchos científicos de la ciencia de las malezas se ha desplazado en las dos últimas décadas de las especies dominantes y su control a las especies de plantas invasoras en los agroecosistemas (**Zimdahl & Brown**, 2013). En estos, que son hábitats altamente artificiales, pobres en especies, ambientalmente homogéneos y con patrones de perturbación predecibles (**Weber**, 2003), las plantas exóticas pueden ser el resultado de filtración de especies de la flora del paisaje regional (**Poggio**, 2012), cuya presencia, al igual que la de las malezas comunes, afectaría la productividad por la competencia que generan y porque su control y manejo implica un incremento en los costos de producción (**Bentivegna & Fernández**, 2010). No obstante, la mayor preocupación por la presencia de estas especies es la amenaza que constituyen para la biodiversidad, dado que pueden escapar del cultivo (fugas) e instalarse en ambientes naturales (**Cárdenas, et al.**, 2010) que, siendo hábitats ambientalmente heterogéneos, influyen en mayor medida en el patrón y ritmo de propagación de las especies invasoras (**O'Reilly-Nugent, et al.**, 2016) que, según **Weber** (2003), pasan a convertirse en malezas ambientales.

Se reconocen como malezas ambientales las plantas invasoras que se extienden en zonas naturales donde no son deseadas y pueden tener efectos adversos en la biodiversidad, el funcionamiento de los ecosistemas o la economía (Weber, 2003). Incluyen especies introducidas, así como otras nativas que se han extendido más allá de su área de distribución natural anterior, producen semillas prolíficas y se establecen fácilmente en otros ecosistemas como matorrales, cursos de agua y pastizales nativos (White, et al., 2018).

En este contexto, se ha determinado la presencia de especies no nativas y otras de origen desconocido (Quintero-Pertuz, et al., 2020) en la comunidad de malezas asociada a los cultivos de banano en Magdalena, conformada mayoritariamente por especies herbáceas nativas. Teniendo en cuenta que las malezas introducidas tienen características comunes con plantas colonizadoras exitosas y que representan un riesgo para la productividad del cultivo y la biodiversidad, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el riesgo de invasión de las plantas introducidas asociadas a estos sistemas agrícolas para la detección temprana de las potencialmente riesgosas por su ‘invasividad’, respondiendo a las siguientes preguntas: ¿cuáles son las especies introducidas? y ¿cuál sería su nivel de riesgo de invasión? Los resultados obtenidos aportan información local sobre el nivel de riesgo de invasión de malezas introducidas en plantaciones bananeras, lo que resulta útil para definir planes de manejo integrado de prevención y monitoreo de las especies con alto riesgo de invasión aquí reportadas.

Materiales y métodos

Área de estudio

Se tuvo en cuenta el inventario de la flora asociada a cultivos de banano del Magdalena realizado por Quintero-Pertuz, et al. (2020), cuyas muestras, depositadas bajo la serie E. Carbonó & I. Quintero en el herbario UTMC de la Universidad del Magdalena, fueron revisadas. Las zonas de producción bananera del departamento abarcan un área aproximada de 16.000 hectáreas (AUGURA, 2020) distribuidas en la zona costera, el borde de la Ciénaga Grande y las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) en los municipios de Ciénaga, Zona Bananera, Retén, Aracataca, Fundación y en el norte del distrito de Santa Marta (Figura 1). Además de banano, en estos municipios hay plantaciones

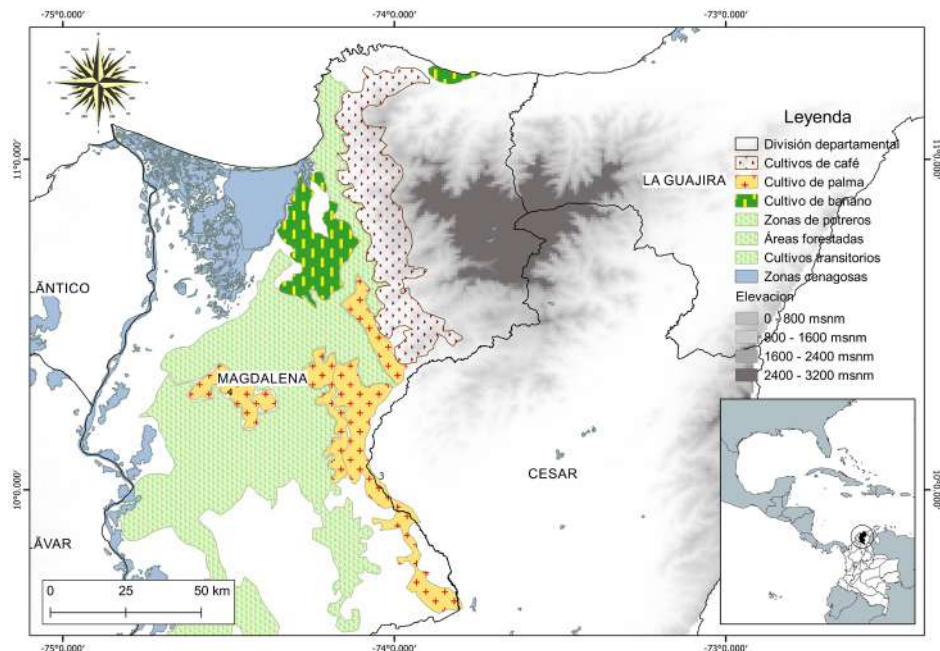


Figura 1. Localización de zonas de producción de banano en el departamento del Magdalena

de palma de aceite, arroz, cítricos, mango y café, este último con importante presencia en la SNSM, escenario de una considerable biodiversidad terrestre (Alvear, *et al.*, 2015) y una amplia oferta de servicios ambientales como la regulación hídrica, vital para el desarrollo económico y social de la región (CORPAMAG, 2013).

Identificación de plantas introducidas

A partir del inventario de Quintero-Pertuz, *et al.* (2020) y mediante la consulta bibliográfica de trabajos de especies invasoras en Colombia (Cárdenas, *et al.*, 2010; Cárdenas, *et al.*, 2011; García-Duque, *et al.*, 2016; Cárdenas, *et al.*, 2017) y las bases de datos de Bernal, *et al.* (2019) (<http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/>) de Tropicos (2020) (<http://www.tropicos.org/>), de The Global Biodiversity Information Facility - GBIF (2021) (<https://www.gbif.org/>) y del Centre for Agricultural Bioscience International - CABI (2020) (<http://www.cabi.org/isc>), se determinaron aquellas especies no nativas o introducidas al país con origen reconocido en otros continente diferentes a América. La información taxonómica se actualizó con base en el sistema de clasificación del Angiosperm Phylogeny Group - APG IV (2016) y para la nomenclatura se consultaron las bases de Bernal, *et al.* (2019) y Tropicos (2020) (<http://www.tropicos.org/>).

Categorización del nivel de riesgo de invasión de las especies introducidas

Se hizo un análisis del riesgo de establecimiento e invasión de las especies determinadas como introducidas utilizando la herramienta I3N propuesta por Zalba & Ziller (2008) para plantas en América Latina. Esta metodología permite definir categorías de invasión a partir de 28 criterios (preguntas) relacionados con el riesgo de establecimiento o invasión, el impacto potencial y la dificultad de control o erradicación en el ecosistema receptor. Las respuestas a las preguntas sobre cada especie se registraron en una plantilla predeterminada en Excel, elaborada y facilitada por Zalba & Ziller (2008). Las preguntas tienen en cuenta los reportes previos de invasión y el ajuste climático, además de los aspectos de la biología de la especie como la capacidad de establecer poblaciones a partir de pocos individuos, la propagación vegetativa y de producción de compuestos alelopáticos, sin dejar de lado la producción de semillas, entre otros caracteres. También se consideran las características de la especie en cuanto a su tolerancia a los incendios, su afectación de la economía y la salud humana y los usos tradicionales del suelo, así como temas referentes a la facilidad de control de la especie (Cárdenas, *et al.*, 2010).

La metodología I3N (Zalba & Ziller, 2008) establece que la suma de los puntajes correspondientes a cada pregunta indica el riesgo asociado a la especie evaluada y define cuatro categorías de riesgo de invasión, así: alto (valores entre 5,01 y 10,0), moderado (valores entre 3,01 y 4,50), bajo (valores entre 1,0 y 3,0) y que requiere mayor análisis (valores entre 4,56 y 5,0). Asimismo, con la metodología se determina un valor de incertidumbre que permite conocer el nivel de desconocimiento sobre una especie y tomar la decisión de aceptar o no la categorización final. Se sugiere que las especies con nivel de incertidumbre (NI) menor de 15 presentan un alto grado de confiabilidad, en tanto que no deben considerarse niveles de incertidumbre superiores a 15, los cuales deben registrarse en la categoría de aquellas que requieren mayor análisis (Baptiste, *et al.*, 2010). Después del análisis de resultados se presenta el listado de las especies introducidas y categorizadas según el nivel de riesgo de invasión.

Resultados

Identificación de plantas introducidas

Se constató que de las 204 especies de malezas registradas en el inventario de Quintero-Pertuz, *et al.* (2020), 31 eran introducidas (Tabla 1) y se agrupaban en 24 géneros y 10 familias. Las familias con mayor representación fueron *Poaceae* (14 especies), *Asteraceae* (4), *Rubiaceae* (3), y *Amaranthaceae*, *Curcubitaceae* y *Cyperaceae*, con dos especies cada una, en tanto que cuatro familias estuvieron representadas solamente por

Tabla 1. Nivel de riesgo de invasión de malezas introducidas asociadas a cultivos de banano en el departamento del Magdalena, Colombia

Familia	Especie	Origen	RI	NR	NI (%)
Cyperaceae	<i>Cyperus rotundus</i> L.*	África y Eurasia	7,09	Alto	0
Poaceae	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	África	7,09	Alto	0
Poaceae	<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst.	África	6,97	Alto	0
Asteraceae	<i>Cyanthillium cinereum</i> (L.) H. Rob.*	África, Asia y Australia	6,67	Alto	0
Commelinaceae	<i>Murdannia nudiflora</i> (L.) Brenan*	Asia tropical y subtropical	6,61	Alto	0
Poaceae	<i>Bothriochloa pertusa</i> (L.) A.Camus*	Asia	6,61	Alto	0
Poaceae	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.*	Trópico del Viejo Mundo	6,61	Alto	0
Poaceae	<i>Megathyrsus maximus</i> (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs	África	6,61	Alto	0
Poaceae	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaerth.*	África	6,55	Alto	0
Poaceae	<i>Urochloa distachya</i> (L.) T.Q.Nguyen*	Asia tropical	6,5	Alto	3,45
Acanthaceae	<i>Thunbergia fragrans</i> Roxb*	India, sureste de Asia	6,44	Alto	3,45
Cucurbitaceae	<i>Momordica charantia</i> L.	África y Australia	6,24	Alto	0
Amaranthaceae	<i>Achyranthes aspera</i> L.*	Trópico y subtrópico del Viejo Mundo	6,12	Alto	0
Poaceae	<i>Rottboellia cochinchinensis</i> (Lour.) Clayton	Trópico del Viejo Mundo	5,94	Alto	0
Amaranthaceae	<i>Cyathula prostrata</i> (L.) Blume*	África, Asia y Australia	5,88	Alto	0
Poaceae	<i>Digitaria bicornis</i> (Lam.) Roem. & Schult.*	Asia tropical	5,68	Alto	6,9
Myrtaceae	<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston*	Asia sudoriental	5,64	Alto	0
Fabaceae	<i>Alysicarpus vaginalis</i> (L.) DC.*	África, Asia, Malasia y Australia	5,52	Alto	0
Cyperaceae	<i>Cyperus iria</i> L.*	Asia, sur de Australia y oeste de la India	5,52	Alto	0
Poaceae	<i>Panicum antidotale</i> Retz.*	India y Asia	5,48	Alto	6,9
Asteraceae	<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.*	Asia	5,45	Alto	0
Poaceae	<i>Echinochloa colona</i> (L.) Link*	Asia tropical y subtropical	5,45	Alto	0
Poaceae	<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.*	Europa	5,44	Alto	3,45
Cucurbitaceae	<i>Lagenaria siceraria</i> (Molina) Standl.*	África	5,39	Alto	0
Asteraceae	<i>Emilia coccinea</i> (Sims) G. Don.	África	4,56	Moderado	3,45
Asteraceae	<i>Emilia sonchifolia</i> (L.) DC.	China y Asia sudoriental	4,48	Moderado	0
Poaceae	<i>Eragrostis tenella</i> (L.) Roem. & Schult.	China, India	4,13	Moderado	3,45
Rubiaceae	<i>Oldenlandia corymbosa</i> L.	África	5,11	Requiere mayor análisis	20,69
Rubiaceae	<i>Oldenlandia lancifolia</i> (Schumach.) DC.	África	4,89	Requiere mayor análisis	20,69
Poaceae	<i>Eragrostis ciliaris</i> (L.) R. Br.	África tropical y subtropical	4,79	Requiere mayor análisis	17,24
Rubiaceae	<i>Oldenlandia umbellata</i> L.	África e India	3,54	Requiere mayor análisis	24,14

RI: riesgo de invasión; NR: nivel del riego; NI: nivel de incertidumbre. *Indica nuevos registros de plantas introducidas con alto nivel de riesgo de invasión en Colombia

una especie (**Tabla 1**). Los géneros que presentaron mayor número de especies introducidas fueron *Oldenlandia*, con tres especies, *Emilia*, *Cyperus*, *Cynodon*, *Digitaria* y *Eragrostis*, con dos especies cada uno, en tanto que 18 géneros estuvieron representados por una sola especie (**Tabla 1**).

Categorización del nivel de riesgo de invasión de las especies introducidas

De las 31 especies de plantas introducidas evaluadas, 24 se categorizaron con riesgo alto de invasión y un nivel de incertidumbre (NI) entre 0 y 6,9; tres con riesgo moderado y un NI entre 0 y 3,45, y cuatro requerían un mayor análisis al presentar un NI mayor que 15; ninguna especie fue categorizada en riesgo bajo (**Tabla 1**). Las evaluaciones de las especies con NI menores que 15 evidenciaron un alto grado de confiabilidad, en tanto que las cuatro especies con NI mayor que 15 requerían mayor análisis por no tenerse suficiente información reportada en las diferentes fuentes bibliográficas; 19 de las especies (**Tabla 1**) constituyen un primer reporte de malezas introducidas con alto riesgo de invasión en el departamento del Magdalena e, incluso, en Colombia.

Discusión

Plantas introducidas e invasoras

La categorización de 24 especies introducidas con alto riesgo de invasión entre las 31 evaluadas en este estudio respalda el argumento de **Quintero-Pertuz, et al.** (2020) de que no se debe subestimar la presencia de las malezas no nativas asociadas a las plantaciones bananeras del Magdalena, así como la importancia de mantener la precaución ante la presencia de especies introducidas. Según **Capdevilla-Argüelles, et al.** (2006), este principio de precaución en el caso de las invasiones biológicas debe adoptarse asumiendo que todas las especies exóticas son sospechosas de ser invasoras hasta que pruebas fehacientes demuestren lo contrario. Es decir, que la falta de certeza científica acerca de las diversas consecuencias de una invasión no debería utilizarse como razón para aplazar o no adoptar medidas adecuadas de erradicación, contención y control (**Convention on Biological Diversity - COP, 2000**).

Seis de las 24 especies categorizadas con riesgo de invasión alto se encuentran entre las 18 malezas invasoras más importantes del mundo (**Holm, et al.**, 1977; **Randall, 2017**; **CABI, 2020**): *Cyperus rotundus* (Cyperaceae), *Cynodon dactylon*, *Eleusine indica*, *Rottboellia cochinchinensis*, *Echinochloa colona* y *Digitaria sanguinalis* (todas Poaceae). De estas, *C. dactylon* y *R. cochinchinensis*, junto con *Cynodon nlemfuensis* y *Megathyrsus maximus* (ambas Poaceae), hacen parte de las 42 especies confirmadas y registradas con riesgo de invasión alto en Colombia (**Baptiste, et al.**, 2010) a partir de un análisis de riesgo de invasión realizado a 84 de las 597 especies de plantas introducidas registradas en Colombia (**Cárdenas, et al.**, 2010; **Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2021**).

Otra de las especies analizadas en nuestro estudio y registrada anteriormente con alto riesgo de invasión fue *Momordica charantia* (Cucurbitaceae) (**García-Duque, et al.**, 2016). Cabe resaltar que *Thunbergia fragrans*, *Achyranthes aspera*, *Cyathula prostrata*, *Cyanthillium cinereum*, *Eclipta prostrata*, *Alysicarpus vaginalis*, *Syzygium jambos*, *Murdannia nudiflora*, *Lagenaria siceraria*, *Cyperus rotundus*, *Cyperus iria*, *Bothriochloa pertusa*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Eleusine indica*, *Urochloa distachya*, *Digitaria bicornis*, *Panicum antidotale*, *Echinochloa colona* y *Digitaria sanguinalis*, analizadas en nuestro estudio, no figuran entre los registros obtenidos hasta la fecha en Colombia, por lo tanto, constituyen nuevos registros de plantas introducidas con alto riesgo de invasión en el departamento y en el país. Estas especies se encuentran reportadas como plantas invasoras en varios países en las regiones tropicales y subtropicales de América y en islas del Caribe y del Pacífico (**CABI, 2020**; **Tropicos, 2020**).

Syzygium jambos (Myrtaceae), *Eleusine indica* (Poaceae) y *Lagenaria siceraria* (Cucurbitaceae) se habían reportado con riesgo moderado de invasión en Colombia (**Cárdenas, et al.**, 2010; **García-Duque, et al.**, 2016). Es posible que esta diferencia con nuestros resultados se deba a una mayor disponibilidad de información sobre ellas en la actualidad, especialmente lo relacionado con nuevos registros como especies introducidas e invasoras en otras partes del mundo (**GBIF, 2021**), y a la dificultad de su control por la resistencia a herbicidas, como es el caso de *E. indica* (**Plaza, et al.**, 2021).

De las 24 especies con nivel de riesgo de invasión alto, 12 son de la familia Poaceae, muchos de cuyos taxones son dominantes en una gran variedad de ecosistemas, incluidos los agrícolas (**Biganzoli & Zuloaga, 2015; Randall, 2017**). De las especies invasoras reportadas por **Cárdenas, et al.** (2010, 2011), la mayoría pertenece a las familias Asteraceae, Poaceae y Fabaceae. Por su parte, **García-Duque, et al.** (2016), quienes elaboraron un listado de 243 especies de plantas introducidas y potencialmente invasoras en el altiplano del Oriente Antioqueño, reportaron las familias Fabaceae, Poaceae, Solanaceae y Asteraceae como las más representadas en los diferentes municipios.

Según **Giraldo-Cañas** (2010), la amplia adaptación ecológica que presentan las más de 10.000 especies de Poaceae se debe a las diferencias en su fisiología, bioquímica, anatomía, ultra-estructura y requerimientos ambientales, lo que les otorga un alto potencial de invasión, pues favorece su rápido crecimiento y propagación vegetativa, permitiéndoles colonizar rápidamente nuevas áreas (**Cárdenas, et al., 2011**). La mayoría de las gramíneas reportadas en este estudio con riesgo de invasión alto posee atributos como la capacidad de propagarse vegetativamente por medio de rizomas y estolones y sus semillas, que se producen en gran número, son de tamaño pequeño y fáciles de dispersar por el viento y los animales y que, además, pueden aumentar su viabilidad en nuevos sitios de colonización, lo que sumado a la vía fotosintética C4 que presentan, favorece su invasividad (**Giraldo-Cañas & Baptiste, 2017**).

Por su parte las Asteraceae, representadas en este estudio por dos especies con nivel de riesgo de invasión alto (*Cyanthilium cinereum* y *Eclipta prostrata*) y dos con riesgo moderado (*Emilia coccinea* y *E. sonchifolia*), se caracterizan por su amplia distribución a nivel global y su presencia en varios sistemas productivos (**Al Farishy & Salamah, 2021**).

Las especies de esta familia tienen una tasa de crecimiento foliar rápido, incluso en condiciones de sequía, producen gran cantidad de semillas que se dispersan por diferentes mecanismos, lo que las convierte en plantas problema (**Sosa-Madrado, et al., 2011**). De hecho, actualmente *C. cinereum* se considera invasora en muchas islas del océano Pacífico, Nueva Zelanda, Singapur, Costa Rica, Guatemala, Nicaragua, Panamá, Islas Galápagos, Cuba, Puerto Rico y las Islas Vírgenes, y *E. prostrata* se señala como maleza problemática en varios cultivos (**CABI, 2020**).

En el caso de la familia Cyperaceae, representada en este estudio por las especies *Cyperus rotundus* y *C. iria*, de alto nivel de riesgo de invasión, se caracteriza porque varias de sus especies son nocivas, ya que pueden crecer en diversos entornos y competir con los cultivos (**Tajkia, et al., 2018**). *C. rotundus* ha sido considerada como la maleza número uno entre las peores del mundo y ha sido reportada en más de 90 países donde crece rápidamente e infesta más de 50 cultivos diferentes (**Holm, et al., 1977**).

Se destaca la presencia de *M. nudiflora* (Commelinaceae), que ha sido reportada como la cuarta con mayor índice de importancia y muy frecuente en las plantaciones de banano del Magdalena (**Quintero-Pertuz, et al., 2021**). La capacidad de *M. nudiflora* de propagarse por semillas y vegetativamente le confiere características de planta invasora; de hecho, se cataloga como una maleza muy competitiva que puede invadir espacios abiertos en tierras agrícolas y no agrícolas, y crece formando rodales densos que sofocan todas las demás especies de plantas, incluidas las nativas (**CABI, 2020**).

Aunque las especies categorizadas con riesgo alto de invasión requieren mayor atención, no se debe descuidar a las categorizadas con riesgo moderado, como *E. coccinea*, *E. sonchifolia* (Asteraceae) y *Eragrostis tenella* (Poaceae), debido a que pueden naturalizarse en la zona y competir con especies nativas. Por ejemplo, *E. coccinea* se comporta como una maleza ambiental y agrícola que por su ritmo de crecimiento tiene el potencial de colonizar rápidamente áreas alteradas, terrenos baldíos, jardines, bordes de bosques, pastos, tierras cultivadas activas y abandonadas, bordes de caminos, matorrales secos y riberas de ríos; está adaptada para crecer en una amplia gama de condiciones ambientales y tiene semillas que son dispersadas por el viento, características que pueden facilitar su propagación a nuevos hábitats; de hecho, está catalogada como invasora en Hawái,

República Dominicana y Nueva Caledonia (**Rojas-Sandoval, 2020**). Por su parte, *E. sonchifolia* es maleza en varios cultivos y se ha demostrado que reduce los rendimientos y actúa como reservorio de patógenos de los cultivos; actualmente está catalogada como invasora en India, México, Brasil, Paraguay, Costa Rica, Galápagos, Puerto Rico, Islas Vírgenes, República Dominicana, Trinidad y Tobago, Madeira, Hawái y en muchas otras islas del océano Pacífico (**Rojas-Sandoval, 2018**).

Es muy probable que la introducción de las especies exóticas en la zona de estudio sea intencional, producto de actividades humanas como la ganadería y la agricultura, que representan las principales fuentes de ingresos para la región (**Lombana, et al., 2012**). La ganadería bovina tradicional en el Magdalena, que se ha desarrollado en las zonas centro y norte del departamento (**Gobernación del Magdalena, 2019**), explicaría la presencia de un mayor número de especies de gramíneas introducidas por su uso como pasto y forraje; entre estas se destacan *B. pertusa* (Colosua), *C. nlemfuensis* (Estrella) y *M. maximus* (Guinea o India) como las predominantes en los potreros de la región (**Piñeros & Mora, 2014; DANE, 2020**), de donde probablemente se filtraron a las plantaciones de banano.

El hecho de que el mayor número de especies introducidas sean gramíneas concuerda con lo reportado en diferentes países donde la introducción se ha efectuado con el objetivo comercial de producir forraje o crear campos deportivos, entre otros (**Mathews, 2005; Giraldo-Cañas, 2010; Biganzoli & Zuloaga, 2015**).

Según **Linder, et al. (2017)**, las gramíneas pueden desplazar de su hábitat natural a otras especies menos competitivas, lo cual resulta de la combinación de una dispersión eficaz a larga distancia, una biología de establecimiento eficaz, flexibilidad ecológica, resistencia a las perturbaciones y la capacidad de modificar los entornos cambiando regímenes de incendios y la herbivoría, por lo que sus poblaciones en un agroecosistema deben ser monitoreadas.

Se pudo determinar que los criterios que más contribuyeron al nivel de riesgo de la mayoría de las especies evaluadas fueron los relacionados con el riesgo de establecimiento o invasión. Este factor contempla características de la especie asociadas con antecedentes de invasión, ajuste climático, amplitud ecológica, capacidad de establecimiento, velocidad de crecimiento y maduración, reproducción vegetativa, producción de semillas y dispersión. Según **Zimdahl & Brown (2013)**, estas son características de especies invasoras exitosas que les permiten extenderse a nuevas áreas y superar la vegetación nativa. En este sentido, se debe evaluar la distribución potencial de las especies con alto riesgo de invasión para determinar los ambientes donde pueden estar presentes y en los que posiblemente estarán en el futuro en el Magdalena, así como determinar su presencia en los ecosistemas aledaños al cultivo para corroborar su condición invasora, lo que sería un insumo clave para alertas tempranas.

Conclusiones

Estos resultados brindan información local sobre el nivel de riesgo de invasión de malezas introducidas asociadas a las plantaciones bananeras que puede ser útil para definir planes de manejo integrado como estrategia fundamental para la prevención y monitoreo de las especies con riesgo alto de invasión aquí reportadas y evitar su distribución y su impacto tanto en las plantaciones de banano como en otros ecosistemas del departamento, es decir, su conversión en malezas ambientales. Se sugiere, como medida preventiva, hacer el análisis de riesgo de especies naturalizadas y nativas trasplantadas, ya que hay algunas que han sido reportadas a nivel mundial como invasoras.

Agradecimientos

A Gilberto Orozco, al grupo de investigación en fitotecnia del trópico y al personal del Herbario UTMC de la Universidad del Magdalena, por su colaboración, y a los evaluadores anónimos, por sus contribuciones al mejoramiento del manuscrito.

Contribución de los autores

KEP, IQP, ECD: participaron en la conceptualización de la investigación, la revisión bibliográfica, el tratamiento de la información y la escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar

Referencias

- Al Farishy, D.D. & Salamah, A.** (2021). Asteraceae Diversity and A New Record For Java at Citalahab Village, Gunung Halimun-Salak National Park. *Jurnal Biologi Tropis* **21** (2): 383-392. <https://doi.org/10.29303/jbt.v21i2.2619>.
- Alvear, M., Ocampo, G., Parra-O, C., Carbonó, E., Almeda, F.** (2015). Melastomataceae of the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia): Floristic affinities and annotated catalogue. *Phytotaxa*. **195** (1): 1-30. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.195.1.1>
- Andrade, G.I. & Castro, L.G.** (2012). Degradación, pérdida y transformación de la biodiversidad continental en Colombia, invitación a una interpretación socioecológica. *Ambiente y Desarrollo*. **16** (30): 53-71. <http://hdl.handle.net/10554/22780>
- APG IV – The Angiosperm Phylogeny Group.** (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV, *Bot. J. Linn.* **181** (1): 1-20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- AUGURA - Asociación de Bananeros de Colombia.** (2020). Coyuntura bananera 2020. Fecha de consulta: entre junio y diciembre de 2020. Disponible en: <https://augura.com.co/biblioteca-digital/>
- Baptiste, M., Castaño, N., Cárdenas, D., Gutiérrez, F., Gil, D., Lasso, C.** (Editores) (2010). Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 200 p.
- Bentivegna, D. & Fernández, O.** (2010). Malezas invasoras: estrategias para una determinación y manejo apropiados. *AgroUNS*. **7** (13): 5-7. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/16987>
- Bernal, R., Gradstein, S. R., Celis, M.** (2019). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Fecha de consulta: entre junio y diciembre de 2020. Disponible en: <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Biganzoli, F. & Zuloaga, F.** (2015). Análisis de diversidad de la familia Poaceae en la región austral de América del Sur. *Rodriguésia*. **66** (2): 337-351. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201566205>
- Capdevila-Argüelles, L., Iglesias-García, A., Orueta, J.F., Zilletti, B.** (2006). Especies Exóticas Invasoras: Diagnóstico y bases para la prevención y el manejo. Ministerio de Medio Ambiente, España. <https://www.researchgate.net/publication/257966848>
- Cárdenas, D., Castaño, N., Cárdenas-Toro, J.** (2010). Análisis de riesgo de especies de plantas introducidas para Colombia. En Baptiste, M., Castaño, N., Cárdenas, D., Gutiérrez, F., Gil, D., Lasso, C. (Eds.). Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. (51-71). Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Cárdenas, D., Castaño, N., Cárdenas-Toro, J.** (2011). Plantas introducidas, establecidas e invasoras en Amazonia colombiana. Bogotá, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas –Sinchi. 154 p.
- Cárdenas, D., Baptiste, M., Castaño, N.** (2017). Plantas exóticas con alto potencial de invasión en Colombia. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 295 p.
- CABI - Centre for Agricultural Bioscience International.** (2020). Invasive Species Compendium. Wallingford, UK: CAB International. Fecha de consulta: entre junio y diciembre de 2020. Disponible en: <http://www.cabi.org/isc>
- Convention on Biological Diversity- COP.** (2000). Principios de orientación para la prevención, introducción y mitigación de impactos de especies exóticas que amenazan los ecosistemas, los hábitats o las especies (ANEXO). En: COP 6 Decisión VI/23, Especies exóticas que amenazan a los ecosistemas, los hábitats o las especies. Fecha de consulta: septiembre de 2021. Disponible en: <https://www.cbd.int/decision/cop/?id=7197>
- CORPAMAG - Corporación Autónoma Regional del Magdalena.** (2013). Plan de Gestión Ambiental Regional - PGAR 2013 – 2027. Fecha de consulta: septiembre de 2021. Disponible en: <https://www.corpamag.gov.co/archivos/planes/PGAR%20CORPAMAG%202013-2027.pdf>

- Courchamp, F., Fournier, A., Bellard, C., Bertelsmeier, C., Bonnaud, E., Jeschke, JM., Russell, J.C.** (2017). Invasion Biology: Specific Problems and Possible Solutions. *Trends in Ecology & Evolution*. **32** (1): 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.11.001>
- DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística.** (2020). Encuesta Nacional Agropecuaria - ENA 2019. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena#anexos>, accedida septiembre de 2021
- Early, R., Bradley, B., Dukes, J., Lawler, J., Olden, J., Blumenthal, D., González, P., Grosholz, E., Ibáñez, I., Miller, L., Sorte, S., Tatem, A.** (2016). Global threats from invasive alien species in the twenty-first century and national response capacities. *Nat. Commun.* **7**: 12485. <https://doi.org/10.1038/ncomms12485>
- García-Duque, J.J., Franco, M.C., Cardona, D.E., Quijano-Abril, M.A.** (2016). Categorización y análisis de la distribución de especies introducidas, establecidas e invasoras en el altiplano del Oriente Antioqueño. En Quijano, M. (Ed.), *Flora del Oriente Antioqueño Biodiversidad, Ecología y Estrategias de conservación* (109-136). Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Fondo Editorial Universidad Católica de Oriente. 266 p.
- Gardener, M., Bustamante, R., Herrera, I., Durigan, G., Pivello, V., Moro, M., Stoll, A., Langdon, B., Baruch, Z., Rico, A., Arredondo-Núñez, A., Flores, S.** (2012). Plant invasions research in Latin America: fast track to a more focused agenda. *Plant Ecology & Diversity*. **5** (2): 225-232. <https://doi.org/10.1080/17550874.2011.604800>
- GBIF: The Global Biodiversity Information Facility.** (2021). *Plantae* in Baptiste, *et al.* (2020). Global Register of Introduced and Invasive Species - Colombia. Version 1.5. Invasive Species Specialist Group ISSG. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/yznr8v>
- Giraldo-Cañas, D.** (2010). Distribución e invasión de gramíneas C3 y C4 (Poaceae) en un gradiente altitudinal de los Andes de Colombia. *Caldasia*. **32** (1): 65-86.
- Giraldo-Cañas, D. & Baptiste, M. P.** (2017). Fichas de especies exóticas de alto riesgo de invasión. Familia Poaceae. En Cárdenas-López, D., Baptiste, M., Castaño, N. (Eds.). *Plantas exóticas con alto potencial de invasión en Colombia*. (150-214). Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Gobernación del Magdalena.** (2019). Plan Departamental de Extensión Agropecuaria del Magdalena. Fecha de consulta: septiembre de 2021. Disponible en: <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Documents/PDEA%27s%20Aprobados/PDEA%20Magdalena.pdf>
- Gutiérrez, F.** (2006). Estado de conocimiento de especies invasoras. Propuesta de lineamientos para el control de los impactos. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 158 p.
- Hapca, A.** (2011). Invasive Plant Species, the Enemy of Biodiversity. *Bulletin UASVM Horticulture*. **68** (1): 317-320. <https://www.cabi.org/isc/FullTextPDF/2012/20123003790.pdf>
- Holm, L., Plucknett, D., Pancho, J., Herberger, J.** (1977). *The world's worst weeds. Distribution and biology*. Hawaii: University Press of Hawaii, 610 pp.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.** (2021). Las 35 plantas exóticas con alto potencial de invasión en Colombia. Instituto Humboldt. Boletín de prensa. <http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1108-35-plantas-exoticas-invasion-colombia#>
- Kleunen, M., Dawson, W., Essl, F., Pergl, J., Winter, M., Weber, E., Kreft, H., Weigelt, P., Kartesz, J., Nishino, M., Antonova, L., Barcelona, J., Cabezas, F., Cardenas, D., Cardenas-Toro, J., Castaño, N., Chacon, E., Chatelain, C., Ebel, A., Figueiredo, E., Fuentes, N., Groom, Q., Henderson, L., Inderjit, Kupriyanov, A., Masciadri, S., Meerman, J., Morozova, O., Moser, D., Nickrent, D., Patzelt, A., Pelsler, P., Baptiste, M., Poopath, M., Schulze, M., Seebens, H., Shu, W., Thomas, J., Velayos, M., Wieringa, J., Pyšek, P.** (2015). Global exchange and accumulation of non-native plants. *Nature*. **525** (7567):100- 103. <https://doi.org/10.1038/nature14910>
- IPBES.** (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Version 1). Zenodo. Fecha de consulta: septiembre de 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831674>
- Kumschick, S., Bacher, S., Evans, T., Marková, Z., Pergl, J., Pyšek, P., Vaes-Petignat, S., van der Veer, G. Vilà, M., Nentwig, W.** (2015). Comparing impacts of alien plants and animals in Europe using a standard scoring system. *Journal of Applied Ecology*. **52**: 552-561. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12427>

- Linder, H.P., Lehmann, C.E.R., Archibald, S., Osborne, C., Richardson, D.** (2017). Global grass (Poaceae) success underpinned by traits facilitating colonization, persistence and habitat transformation. *Biological Reviews*. **93** (2): 1125-1144. <https://doi.org/10.1111/brv.12388>
- Lombana, J., Martínez, D., Valverde, M., Rubio, J., Castrillón, J., Marino, W.** (2012). Caracterización del sector ganadero del Caribe colombiano. Barranquilla, Colombia: Editorial Universidad del Norte. 62 p.
- Mathews, S.** (2005). Sudamérica Invadida: el creciente peligro de las especies exóticas invasoras. Programa Mundial sobre Especies Invasoras (GISP), 80 pp.
- Millennium Ecosystem Assessment.** (2005). Ecosystems and human well-being: current state and trends. Washington, DC: Island Press. Millennium Ecosystem Assessment Series, vol. 1. 815 p.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT.** (2010). Resolución 0207 del 3 de febrero de 2010. Por la cual se adiciona el listado de especies exóticas invasoras declaradas por el artículo primero de la Resolución 848 de 2008 y se toman otras determinaciones. 7 pp.
- O'Reilly-Nugent, A., Palit, R., Lopez-Aldana A., Medina-Romero M., Wandrag, E., Duncan, R.** (2016). Landscape Effects on the Spread of Invasive Species. *Curr. Landscape Ecol. Rep.* **1**: 107-114. <https://doi.org/10.1007/s40823-016-0012-y>
- Piñeros, R. & Mora, J.** (2014). *Bothriochloa* sp.: una gramínea con potencial forrajero para pasturas del trópico seco. En: Mora, J., Castañeda, R., Piñeros, R. (Eds.), Paisajes, pasturas y pastos: métodos para determinar cantidad y calidad (53-72). Ibagué, Colombia: Universidad del Tolima.
- Plaza, G., Hoyos, V., Vázquez-García, J.G., Alcántara-de la Cruz, R., De Prado, R.** (2021). First Case of Multiple Resistance to EPSPS and PSI in *Eleusine indica* (L.) Gaertn. collected in Rice and Herbicide-Resistant Crops in Colombia. *Agronomy*. **11**: 96. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010096>
- Poggio, S. L.** (2012). Cambios florísticos en comunidades de malezas: un marco conceptual basado en reglas de ensamblaje. *Ecología Austral*. **22** (2):150-158.
- Quintero-Pertuz, I., Carbonó-Delaho, E., Jarma-Orozco, A.** (2020). Weeds Associated with Banana Crops in Magdalena Department, Colombia. *Planta Daninha*. **38**: 1-13. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582020380100015>
- Quintero-Pertuz, I., Carbonó-Delaho, E. C., Hoyos Castaño, V., Jarma-Orozco, A. D. J., Plaza, G.** (2021). Fitosociología de malezas en plantaciones bananeras en el departamento del Magdalena, Colombia. *Caldasia*. **43** (1): 80-93. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v43n1.83554>
- Randall, R. P.** (2017). A Global Compendium of Weeds. 3rd Edition. Perth, Western, Australia: R.G. and F.J. Richardson Meredith Australia. 3654 p.
- Rojas-Sandoval, J.** (2018). *Emilia sonchifolia* (red tassel flower). Invasive Species Compendium. Wallingford, UK: CABI. <https://doi.org/10.1079/ISC.20833.20203483219>
- Rojas-Sandoval, J.** (2020). *Emilia coccinea* (scarlet tassel flower). Invasive Species Compendium. Wallingford, UK: CABI. <https://doi.org/10.1079/ISC.120120.20203482737>
- Russell, J.C. & Blackburn, T.M.** (2017). Invasive Alien Species: Denialism, Disagreement, Definitions, and Dialogue. *Trends Ecol. Evol.* **32** (5): 312-314. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.02.005>
- Sosa-Madrado, M., Ortega-Meseguer, I., Díaz-Peña, M., Castellanos-González, L.** (2011). Identificación de malezas invasoras en los cultivos en los municipios Lajas, Cruces y Palmira. Universidad de Cienfuegos, Cuba. 67 pp.
- Tajkia, J. E., Sagar, A., Golam Sarwar, A.K.M.** (2018). Reassessment of cyperaceous weed biodiversity at Bangladesh Agricultural University campus. *J. Bangladesh Agril. Univ.* **16** (2): 221-226. <https://doi.org/10.3329/jbau.v16i2.37964>
- Tropicos.org.** (2020). Missouri Botanical Garden. Fecha de consulta: entre marzo y diciembre de 2020. Disponible en: <http://www.tropicos.org>
- Weber, E.** (2003). Invasive Plant Species of the World: A Reference Guide to Environmental Weeds. CABI, Wallingford, UK, 548 pp.
- White, M., Cheal, D., Carr, G. W., Adair, R., Blood, K., Meagher, D.** (2018). Advisory list of environmental weeds in Victoria. Arthur Rylah Institute for Environmental Research Technical Report Series No. 287. Department of Environment, Land, Water and Planning, Heidelberg, Victoria.
- Zalba, S. & Ziller, S.** (2008). Herramientas de prevención de invasiones biológicas de I3N: Manual de uso. Invasive Information Network (I3N). The Nature Conservancy, Florianópolis. https://sib.gob.ar/archivos/I3N_ManualHerramientasdePrevenciondeInvasiones.pdf
- Zimdahl, R. & Brown, C.** (2013). Invasive Plants. In: Zimdahl, R. (Ed.), *Fundamentals of weed science* (4 ed. 191-227 p.). Elsevier Inc. London.

Original article

New records and a key for species of *Synarthonia* (lichenized Ascomycota: Arthoniaceae) in Colombia

Nuevos registros y una clave para las especies de *Synarthonia* (Ascomycota liquenizada: Arthoniaceae) en Colombia

Edier Soto-Medina^{1,2}

¹Grupo Colombiano de Liquenología (GCOL), Colombia

²Grupo de Biodiversidad Neotropical, Instituto para la Investigación y la Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca- INCIVA, Cali, Colombia

Abstract

For the first time in Colombia, *Synarthonia inconspicua* (Stirt.) Van den Broeck & Ertz, *S. muriformis* Van den Broeck, Frisch & Ertz, and *S. xanthosarcographoides* Aptroot are reported and a valid diagnosis is provided for the recently described *S. robertiana* Soto-M & Aptroot, a new species from the dry forest of Valle del Cauca characterized by presenting septate ascospores and UV+ yellow stromata. A key to the species of the genus in Colombia is also presented.

Keywords: Liches; Tropical dry forest; Fungi.

Resumen

Se reportan por primera vez para Colombia *Synarthonia inconspicua* (Stirt.) Van den Broeck & Ertz, *S. muriformis* Van den Broeck, Frisch & Ertz y *S. xanthosarcographoides* Aptroot. Además, se da una diagnosis válida de *S. robertiana* Soto-M & Aptroot, una nueva especie recién descrita proveniente del bosque seco del Valle del Cauca que se caracteriza por presentar ascosporas septadas y estromas UV+ amarillas, y se presenta una clave para las especies del género en Colombia.

Palabras clave: Líquenes; Bosque seco tropical; Fungi.

Introduction

The current catalog of lichenized fungi in Colombia registers 1,732 species (Lücking, *et al.*, 2021), but there are still many species to be discovered or described since almost 2,800 are estimated for the country (Soto, *et al.*, 2021). Arthoniaceae is one of the largest lichen families in the Neotropics with approximately 56 species occurring in Colombia. Currently, several new species of this family are being described but there are still genera with few records. *Synarthonia* is a recently recognized genus with several new records for the Neotropics. It is characterized by mono- to pluri-carpocentral synascomata immersed in a pseudostroma. The ascospores are similar to those of *Arthonia* and range from septate (macrocephalic) to muriform (Joseph & Sinha, 2015). Some species show a UV+ yellow reaction due to the presence of lichexanthone as is the case in *S. xanthosarcographoides* (Aptroot & Spielman, 2020).

In the framework of the INCIVA tropical dry forest project, new Arthoniaceae species have been documented for Colombia (Soto, *et al.*, 2021), among them, *Synarthonia robertiana*. However, since both the diagnosis and the description were given in Spanish, the name was not validly established and is validated here now. The genus *Synarthonia* was not previously known in Colombia (Lücking, *et al.*, 2021) but three other species have already been found besides *S. robertiana*. Here these new *Synarthonia* records for Colombia with a key to all four known species are documented.

Citation: Soto-Medina E. New records and a key for species of *Synarthonia* (lichenized Ascomycota: Arthoniaceae) in Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):165-168, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1558>

Editor: Elizabeth Castañeda

Corresponding autor:

Edier Soto; ediersot@gmail.com

Received: September 8, 2021

Accepted: February 8, 2022

Published: March 23, 2022



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

Materials and methods

The material deposited in the herbaria TULV (INCIVA) and CUVC at *Universidad del Valle*, Colombia, collected in the framework of the project aimed at contributing to the conservation of Valle del Cauca dry tropical forests (*OCAD n° 61 del 7/11/2017 bpin_2016000100013 de 7 de noviembre 2017*), was examined. The samples were examined to determine the characteristics of the thallus and ascomata, as well as their reaction to UV light and the type and size of the ascospores, using a stereoscope (YAXUN YXAK21) and a microscope (CARL ZEISS Jena) while ascospores were measured with a micrometer ruler. All samples were photographed with a VIVITAR 100 mm macro lens adjusted to a CANON T3 digital camera. **Van den Broeck, et al.** (2018) was used to key out the species.

Results and discussion

Synarthonia inconspicua (Stirt.) Van den Broeck & Ertz, *S. muriformis* Van den Broeck, Frisch & Ertz, and *S. xanthosarcographoides* Aptroot are recorded here for the first time in Colombia. *S. inconspicua* has a pantropical distribution but *S. muriformis* has only been reported in Madagascar thus far (**Van den Broeck, et al.**, 2018), which means this the first record for the Neotropics. *S. xanthosarcographoides* was recently described in Brazil (**Aptroot & Spielman**, 2020) so this is the second record for the species in the region. In total, four species of the genus are now known in Colombia including *S. robertiana* Soto-M. & Aptroot (**Soto, et al.**, 2021), which has been recently described in the country, although it requires validation because the original diagnosis and description were both in Spanish and they are required in Latin or English by the Code (**Greuter & Rankin-Rodríguez**, 2018). Here the name is validated as follows:

Synarthonia inconspicua (Stirt.) Van den Broeck & Ertz (Figure 1)

Description. Thallus corticolous, crustose, smooth, inconspicuous to whitish. Ascomata solitary, rounded, disc with white pruina. Ascospores septate, macrocephalic, (15–) 16.5–21.3 (–24.5) × (5.3–) 6.2–7.7 (–8.5) μm, hyaline (**Van den Broeck, et al.**, 2018).

Specimen examined. COLOMBIA: Departamento Valle del Cauca, Municipio de Tuluá, bosque seco tropical, La Valenzuela, 4°01.297'N 76°21.930'W, ca 1159 m. 22-08-2020. Soto sn (TULV).

Synarthonia muriformis Van den Broeck, Frisch & Ertz (Figure 1)

Description. Thallus corticolous, crustose, smooth, whitish to greyish green. Ascomata solitary, rounded, with a thick white pruine. Ascospores muriform, (22.0–36.5 × 10.0–14.5 μm, hyaline (**Van den Broeck, et al.**, 2018).

Specimen examined. COLOMBIA: Departamento Valle del Cauca, Municipio de Roldanillo, bosque seco tropical, Higuercito, 4°29'52.2"N 76°06'39.1"W, ca 998 m. 16/11/2020. Soto 117H (TULV).

Synarthonia robertiana Soto-M & Aptroot, sp. nov. MB 842197

Synarthonia robertiana Soto-M. & Aptroot in Soto-Medina, et al., Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(175): 418 (2021); nom. inval. (ICN Art. 39.2).

Diagnosis: A new species presenting ascomata with lichexanthone (UV+ yellow) as in *S. xanthosarcographoides* but with hyaline spores, 3–4 septate, and 28–32 × 9–14 μm in size. For a full description, see **Soto, et al.** (2021: 418).

TYPE: COLOMBIA. VALLE DEL CAUCA: Municipio de Riofrío, Hacienda la Gitana, ca 1150 m, 4,1666 N, 76,336W, sobre corteza en bosque de transición, 27 agosto 2020, E. Soto 158G (holotipo: TULV 19108; isotipo: CUVC).

Synarthonia xanthosarcographoides Aptroot (Figure 2)

Description. Thallus corticolous, crustose, smooth, inconspicuous to whitish. Ascomata solitary, rounded, in branched white stromata. Ascospores 7 × 0–2-septate, 20–22 × 8–9 μm, brown grayish (**Aptroot & Spielman**, 2020). UV+ yellow stromata.

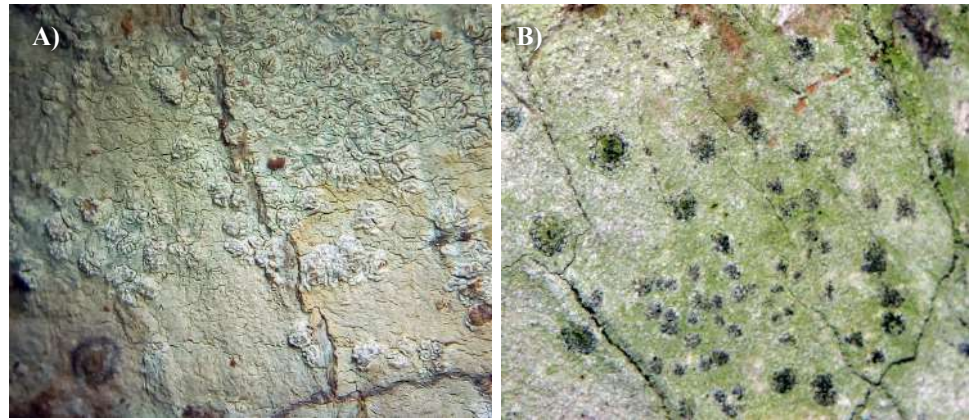


Figure 1. *Synarthonia inconspicua* (A) y *Synarthonia muriformis* (B).

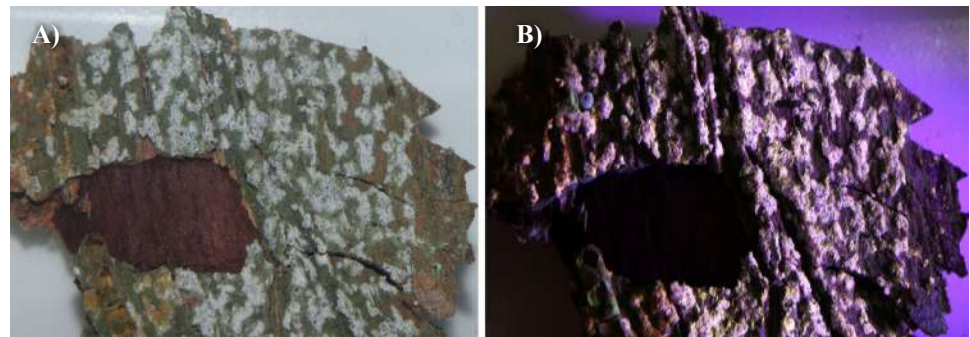


Figure 2. *Synarthonia xanthosarcographoides*, habit (A) and pseudoestroma with UV (B)

Specimen examined. COLOMBIA: Departamento Valle del Cauca, Municipio de Roldanillo, bosque seco tropical, Higueroncito, 4°29'52.2"N 76°06'39.1"W, ca 998 m. 16/11/2020. Soto 104H (TULV).

Key to *Synarthonia* species in Colombia

- 1. *Ascospores muriform* 2
- 1'. *Ascospores septate* 3
- 2. *Pseudostromata UV+ yellow* *Synarthonia xanthosarcographoides*
- 2'. *Pseudostromata UV-* *Synarthonia muriformis*
- 3. *Pseudostromata UV+ yellow* *Synarthonia robertiana*
- 3'. *Pseudostromata UV-* *Synarthonia inconspicua*

Acknowledgments

Thanks go to INCIVA for the support in the realization of the dry forest project.

Conflicts of interest

The author declares no conflicts of interest.

References

Aptroot, A. & Spielmann, A. (2020). New lichen species and records from the Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul, Brazil, the westernmost Atlantic rain forest. *Archive For Lichenology*. 17: 1-26.

-
- Joseph S. & Sinha G.P.** (2015) Contributions to the genus *Synarthonia* (lichenized Ascomycota, Arthoniaceae). *Lichenologist*. **47**: 123-130.
- Lücking, R., Moncada, B., Soto-Medina, E., Simijaca, D., Sipman, H. J.** (2021). Actualización nomenclatural y taxonómica del Catálogo de Líquenes de Colombia. *RACCEFYN*. **45** (174): 147-189.
- Soto-Medina, E. A., Castaño-Naranjo, A., Granobles, J., Aptroot, A.** (2021). Una nueva especie y nuevos registros de líquenes en Colombia y Suramérica en el bosque seco tropical de la cuenca media del río Cauca. *RACCEFYN*. **45** (175): 415-420.
- Van den Broeck, D., Frisch, A., Razafindrahaja, T., Van de Vijver, B., Ertz, D.** (2018). Phylogenetic position of *Synarthonia* (lichenized Ascomycota, Arthoniaceae), with the description of six new species. *Plant Ecology and Evolution*. **151**: 327-351.
- Werner Greuter & Rosa Rankin Rodríguez, trad.** (2018). Código Internacional de Nomenclatura para algas, hongos y plantas. 378 pp. Edición en español a cargo de Stiftung Herbarium Greuter (Fundación Herbario Greuter), Berlín, Alemania.

Artículo original

Evaluación fitosanitaria de *Juglans neotropica* y *Quercus humboldtii* en arbolado urbano de Popayán-Cauca, Colombia

Phytosanitary evaluation of *Juglans neotropica* and *Quercus humboldtii* in an urban woodland of Popayán-Cauca, Colombia

Clara Inés Giraldo-Aristizábal*, Yamid Arley Mera-Velasco,
Sandra Carlina Rivas-Zúñiga, Darly Gabriela Muñoz-Lara, Lina María Acosta-Hilamo,
Nathaly Pérez-Muñoz, Juan C. Villalba-Malaver, Alex Enrique Ordóñez-Hoyos

Departamento de Biología, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Resumen

Quercus humboldtii y *Juglans neotropica* son especies nativas de Colombia de gran importancia cultural y económica que se encuentran en los bosques urbanos de la ciudad de Popayán y están expuestos a plagas y enfermedades que afectan su salud. El presente estudio tuvo como objetivo conocer el estado fitosanitario de 73 individuos de *Q. humboldtii* y *J. neotropica* ubicados en el campus de la Universidad del Cauca en las épocas secas y de lluvia. Para ello se aplicó la metodología basada en el sistema de evaluación de seis clases de **Hawksworth** (1977). Se registraron 21 síntomas en total y los de mayor incidencia y gravedad fueron *Colletotrichum* sp en *Q. humboldtii* y *Fusarium* sp y *Alternaria* sp en *J. neotropica*. En cuanto a insectos, se reconocieron nueve órdenes, siendo los de mayor frecuencia Collembola: Poduromorpha, Diptera y Coleoptera, con 29,43, 26,68 y 22,44 %, respectivamente, y en menor proporción Lepidoptera, Ephemeroptera, Dictyoptera (Blattodea) y Tysanoptera con 4,49, 0,25, 0,62 y 0,50 %, respectivamente. Estadísticamente no hubo diferencias entre la época y los síntomas asociados; sin embargo, hubo efectos significativos de la distancia entre los árboles y las vías en cuanto a los agentes fitosanitarios presentes. Aunque en ningún caso la gravedad de las enfermedades implicó daños que amenacen a corto plazo la supervivencia de los árboles, es necesario garantizar su salud implementando tratamientos preventivos y de control como la fertilización, las podas y el manejo fitosanitario.

Palabras clave: Enfermedades de los árboles; Espacio urbano; Hongos fitopatógenos; Insectos que afectan árboles; Silvicultura urbana.

Abstract

Quercus humboldtii and *Juglans neotropica* are species native to Colombia present in the urban forests of the city of Popayán; they are of great cultural and economic importance, but they are exposed to pests and diseases which affect their health. The present study aimed to know the phytosanitary status of 73 individuals of *Q. humboldtii* and *J. neotropica* located on the University of Cauca's campus both during dry and rainy seasons. To this end, we used the method based on the six-class evaluation system of **Hawksworth** (1977) and we recorded 21 symptoms of which *Colletotrichum* sp. in *Q. humboldtii* and *Fusarium* sp. and *Alternaria* sp. in *J. neotropica* had the highest incidence and severity. Nine orders of insects were identified, the most frequent being Collembola: Poduromorpha, Diptera, and Coleoptera with 29.43%, 26.68%, and 22.44%, respectively, and to a lesser extent Lepidoptera, Ephemeroptera, Dictyoptera (Blattodea), and Tysanoptera with 4.49%, 0.25%, 0.62%, and 0.50%, respectively. Statistically, there were no differences between time and associated symptoms; nevertheless, there were significant effects of the distance between the trees and the roads regarding the phytosanitary agents present. Although there were no cases of severe diseases posing a level of damage that may threaten the survival of the trees in the short term, it is necessary to ensure their health in the future by implementing preventive and control treatments such as fertilization, pruning, and phytosanitary management.

Keywords: Phytopathogenic fungi; Insects that trees; Tree diseases; Urban forestry; Urban space.

Citación: Giraldo-Aristizábal CI, Mera-Velasco YA, Rivas-Zúñiga SC, et al. Evaluación fitosanitaria de *Juglans neotropica* y *Quercus humboldtii* en arbolado urbano de Popayán-Cauca, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):169-181, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefn.1542>

Editor: Carolina Romero

***Correspondencia:**

Clara Inés Giraldo-Aristizábal;
cigiraldo@unicauca.edu.co

Recibido: 20 de agosto de 2021

Aceptado: 9 de febrero de 2022

Publicado: 23 de marzo de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Los bosques urbanos y periurbanos abarcan todas las especies forestales que se encuentran dentro de las ciudades y sus alrededores (Dobbs, *et al.*, 2018). Su importancia cultural y económica se asocia con los diferentes usos, desde el embellecimiento de zonas verdes y revegetalización de ecosistemas hasta los servicios ecosistémicos que brinda, como filtrar el aire (Arroyave-Maya, *et al.*, 2019), preservar reservorios genéticos, generar sombra y evapotranspiración, reducir el volumen de agua de escorrentía, conservar la biodiversidad y ofrecer frutas y plantas medicinales, lo que genera un sentido de pertenencia por parte de la comunidad que se traduce a su vez en salud mental para los ciudadanos (Dobbs, *et al.*, 2018).

Sin embargo, pese a su importancia para las ciudades, las especies pueden sufrir deterioro progresivo y morir por causas como el estrés hídrico y térmico, la contaminación atmosférica, la urbanización, y las plagas y enfermedades, lo que disminuye sus aportes en los entornos urbanos (Restrepo, *et al.*, 2015). En Popayán se hizo un censo parcial del arbolado urbano y se evaluó su estado fitosanitario; se encontró que un 55,64 % de los árboles estaba afectado y el otro 41,04 %, sano (Alcaldía Municipal de Popayán y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, 2018). Por otra parte, Caicedo & Tobar (2013) y Azcárate & Díaz (2016) evidenciaron afectaciones fitosanitarias en las especies forestales del campus de la Universidad del Cauca.

Dos especies nativas presentes en los bosques urbanos de Popayán son el cedro negro (*Juglans neotropica* Diels 1906) y el roble blanco (*Quercus humboldtii* Bonpl. 1805), de las familias Juglandaceae y Fagaceae, respectivamente (Feuillet-Hurtado, *et al.*, 2011; Potosí-Gutiérrez, *et al.*, 2017), oriundas de los Andes y distribuidas en Colombia entre los 1.600 y los 3.100 m s.n.m. (Bernal, *et al.*, 2020) y los 750 y los 3.450 m s.n.m., respectivamente (Rangel, 2017; Bernal, *et al.*, 2020; Villalba, *et al.*, 2021; GBIF Secretariat, 2021). Estas especies se destacan a nivel cultural y biológico en la región por ser maderables (Cárdenas, *et al.*, 2007; Vargas, *et al.*, 2012; Rangel, 2017). Sin embargo, se encuentran categorizadas a nivel nacional como en peligro crítico (*J. neotropica*) y vulnerables (*Q. humboldtii*), es decir, en riesgo inminente (Gallagher, 2018; Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020; GBIF Secretariat, 2021).

Asimismo, a nivel departamental se sabe que los remanentes de roble están reducidos a pequeños fragmentos dispersos localizados a lo largo de los taludes de ríos en áreas de fuertes pendientes que se cree alcanzan un total de 748 ha (Paz & Ospina, 2012), en tanto que no hay datos y estudios conocidos sobre el cedro negro.

En ese contexto, es necesario contribuir al conocimiento de las especies, a su conservación y su manejo en entornos urbanos, por lo que el objetivo del presente estudio fue conocer el estado fitosanitario de *Q. humboldtii* y *J. neotropica* en un espacio urbano del municipio de Popayán para aportar al diagnóstico y manejo sanitario del arbolado.

Materiales y métodos

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en la zona urbana de Popayán, en áreas del Campus de la Universidad del Cauca (2°27' N y 76°37' W) (Figura 1). Esta zona está ubicada entre las cordilleras Occidental y Central, al occidente del país, con una altura promedio de 1.760 m s.n.m. y temperatura media de 18 °C, que alcanza las máximas en julio, agosto y septiembre.

Diagnóstico fitosanitario

Se hizo el censo y la georreferenciación de 73 individuos de las especies de interés utilizando navegadores GPS y recolectores de datos SIG localizados geográfica y espacialmente utilizando la plataforma de Google Earth. Estos se cargaron con la herramienta Mapping Application de ArcGis Online (Casanova, 2021) (Figura 1). Además, se determinó la distancia en metros entre cada árbol y entre estos y los edificios y vías cercanas. Los datos se convirtieron en coordenadas planas y se exportaron al programa QGis 3.20 (Quantum GIS Development Team, 2021).

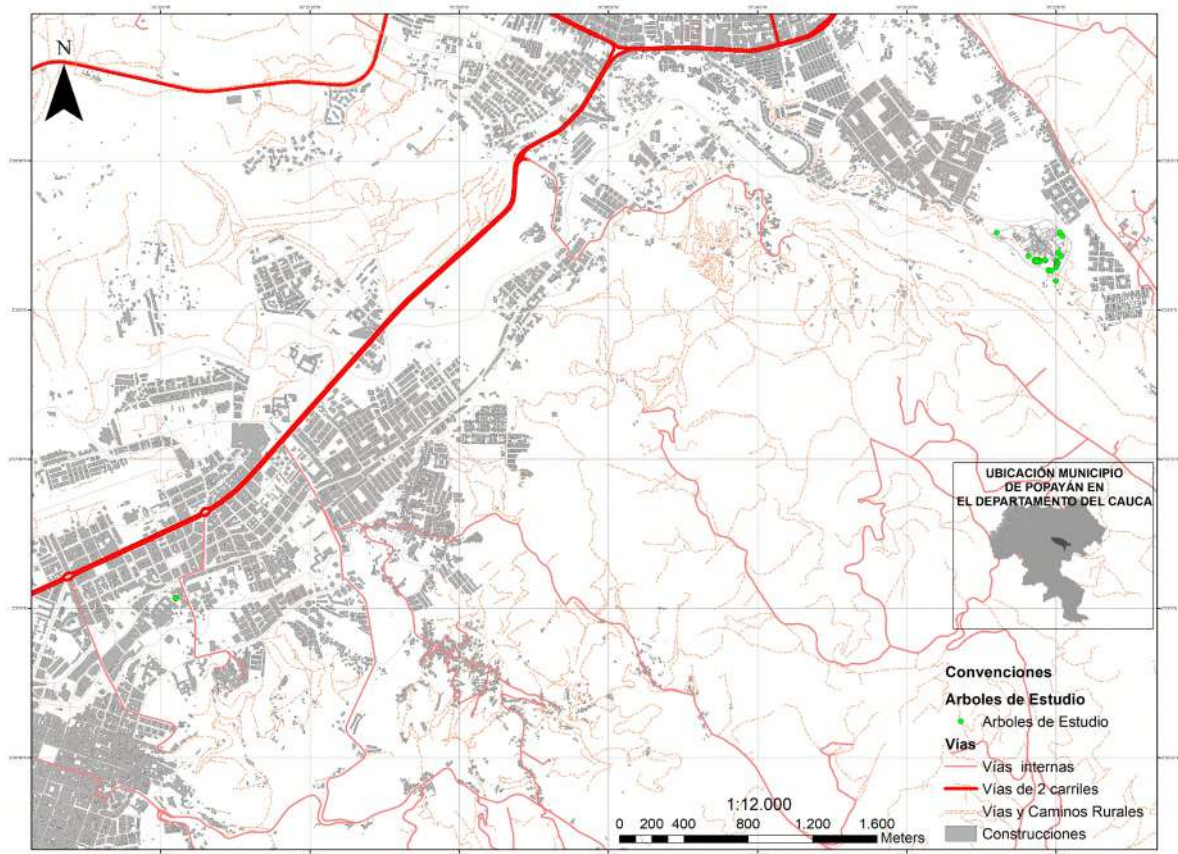


Figura 1. Puntos de registro de las especies en estudio y zona urbana del municipio de Popayán-Cauca. Modificado del **Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC** (2020).

A continuación, con cinta diamétrica se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) de cada uno de los árboles y se seleccionaron los que presentaron un DAP mayor a 10 cm. Se hizo una inspección mediante examen visual para detectar síntomas en el tallo y el dosel usando como referencia guías ilustradas y claves de síntomas generales para enfermedades en plantas (Agrios, 2005; Trigiano, 2007; Aprea & Murace, 2019).

Para calificar el nivel de enfermedad o los daños en los árboles afectados por uno o varios síntomas, se aplicó una metodología basada en el sistema de evaluación de seis clases de Hawksworth (1977): se dividió el dosel en tres estratos y se evaluó cada uno por separado asignándoles un valor de cero, uno o dos de la siguiente manera (Figura 2): cero, cuando el árbol no presentaba ningún síntoma; uno, cuando la mitad o menos del total de las ramas se encontraban afectadas por el síntoma, y dos, cuando más de la mitad del total de las ramas presentaba el síntoma.

El grado de infección de cada árbol se obtuvo sumando los valores de los tres estratos del dosel. Los valores iguales a uno, dos o tres indicaban un impacto reducido o nulo de los agentes fitosanitarios sobre el crecimiento de los árboles, y aquellos iguales a cuatro, cinco y seis, una disminución del crecimiento y el vigor con mucho riesgo para el árbol (Hawksworth, 1977). Con los datos obtenidos se calculó la incidencia y la gravedad de cada síntoma fitosanitario evaluado. La incidencia se definió como el porcentaje de plantas enfermas de un total de plantas evaluadas y la gravedad como el área (relativa o absoluta) de la unidad de muestreo (hoja, rama, fruto, etc.) que mostraba síntomas de la enfermedad (Bock, *et al.*, 2010). Se hicieron dos diagnósticos fitosanitarios, uno en época de lluvia (diciembre 2019) y otro en época seca (agosto 2018).

Instrucciones	Ejemplo
Paso 1 Dividir el dosel en tres tercios	Asignar un valor igual a cero (0), si el tercio no presenta síntomas visibles.
Paso 2 Evaluar cada tercio por separado, asignando un valor (cero, uno, dos) de la siguiente manera: (0) No presenta síntomas visibles (1) La mitad o menos del total de las ramas se encuentran afectadas por el síntoma. (2) Más de la mitad del total de las ramas presentan el síntoma.	Asignar un valor igual a uno (1), si el tercio está levemente afectado Asignar un valor igual a dos (2), si el tercio está muy afectado
Paso 3 Sumar los valores de los tercios para obtener el valor total del árbol.	En este ejemplo el árbol alcanzó un grado: $0 + 1 + 2 = 3$



Figura 2. Sistema de evaluación de seis clases (modificado de **Hawksworth**, 1977).

Aislamiento e identificación de agentes fitosanitarios

El aislamiento de hongos fitopatógenos se hizo para los 14 árboles (19,18 % de la población evaluada) con mayores niveles de incidencia y gravedad. Se recolectaron muestras de órganos que presentaban síntomas y se depositaron individualmente en bolsas plásticas rotuladas que fueron transportadas a la Unidad de Microscopía Electrónica de la Universidad del Cauca, donde fueron cultivadas con el método de siembra directa (**Rivas-Zúñiga & Giraldo-Aristizábal**, 2021). Una vez obtenidos los cultivos puros se hizo la identificación taxonómica a nivel de género aplicando la clave de **Gepp** (2009) y se obtuvieron fotomicrografías usando un microscopio Nikon Eclipse 80i.

El material entomológico se recolectó con trampas de caída (*pitfall*) arbóreas ubicadas a 1 m del suelo, red de golpeo, vareo o batido de follaje y escrutinio visual para luego trasladarlo al Laboratorio de Morfología y Fisiología de la Universidad del Cauca donde se hizo la identificación con ayuda de las claves taxonómicas de **Triplehorn, et al.** (2005) y **Rafael, et al.**, 2012, y las fuentes electrónicas de **Miller, et al.** (2014) y el **Invasive Species Specialist Group** (2011). Los ejemplares recolectados se depositaron en la colección del Museo de Historia Natural de la Universidad del Cauca (MHNUC).

Análisis de datos

Primero, se hizo un análisis descriptivo (histogramas) de las abundancias relativas de los hongos y los principales grupos de insectos presentes en la totalidad de muestras, así como su caracterización y registro de los posibles problemas fitosanitarios ocasionados por ellos. Después, se hizo un análisis de varianza multivariado con permutaciones (PERMANOVA) y un escalonamiento multidimensional no métrico (NMDS) para evaluar posibles diferencias entre los síntomas y las diferentes épocas de recolección (seca y lluviosa). Para evaluar el efecto de las distancias de los árboles (*Q. humboltii* y *J. neotropica*) a los edificios y vías más próximas, se utilizó un modelo de análisis de regresión múltiple (MRLM) para ver su efecto. El procesamiento estadístico se hizo en el *software* de programación para el análisis de datos y gráficos de libre distribución R, versión 4.0.3 (**R CORE TEAM**, 2020).

Resultados

La evaluación fitosanitaria en *J. neotropica* se llevó a cabo en 13 árboles durante la época seca y se encontraron siete síntomas, de los cuales el cribado, las manchas necróticas y el amarillamiento de las hojas tuvieron una incidencia de > 40 % (Figura 3a). En época de lluvias se registraron 12 síntomas, de los cuales el cribado, las manchas necróticas, los puntos necróticos y la necrosis apical tuvieron una incidencia de > 40 % (Figura 3a).

En la época seca se observó un número equivalente de árboles con síntomas de gravedad catalogados de uno a seis para las manchas necróticas y el amarillamiento, en tanto que el cribado en cerca del 50 % de los árboles tuvo un grado tres de gravedad. En la época lluviosa se observó una disminución del amarillamiento, pero aumentó la necrosis apical en 62 % de los árboles, con puntajes de gravedad entre cuatro y seis. Asimismo, aparecieron puntos necróticos en el 50 % de los árboles con puntajes de gravedad de uno a tres, en tanto que el cribado disminuyó en oposición a la ocurrido en la época seca (Figura 3a).

Asimismo, se hizo la evaluación fitosanitaria de 60 árboles de *Q. humboldtii* durante la época seca y se registraron 17 síntomas, de los cuales el cribado, las manchas necróticas, el amarillamiento, los puntos necróticos, la clorosis, el tizón y la necrosis apical tuvieron una incidencia de > 40 % (Figura 3b). En época de lluvia se registraron 14 síntomas, de los cuales el cribado, las manchas necróticas, la clorosis, el tizón, la necrosis apical y las pústulas tuvieron una incidencia de > 40 % (Figura 3b). En las dos épocas la incidencia fue alta pero la gravedad de los síntomas no lo fue, ya que la mayoría de los árboles se encontraba en los grados uno, dos o tres, lo que indica poco o nulo impacto sobre su crecimiento, aunque el cribado fue de grados tres y cuatro en la mayoría de los casos.

A partir de los síntomas seleccionados por su mayor incidencia y gravedad, se obtuvieron aislamientos fúngicos identificados a nivel de género. En *J. neotropica* se evidenciaron puntos necróticos, puntos con tonalidad oscura, borde irregular y halo clorótico (Figura 4a y 4b), y se aisló *Fusarium* sp., cuyas colonias presentaron un color rojo-marrón con topografía lisa y textura algodonosa, hifas septadas, conidióforos simples y conidias alargadas con forma de hoz y septos transversales (Figura 4c y 4d). Además, se observaron síntomas como puntos necróticos y puntos bien definidos (redondeados), con el centro de color blanco y más pequeños que los observados en el caso anterior (Figura 4e y 4f), y

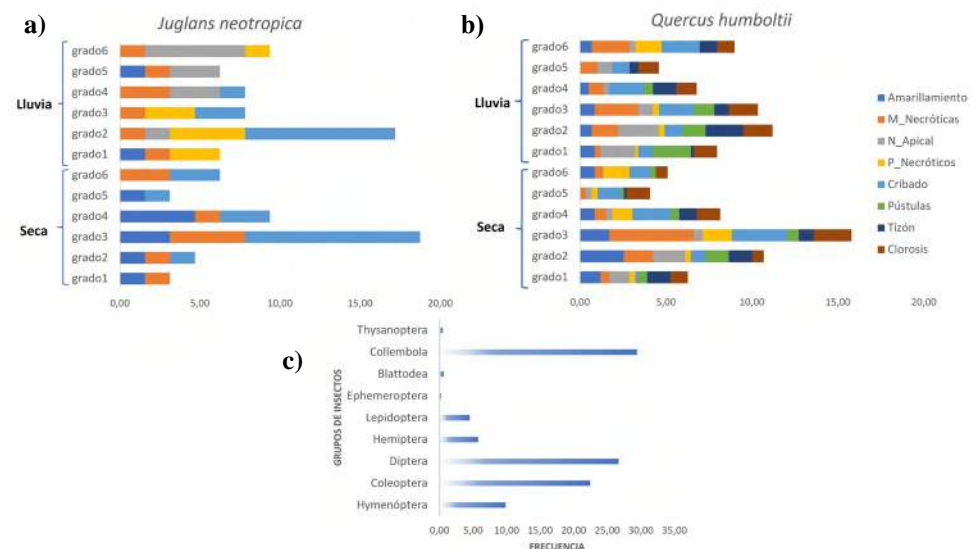


Figura 3. a) Incidencia y gravedad de las enfermedades por hongos asociados a *Juglans neotropica*. b) Incidencia y gravedad de enfermedades por hongos asociados a *Quercus humboldtii*. c) Frecuencia de presencia de grupos de insectos en las especies de estudio

se aisló *Alternaria* sp., especie que presentó colonias de color marrón, topografía lisa y textura algodonosa, hifas septadas, conidióforos simples y conidias con forma de granada y septos transversales y longitudinales (**Figura 4g y 4h**).

En *Q. humboldti* se observó necrosis apical y porciones de tejido necrótico en el ápice de la hoja con forma semejante a un triángulo o rombo (**Figura 4i y 4j**). Se aisló e identificó el hongo *Colletotrichum* sp., el cual presentó colonias de color naranja con topografía lisa y textura algodonosa, hifas septadas, conidióforos simples y conidias unicelulares (**Figura 4k y 4l**).

En cuanto a los insectos, se reconocieron nueve órdenes (**Figura 3c**), siendo los órdenes más frecuentes Collembola: Poduromorpha, Diptera y Coleoptera, con 29,43, 26,68 y 22,44 %, y en menor proporción Lepidoptera, Ephemeroptera, Dictyoptera (Blattodea) y Tysanoptera, con 4,49, 0,25, 0,62 y 0,50 %, respectivamente (**Figura 5**). Entre los registros obtenidos se destacan los órdenes Coleoptera y Hemiptera (Heteroptera, Auchenorrhyncha y Sternorrhyncha) por presentar daños o deterioro de estructuras de la planta en hojas, frutos o tallos (cribado). En este último orden, con el 5,74 % de registros, se destacó la presencia de las familias Membracidae (Hemiptera: Auchenorrhyncha) y Coreidae (Hemiptera: Heteroptera), de los géneros *Leptoglossus* (**Figura 5b**) sp. y *Umbonia* sp. (**Figura 5c**), los

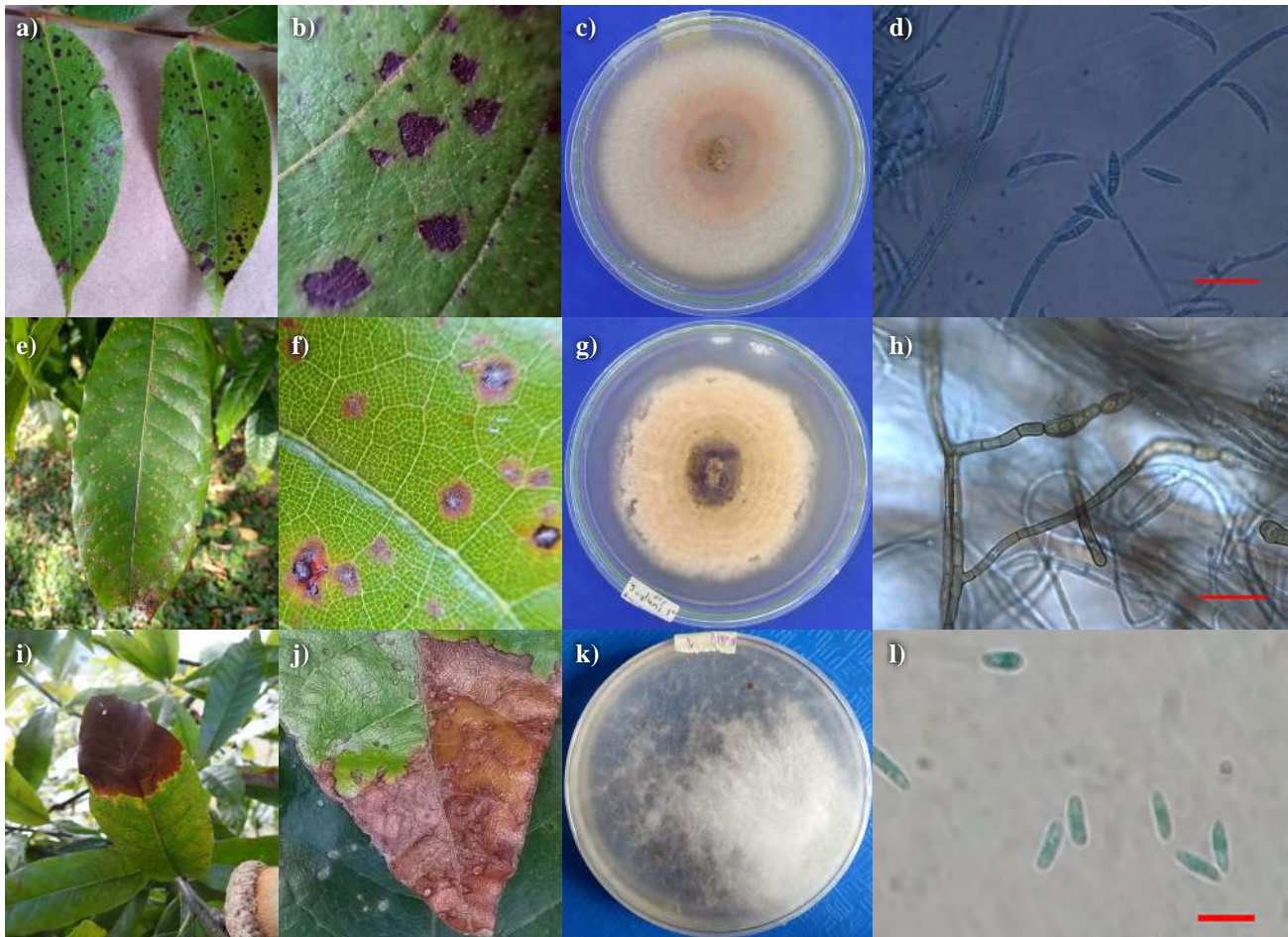


Figura 4. Síntomas y agentes causales de enfermedades en las especies de estudio. **a, b)** Puntos necróticos con halo clorótico por *Fusarium* sp. en *J. neotropica*. **c)** Cultivo en PDA de *Fusarium* sp. **d)** Conidias de *Fusarium* sp., tinción con azul de lactofenol, escala: 20 μ m. **e, f)** Puntos necróticos con centro blanco por *Alternaria* sp. en *J. neotropica*. **g)** Cultivo en PDA de *Alternaria* sp. **h)** Conidias de *Alternaria* sp., tinción con azul de lactofenol, escala: 20 μ m. **i, j)** Necrosis apical por *Colletotrichum* sp. en *Q. humboldti*. **k)** Cultivo en PDA de *Colletotrichum* sp. **l)** Conidias de *Colletotrichum* sp., tinción con azul de lactofenol, escala: 20 μ m

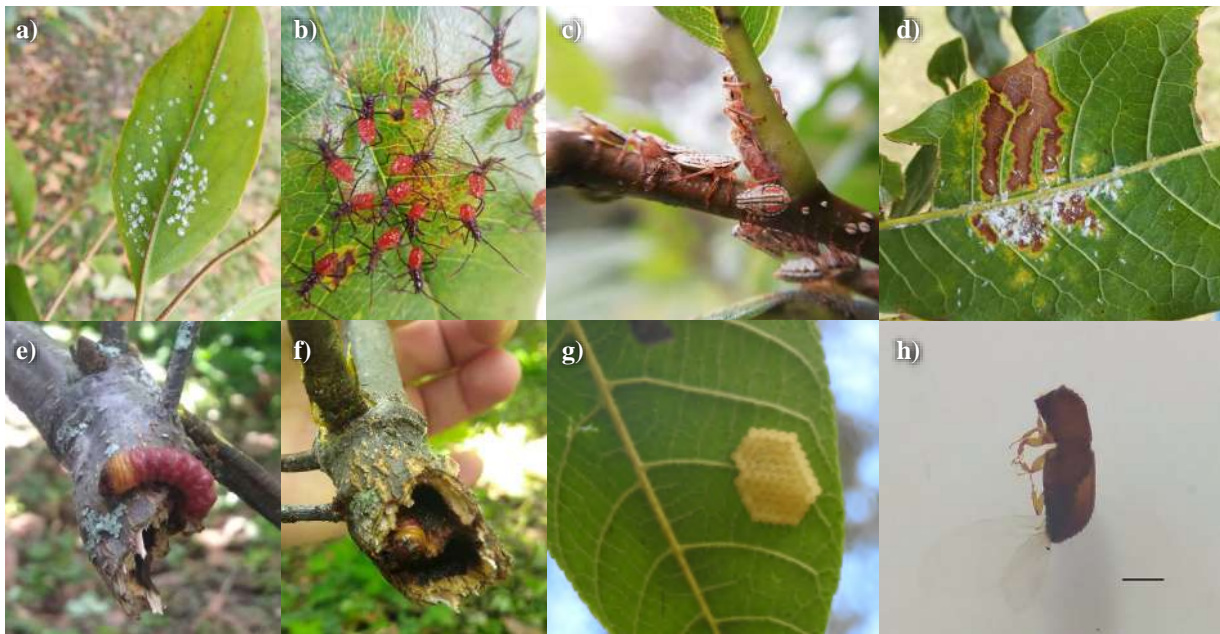


Figura 5. Insectos encontrados en las especies estudiadas: **a, d)** *Aleroydae* spp. (Hemiptera: Sternorrhyncha) en *J. neotropica* y en *Q. humboldtii*; **b)** *Leptoglossus* sp. (Heteroptera: Coreidae) en *Q. humboldtii*; **c)** *Umbonia* sp. (Heteroptera: Auchenorrhyncha) en *Q. humboldtii*; **e, f)** Larva de Cerambycidae en *Q. humboldtii*; **g)** huevos de Lepidoptera en *J. neotropica*; **h)** *Xyleborus* sp. (Coleoptera: Scolytidae) en *Q. humboldtii*.). Escala: 1 mm

cuales causan daño debido a su hábito fitófago de consumir savia y localizarse en las partes jóvenes o de crecimiento en la planta. Se reportó, asimismo, la presencia de individuos de la familia *Aleyrodidae* spp. (Hemiptera: Sternorrhyncha) (**Figura 5a** y **5d**) causantes de amarillamientos aislados en hojas.

Se registró la presencia de una larva y un adulto de la familia Cerambycidae, orden Coleoptera, causando daño y deterioro evidentes en una rama de *Q. humboldtii* (**Figura 5e** y **5f**). También se capturaron en trampas de caída especímenes del género *Xyleborus* sp. (Scolytinae), comúnmente denominados escarabajos ambrosiales (**Figura 5h**), los cuales se caracterizan por su relación simbiótica y nutricional obligada con diversas especies de hongos que cultivan en las paredes de las galerías en el xilema del árbol hospedero (**Hughes, et al., 2015; Ángel-Restrepo, et al., 2019**).

El análisis de los datos mediante un modelo PERMANOVA y la interpretación gráfica de NMDS no arrojó diferencias significativas entre las épocas seca y lluviosa para la variable de síntoma ($p > 0,05$) (**Figura 6a**).

Se evaluó igualmente el efecto de la distancia de los árboles (*Q. humboldtii* y *J. neotropica*) a los edificios y las vías más próximas (**Figura 6b**) en la presencia de síntomas y la diversidad de insectos utilizando un modelo de regresión lineal múltiple (MRLM) (**Anexo 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1542/3198>). Después de revisar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (**Anexo S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1542/3198>), se encontraron diferencias significativas, con $p < 0,05$ y $R^2 = 0,45$, lo que evidenció una relación entre la distancia de los árboles y la frecuencia de aparición de hongos e insectos (**Anexo 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1542/3198>). Es decir, a medida que aumentó la distancia en metros entre las vías y los árboles, la incidencia de hongos disminuyó en un 0,53 % y aumentó la abundancia de insectos asociados a los árboles en un 0,73 %. Sin embargo, no se encontró relación entre la distancia de los árboles a los edificios y la sintomatología asociada a la presencia de hongos e insectos.

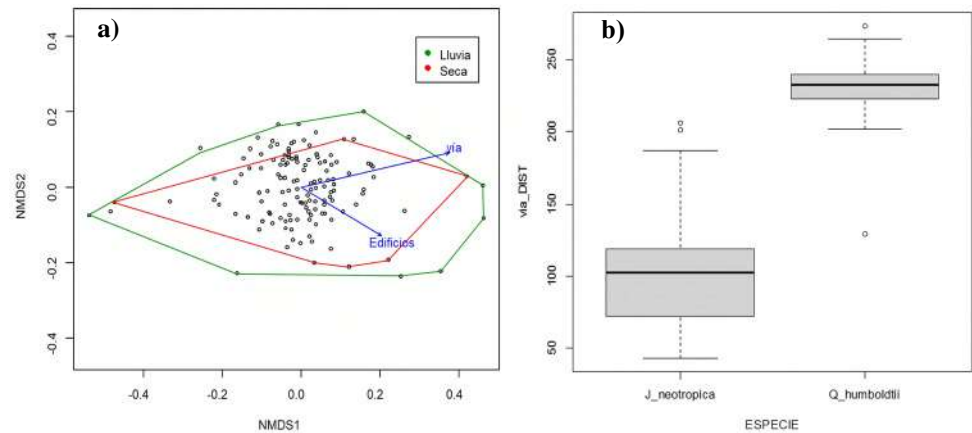


Figura 6. a) Ordenación NMDS (estrés=0,178). La gráfica muestra la congruencia entre los árboles de estudio, los daños ocasionados y la distancia de cada uno en relación con las vías y edificios principales. La delimitación de polígonos indica las épocas de muestreo y su relación con la incidencia de hongos entomopatógenos en los árboles de estudio. **b)** Diagrama de cajas y diferencias en la distancia entre árboles *Q. humboldtii*, *J. neotropica* y las vías principales

Discusión

Las enfermedades constituyen uno de los factores principales que determinan la dinámica de los ecosistemas forestales junto con las plagas, el fuego y las condiciones climáticas (Pildain & De Errasti, 2011). En este sentido, los hongos son los principales agentes causantes de enfermedades forestales, ya que atacan diferentes partes de los árboles (Boa, 2008; Pildain & De Errasti, 2011) y pueden causar problemas leves, que solo tienen implicaciones estéticas, o graves, como la reducción de la tasa fotosintética por defoliación, el debilitamiento del transporte vascular por presencia de chancros en el tronco y la disminución de la absorción de agua y minerales por pudrición de la raíz que pueden llevar a la muerte del árbol (Pildain & De Errasti, 2011).

En este estudio, las especies evaluadas *Q. humboldtii* (roble) y *J. neotropica* (cedro) presentaron síntomas leves a moderados principalmente en las hojas: manchas necróticas, puntos necróticos, necrosis apical, pústulas, tizón, amarillamiento y clorosis. Según Boa (2008) y Singh, *et al.* (2017), estos síntomas son causados principalmente por hongos. Sin embargo, en algunos casos pueden ser ocasionados por bacterias, virus o factores abióticos.

Los hongos aislados de los géneros *Colletotrichum*, *Fusarium* y *Alternaria*, se encuentran entre los patógenos vegetales más frecuentes tanto en especies forestales como agrícolas y ornamentales (Cannon, *et al.*, 2012; Summerell, 2019; Dalinova *et al.*, 2020). Este hallazgo coincide con otros estudios en Colombia, como el de Monroy-Castro & Lizarazo-Forero (2010), quienes identificaron los hongos *Fusarium* spp. y *Alternaria* spp. en robles en los departamentos de Boyacá y Santander, pero a diferencia de nuestro estudio, en bosques naturales; no se determinó la incidencia ni la gravedad de las enfermedades.

Por otro lado, otro de los tensores bióticos evaluados fueron los insectos, que ocasionaron daños no significativos. Sin embargo, la presencia de insectos fitófagos, xilófagos y defoliadores como *Aleyrodidae* spp., *Leptoglossus* sp., *Umbonia* sp., larvas de *Cerambycidae*, *Xyleborus* sp. y especies como *Atta cephalotes*, que se registraron alimentándose parcialmente de estos árboles, alertan sobre potenciales daños (Vasconcelos, *et al.*, 2006; Sermeño-Chicas & Pérez, 2015; Amaya-Hernández, *et al.*, 2019). Se resalta el caso de *Xyleborus* sp. debido al posible establecimiento simbiótico y nutricional obligado con diversas especies de hongos que cultivan en las paredes de galerías en el xilema del árbol hospedero, como lo evidenciaron Hughes, *et al.* (2015) y Ángel-Restrepo, *et al.* (2019), quienes destacan, además, la importancia de este insecto por su asociación con especies

forestales y agrícolas en procesos de descomposición de árboles muertos o enfermos (Steininger, *et al.*, 2015; Hulcr, *et al.*, 2017). Según Burgos-Solorio (2007), estos insectos se cuentan entre los primeros organismos en colonizar plantas cuando hay estrés por algún tensor ambiental y pueden desencadenar la muerte del individuo.

En cuanto a la influencia del patrón climático en la incidencia y gravedad de las enfermedades de los árboles, tampoco se encontraron diferencias significativas, probablemente porque los valores de humedad relativa y temperatura no variaron ampliamente (91,6 % y 25,7 °C en época seca y 94,6 % y 25,2 °C en época lluviosa). Sin embargo, se registró una diferencia en la precipitación entre las épocas de estudio seca y lluviosa, con 11,2 y 48,8 mm, respectivamente, lo cual se encuentra en consonancia con lo hallado por Talley, *et al.* (2002), quienes señalan tres características como parámetros medioambientales críticos en el desarrollo de enfermedades en el crecimiento de los patógenos, la esporulación y la germinación de esporas: una humedad relativa por encima de 50 %, una temperatura entre 20 y 30 °C y la presencia prolongada de agua superficial en los tejidos vegetales.

Por último, podemos decir que en la actualidad se reporta que la susceptibilidad de los árboles frente a agentes patógenos aumenta cuando se encuentran en espacios urbanos, ya que afrontan el estrés ocasionado por tensores físicos, bióticos y antrópicos que pueden condicionar el debilitamiento de los árboles y la predisposición al ataque por hongos e insectos dañinos, como lo reportan Moreno & Hoyos (2015) y Wilkaniec, *et al.* (2021), y llevar a un deterioro de la calidad de vida de los árboles e, indirectamente, de las personas que habitan estos lugares (Dobbs, *et al.*, 2018). Por ejemplo, Moreno & Hoyos (2015) reportaron 34 tensores en su guía para el manejo del arbolado urbano del Valle de Aburrá en Colombia. Asimismo, en un informe previo sobre el censo arbóreo urbano en espacio público de la comuna 4 del municipio de Popayán – fase 1 (Alcaldía Municipal de Popayán & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, 2018), se estableció que el 55,64 % de los árboles presentaba algún grado de afectación y que el 31,73 % se veía afectado por hongos e insectos. Estos hallazgos coinciden con lo reportado en este estudio en cuanto a la relación inversa entre la presencia de hongos y la distancia de los árboles a la vía principal, ya que la cercanía a las vías genera otro tensor: la contaminación del aire (Gaitán, *et al.*, 2007), lo cual remite a lo hallado por Castillo-Rivera & Sinisterra-Rodríguez (2019) en la zona urbana de Popayán, donde ha aumentado el consumo de combustibles del sector de transportes de 73.889 a 104.642 toneladas de diésel y de 71.280 a 86.154 toneladas de gasolina entre el 2012 y el 2015.

En la actualidad en Popayán no existen planes de manejo de los árboles urbanos que garanticen su salud en el largo plazo, tan solo hay informes de diagnóstico (Alcaldía Municipal de Popayán y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, 2018; Jurado, 2021). Los planes de manejo contienen, entre otros temas, lineamientos técnicos con altos estándares para las intervenciones silviculturales orientadas a disminuir el efecto de los factores de tensión en el arbolado urbano y minimizar el estrés en los individuos, buscando la generación de servicios ecosistémicos (Dobbs, *et al.*, 2018; Arroyave-Maya, *et al.*, 2019). Deben garantizarse altos estándares en las intervenciones, pues las podas excesivas o la reducción drástica de las copas pueden resultar inapropiadas y generar el efecto contrario, es decir, tensores en los árboles (Law, *et al.*, 2021). Cabe anotar que en el presente estudio se observaron podas antitécnicas en el trabajo de campo.

Conclusiones

Aunque en ningún caso la gravedad de las enfermedades produjo daños que amenazaran a corto plazo la supervivencia de los árboles, los resultados obtenidos evidencian que los organismos de estudio (hongos e insectos) tienen el potencial de generar afectaciones graves en condiciones de estrés en el arbolado como la proximidad a las vías de mayor flujo vehicular. Esta situación plantea nuevas preguntas cuya respuesta podría ampliar los resultados obtenidos en la presente investigación.

Los resultados de nuestro diagnóstico apuntan a la necesidad de estructurar planes de manejo con altos estándares técnicos que garanticen prácticas silviculturales de prevención tendientes a disminuir el estrés, todo ello teniendo en cuenta el crecimiento urbano que se está presentando en Popayán, lo que aumenta el efecto de los tensores que afectan la salud de los bosques urbanos.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Cauca (501100005682), por la financiación del proyecto “Evaluación fitosanitaria y potencial agroindustrial en dos especies del arbolado urbano de la Universidad del Cauca” (ID 4764), y a los estudiantes Andrés De la Cruz, Ángela Imbachí, Edna Ceballos, Jhon Casanova, Egnna Ñañez, Verónica Solarte, Robinson Medina y Sebastián Valencia de los Semilleros de Investigación Bosques y Silvicultura, Microbiología y Microscopía (SIMICRO) y Diversidad Funcional y Servicios Ecosistémicos de la Universidad del Cauca.

Información suplementaria

Anexo 1S. Gráficas de cumplimiento de normalidad y homocedasticidad de supuestos estadísticos en los residuos de datos de estudio. a) Gráfica de residuos y su aproximación a la distribución normal y b) gráfica de distribución de residuos. Ver anexo 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1542/3198>

Anexo 2S. Matriz de correlación de salida del modelo de regresión lineal múltiple (MRLM). Ver anexo 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1542/3198>

Contribución de los autores

CIG, YM, SRZ, JCVM, AEOH: concibieron y diseñaron el estudio de campo; CIG, YM, SRZ, DGML, LMAH, NPM: recolectaron los datos e identificaron los especímenes; CIG, YM: reunieron, concibieron y analizaron los datos; CIG, YM, SRZ, JCVM, AEOH: escribieron el primer borrador y contribuyeron significativamente a las ideas y las revisiones del manuscrito. Todos los autores aceptaron la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Agrios, G.N. (2005). Plant pathology (5th ed). San Diego, California, Elsevier Academic Press.
- Alcaldía Municipal de Popayán & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán. (2018). Censo arbóreo urbano en espacio público de uso público sobre la comuna 4 del municipio de Popayán-fase 1. Convenio Interadministrativo No. 20171800011937. 269 pp.
- Amaya-Hernández, L.M., Mera-Velasco, Y.A., Gallego-Roper, M.C., Montoya-Lerma, J., Armbrrecht, I. (2019). Herbivoría de *Atta cephalotes* (Hymenoptera: Formicidae) en parches de bosque seco tropical del suroccidente colombiano. Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. **23** (2): 171-189. <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.2.9>
- Ángel-Restrepo, M., Ochoa-Ascencio, S., Fernández-Pavía, S., Marrufo-Vásquez, G., Equihua-Martínez, A., Barrientos-Priego, A., Correa-Suárez, M., Saucedo-Carabez, J. (2019). Identificación de escarabajos ambrosiales (Coleópteros: Curculionidae) asociados a árboles de aguacate en Michoacán, México. Folia Entomológica Mexicana. **5** (2): 80-88.
- Apra, A.M. & Murace, M.A. (2019). Problemáticas sanitarias del arbolado. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <https://doi.org/10.35537/10915/82977>
- Arroyave-Maya, M. del P., Posada-Posada, M. I., Nowak, D. J., Hoehn, R. E. (2019). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. Colombia forestal. **22** (1): 5-16. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13695>
- Azcárate, L. & Díaz, L. (2016). Plan de manejo para las especies forestales en las diferentes sedes de la Universidad del Cauca (Trabajo de grado). Universidad del Cauca.

- Bernal, R., Gradstein, S.R., Celis, M.** (eds.). (2020). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. v1.1. Universidad Nacional de Colombia. Dataset/Checklist. <https://doi.org/10.15472/7avdhn>
- Boa, E.** (2008). Guía ilustrada sobre el estado de salud de los árboles. FAO y Organismo Internacional Regional De Sanidad Agropecuaria (OIRSA). Fecha de consulta: 20 de febrero de 2021, Disponible en: <http://www.fao.org/3/y5041s/y5041s00.htm>
- Bock, C., Poole, G., Parker, P.E., Gottwald, T.** (2010). Plant Disease Severity Estimated Visually, by Digital Photography and Image Analysis, and by Hyperspectral Imaging. *Critical Reviews in Plant Science*. **29** (2) 59-107. <https://doi.org/10.1080/07352681003617285>
- Burgos-Solorio, A.** (2007). Platypodidae y Scolytidae (Coleoptera) de Jalisco, México. *Dugesiana*. **14** (2): 59-82.
- Caicedo, A. & Tobar, J.** (2013). Diagnóstico silvicultural y formulación de recomendaciones para el manejo del componente arbóreo existente en las sedes de la Universidad del Cauca. (Trabajo de grado). Universidad del Cauca.
- Cannon, P.F., Damm, U., Johnston, P.R., Weir, B.S.** (2012). *Colletotrichum* – current status and future directions. *Studies in Mycology*. **73**: 181-213. <https://doi.org/10.3114/sim0014>
- Cárdenas, L.D. & Salinas, N.R.** (2007). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt & Universidad Nacional de Colombia (Eds.). Libro rojo de plantas de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt: Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. 232 p.
- Casanova, J.** (2021). StoryMapJournal. Fecha de consulta: 22 de junio de 2021. Disponible en: <https://casanova311994.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=cbbcadc8b14a433f8ebb4a8e0aaccf31>
- Castillo-Rivera, J.M. & Sinisterra-Rodríguez, M.M.** (2019). Gestión urbana y políticas públicas para reducir la contaminación del aire: el caso del municipio de Popayán (Colombia). *Perspectivas*. **11** (1): 48-55
- Dalinova, A.A., Salimova, D.R., Berestetskiy, A.O.** (2020). Fungi of the Genera *Alternaria* as producers of biological active compounds and mycoherbicides. *Applied Biochemistry and Microbiology*. **56** (3): 256-272. <https://doi.org/10.1134/S0003683820030023>
- Dobbs, C., Eleuterio, A.A., Amaya, J.D., Montoya, J., Kendal, D.** (2018). Beneficios de la silvicultura urbana y periurbana. *Unasylva: Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales*. **69** (250): 22-29.
- Feuillet-Hurtado, C., Macías-Pinto, D., Chito-Cerón, E.** (2011). Plantas útiles para la elaboración de artesanías en el departamento del Cauca (Colombia). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*. **15** (2): 40-59.
- Gaitán, M., Cancino, J., Behrentz, E.** (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de Ingeniería*. **26**: 81-92
- Gallagher, G.** (2018). The IUCN Red List of Threatened Species. IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/e>
- GBIF Secretariat.** (2021). GBIF Backbone Taxonomy. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/39omei> accessed via GBIF.org.
- Gepp, V.** (2009). Clave para identificar hongos y pseudohongos fitopatógenos. <https://studylib.es/doc/7474590/clave-para-identificar-hongos-y-pseudohongos-fitopato-genos>
- Hawksworth, F. G.** (1977). The 6-class dwarf mistletoe rating system. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture. 7 pp.
- Hughes, M.A., Smith, J.A., Ploetz, R.C., Kendra, P.E., Mayfield, A.E., Hanula, J.L., Hulcr, J., Stelinski, L.L., Cameron, S., Riggins, J.J., Carrillo, D., Rabaglia, R., Eickwort, J., Pernas, T.** (2015). Recovery Plan for Laurel Wilt on Redbay and Other Forest Species Caused by *Raffaelealauricola* and Disseminated by *Xyleborusglabratus*. *Plant Health Progress*. **16** (4): 173-210. <https://doi.org/10.1094/PHP-RP-15-0017>
- Hulcr, J., Black, A., Prior, K., Chen, C.Y., Li, H.F.** (2017). Studies of Ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae) in their native ranges help predict invasion impact. *Florida Entomologist*. **100** (2): 257-261. <https://doi.org/10.1653/024.100.0219>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi- IGAC.** (2020). Cartografía temática Popayán, Escala 1:20.000. Mapa, Shapefile. IGAC, datos abiertos, Bogotá
- Invasive Species Specialist Group-ISSG.** (2011). Global Invasive Species Database. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15468/aaobov> accessed via GBIF.org on 2021-06-24
- Jurado, E.J.** (2021). Actualización del censo y evaluación física, fitosanitaria y del riesgo del arbolado urbano en la Universidad del Cauca. *Ingeniería Forestal*. (Trabajo de grado). Universidad del Cauca.

- Law, M.Y.C., Hui, L.C., Jim, C.Y., Ma, T.L.** (2021). Tree species composition, growing space and management in Hong Kong's commercial sky gardens. *Urban Forestry & Urban Greening*. **64**: 127267. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127267>
- Miller, D., Rung, A., Parikh, G., Venable, G., Redford, A.J., Evans, G.A., Gill, R.J.** (2014). Scale Insects, Identification Tool for Species of Quarantine Significance, edition 2. USDA APHIS PPQ Identification Technology Program (ITP). Fort Collins, CO. <http://idtools.org/id/scales/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** (2020). Lista de especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica continental y marino-costera de Colombia - Resolución 1912 de 2017 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. v2.5. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Dataset/Checklist. <https://doi.org/10.15472/5an5tz>
- Monroy-Castro, L. & Lizarazo-Forero, L.** (2010). Identificación de hongos fitopatógenos asociados al roble (*Quercus humboldtii* Bonpl.), en los municipios de Encino (Santander), Arcabuco, y Tipacoque (Boyacá). *Colombia Forestal*. **13** (2): 347-356. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2010.2.a10>
- Moreno, F. & Hoyos, C.** (2015). Guía para el manejo del arbolado urbano en el Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad Nacional de Colombia. 345 pp.
- Paz, J.P. & Ospina, R.** (2012). Características florísticas de un bosque de roble (*Quercus humboldtii*) en la meseta de Popayán (Cauca). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. **10** (2): 243-248.
- Pildain, M.B. & de Errasti, A.** (2011). Hongos patógenos de pinos en la Patagonia y su asociación con plagas entomológicas. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/84737>
- Potosí-Gutiérrez, A., Villalba-Malaver, J.C., Arboleda-Pino, L.Y.** (2017). Productos forestales no maderables asociados a bosques de roble *Quercus humboldtii* Bonpl. en La Vega, Cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. **15** (2): 22-29. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(15\)](https://doi.org/10.18684/BSAA(15))
- Quantum Gis Development Team.** (2021). Bienvenido al proyecto QGIS! (s/f). <https://www.qgis.org/es/site/>
- R CORE TEAM.** (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.Rproject.org>
- Rafael, J.A., Melo, G.A.R., Carvalho, C.J.B. de., Casari, S.A., Constantino, R.** (2012). Insetos do Brasil Diversidade e Taxonomia. Ribeirão Preto: Holos editora. 810 pp.
- Rangel-Ch., J.O.** (2017). Libro Impreso Colombia diversidad biótica XV. Los bosques de robles (Fagaceae) en Colombia. Composición florística, estructura, diversidad y conservación. Universidad Nacional de Colombia. 311 pp.
- Restrepo, O.H.I., Moreno, F.H., Hoyos, C. H.** (2015). Incidencia del deterioro progresivo del arbolado urbano en el Valle de Aburrá, Colombia. *Colombia forestal*. **18** (2): 225-240.
- Rivas-Zúñiga, S.C. & Giraldo-Aristizábal, C.I.** (2021). Manual práctico de microbiología básica. Editorial Universidad del Cauca. 180 pp.
- Sermeño-Chicas, J. M. & Pérez, D.** (2015). Insecto espina de rosa *Umboniaspinosa* (Fabricius, 1775) y *Umboniacrassicornis* (Amyot y Serville, 1843) (Homoptera: Membracidae) en árboles de paterno (*Inga paterno* Harms) y mangollano (*Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth) en El Salvador. *Bioma*. **37** (4): 13-26.
- Singh, A., Bhatnagar, S., Singh, S., Rathore, L. S.** (2017). Foliar disease infection on some forest trees. *Journal of Agriculture and Ecology*. **3**: 38-41.
- Steininger, M.S., Hulcr, J., Igut, M., Lucky, A.** (2015). Simple and Efficient Trap for Bark and Ambrosia Beetles (Coleoptera: Curculionidae) to Facilitate Invasive Species Monitoring and Citizen Involvement. *Journal of Economic Entomology*. **108** (3): 1115-1123. <https://doi.org/10.1093/jee/tov014>
- Summerell, B.A.** (2019). Resolving Fusarium: Current Status of the Genus. *Annual Review of Phytopathology*. **57** (1): 323-339. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082718-100204>
- Talley, S.M., Coley, P.D., Kursar, T.A.** (2002). The effects of weather on fungal abundance and richness among 25 communities in the Intermountain West. *BMC ecology*. **2**, 7. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-2-7>
- Trigiano, R.N.** (2007). *Plant Pathology Concepts and Laboratory Exercises*. Second Edition. CRC Press. 576 pp.
- Triplehorn, C.A., Johnson, N.F., Borror, D.J.** (2005). Borror and DeLong's introduction to the study of insects. Thompson Brooks/Cole. USA, 864 pp.

-
- Vargas, P.S., Hoyos, J.L., Mosquera, S.A.** (2012). Uso de hojarasca de roble y bagazo de caña en la producción de *Pleurotostreatus*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. **10** (1): 136-145.
- Vasconcelos, H.L., Vieira-Neto, E.H.M., Mundim, F.M., Bruna, E.M.** (2006). Roads Alter the Colonization Dynamics of a Keystone Herbivore in Neotropical Savannas1. *Biotropica*. **38** (5): 661-665. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00180.x>
- Villalba, M.J.C., Avella M, E.A., Ospina M, R.** (2021). Silvicultura de especies latinoamericanas, *Quercus humboldtii* Bonpl. En: Pina Rodrigues, F., y Silva, J. M. *Silvicultura tropical: o potencial madeireiro e não madeireiro das espécies tropicais*. Sorocaba, São Paulo. 596 pp.
- Wilkaniec, A., BorowiakSobkowiak, B., Irzykowska, L., Breś, W., Świerk, D., Pardela, L., Durak, R., ŚrodulskaWielgus, J., Wielgus, K.** (2021). Biotic and abiotic factors causing the collapse of *Robinia pseudoacacia*L. veteran trees in urban environments. *PLoS ONE*. **16** (1): e0245398. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245398>

Artículo original

Hábitats prioritarios en un humedal costero del Pacífico: propuesta de un índice basado en servicios ecosistémicos

Priority habitats of a Pacific coastal wetland: Proposal for an index based on ecosystem services

Diana Ochoa-Balbacea¹, Sergio Gonzales^{2,4}, Antony Apeño^{2,3}, Héctor Aponte^{2,4,*}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² Facultad de Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

³ Programa de gobernanza marino-costera de la ONG CooperAcción, Lima, Perú

⁴ Coastal Ecosystems of Perú Research Group, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

Resumen

Una forma de valorar los humedales consiste en identificar sus servicios ecosistémicos y utilizar esta información para su conservación. El objetivo del presente estudio fue proponer un índice basado en servicios ecosistémicos potenciales (SEP) para priorizar la conservación de hábitats y aplicarlo como estudio de caso en el humedal Santa Rosa (Lima, Perú). Se utilizaron los inventarios y registros de hábitats de las plantas vasculares y aves del humedal y se realizaron visitas complementarias para confirmar los datos. Con base en la bibliografía, se determinaron los SEP de estas especies y se calculó el número de SEP (NSEP) en cada hábitat. Para determinar el índice de priorización (IP) se utilizó dicho número y la extensión de cada hábitat, y se evaluó la correlación entre el área, la riqueza, el número de SEP y el IP. El cuerpo de agua principal y la zona arbustiva presentaron el número más alto de SEP (25) y el mayor valor de IP (6,87 SEP/ha). Los valores más bajos se registraron en la zona de playa (7 SEP: 0,88 SEP/ha) y la zona sin vegetación (7 SEP: 0,60 SEP/ha). Se observó que la riqueza de especies fue directamente proporcional al NSEP ($p < 0,05$; prueba de Spearman); las otras variables no mostraron correlación. Se constató que actividades como arrojar los desechos del desmonte disminuyen la riqueza de especies y genera hábitats con valores bajos de NSEP. El índice propuesto determinó que la zona arbustiva es un hábitat prioritario de conservación en el humedal evaluado. Se discuten las fortalezas y limitaciones del uso de este índice.

Palabras clave: Conservación; Hábitat; Humedal costero; Índice de priorización; Servicios ecosistémicos.

Abstract

One way to value wetlands is to identify their ecosystem services (ES) and use this information for their conservation. Here we proposed an index based on potential ES to prioritize the conservation of habitats and apply it as a case study in the Santa Rosa wetland (Lima, Perú). Habitat inventories and records of the vascular plants and wetland birds were used and confirmed by field visits. Using the information found in the literature, the potential ES of these species were determined and their number was calculated for each habitat. We used the number of potential ES and the extension of each habitat to determine the prioritization index (PI), and we determined the correlation among area, richness, number of potential ES, and PI. The main water body and the shrub zone presented the highest number of potential ES (25) and the highest PI (6.87 potential ES/ha). The lowest values were recorded in the beach area (7 potential ES: 0.88 potential ES/ha) and the zone with no vegetation (7 potential ES: 0.60 potential ES/ha). We observed that the richness of species was directly proportional to the number of potential ES ($p < 0.05$, Spearman's test); the other variables did not show correlation. Activities such as land clearing reduce species richness generating habitats with few potential ES. The proposed index identified the shrub zone as a priority conservation habitat in the evaluated wetland. The strengths and limitations of using this index are discussed.

Keywords: Conservation; Habitats; Coastal wetland; Priority index; Ecosystem services

Citación: Ochoa-Balbacea D, Gonzales S, Apeño A, Aponte H. Hábitats prioritarios en un humedal costero del Pacífico: propuesta de un índice basado en servicios ecosistémicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):182-191, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1569>

Editor: Gabriel Roldán

***Correspondencia:**

Héctor Aponte;

haponte@cientifica.edu.pe

Recibido: 23 de octubre de 2021

Aceptado: 11 de febrero de 2021

Publicado: 23 de marzo de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

A pesar de que la conservación de los ecosistemas es un tema prioritario, los recursos y esfuerzos para protegerlos son limitados (McCarthy, *et al.*, 2012). Una de las medidas para conservarlos es la selección de áreas prioritarias utilizando patrones de riqueza de especies, endemismo, biodiversidad o servicios ecosistémicos (Roberts, *et al.*, 2002; Ego, *et al.*, 2007; Suárez-Mota & Téllez-Valdés, 2014). Los servicios ecosistémicos (SE) se definen como beneficios que derivan de los ecosistemas para el aprovechamiento y bienestar del ser humano. Pueden categorizarse en servicios de aprovisionamiento, regulación, culturales y de soporte (Millenium Ecosystem Assessment-MEA, 2005). La valoración económica de estos beneficios sirve como base para obtener apoyo monetario y social que luego se invierte en la mantención de los SE (Duarte, *et al.*, 2016). Asimismo, existen servicios ecosistémicos potenciales (SEP) con beneficios concretos por demanda, uso o disfrute de las personas (Gómez-Baggeth & de Groot, 2007).

Los humedales son un tipo de ecosistema con alto valor monetario debido a los SE que ofrecen (valorados en 47,4x10¹²Int\$ año⁻¹ a nivel mundial) (Davidson, *et al.*, 2019). Estos ecosistemas brindan múltiples bienes y servicios a la población humana, entre ellos, el control de los flujos de agua, la regulación de los niveles de carbono, la provisión de entornos con valores culturales, y la provisión de plantas útiles (MEA, 2005). A pesar de ello, se ven afectados por impactos antrópicos y siguen disminuyendo en calidad y extensión a nivel mundial, por lo que sus SE se reducen (Gardner, *et al.*, 2015).

Perú registra 92 humedales costeros que forman parte del corredor del Pacífico (Pronaturaleza, 2010). Debido a su cercanía con las áreas urbanas, muchos de ellos se han visto afectados, como se constata en Moschella (2012). Uno de estos ecosistemas es el humedal Santa Rosa, constantemente amenazado por actividades de agricultura, crianza de ganado, pastoreo y disposición de desechos (domésticos y de construcción) de la población local (Aponte & Cano, 2013). A pesar de esta situación, el humedal tiene una considerable riqueza de flora y fauna (Aponte, *et al.*, 2012; Gonzáles, *et al.*, 2019; Apeño, 2020; Castillo-Velásquez & Huamantico-Araujo, 2020) y un gran potencial para proveer recursos aprovechables como fibras (*Schoenoplectus americanus* y *Thypha domingensis*), plantas medicinales (*Heliotropium curassavicum* y *Bacopa Monnieri*), plantas ornamentales (*Eicchornia crassipes*) y plantas forrajeras (*Lemna gibba*) (Aponte & Cano, 2013). En los últimos años, este ecosistema enfrenta también amenazas como la construcción de un megapuerto en zonas cercanas (Apeño, 2020), por lo que conocer los SEP que brinda y sus especies permitiría determinar herramientas para su conservación.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar los hábitats del humedal Santa Rosa utilizando un índice para su priorización basado en los SEP de cada uno y su extensión, con el fin de contribuir a diseñar estrategias de conservación basadas en los servicios ecosistémicos, lo que brinda una visión complementaria de la riqueza de especies o de su vulnerabilidad.

Metodología

Área de estudio

El Humedal Santa Rosa está ubicado al norte de la ciudad de Lima, en el distrito de Chancay, provincia de Huaral (11°36'01,4" S - 77°15'54,0" W). Delimita al norte y parte del noroeste con el cerro El Cascajo, al este está rodeado por las colinas bajas del cerro Salinas, en el oeste colinda con el océano Pacífico (playa El Cascajo), y al sur, con zonas agrícolas de las localidades de Peralvillo y Salinas Alta (Aponte, *et al.*, 2012).

Preparación del mapa de hábitats

Para conocer la extensión de los hábitats y sus límites, se hicieron recorridos en la zona de estudio entre abril y julio del 2019. Los hábitats se clasificaron según su vegetación dominante basándose en Aponte & Ramírez (2011), y se registraron sus límites con ayuda de un receptor GPS. Los datos se procesaron con Google Earth Pro y ArcGIS mediante el trazado de polígonos para cada hábitat.

Servicios ecosistémicos potenciales según la vegetación (SEP)

La distribución de las plantas vasculares en los hábitats se tomó de la base de datos de **González, et al.** (2019), la cual contiene información de su estudio del 2018 con el registro del hábitat en donde se encontró cada especie. Además, se hicieron visitas complementarias durante diciembre del 2019 y enero del 2020 para verificar *in situ* si las especies se encontraban en los hábitats mencionados.

Para la identificación de los SEP de las plantas vasculares de este humedal se utilizó la base de datos de la **US Department of Agriculture-DA** (2018) que contiene información sobre los usos de las plantas de este humedal. Asimismo, se consultó en **León, et al.** (1998) el uso potencial de las especies de humedales, y en **Rutter** (2008), el catálogo de plantas útiles de la Amazonía, el cual incluye plantas de ambientes acuáticos. A partir de estos trabajos se establecieron los SEP de las especies, principalmente los de aprovisionamiento (de fibras, medicinas naturales y materiales de construcción).

Se consideró que todas las especies vegetales prestaban el servicio de producción primaria (de soporte) y de regulación del clima por medio del secuestro de carbono, ya que todas las especies de flora vascular evaluadas realizan fotosíntesis y, por consiguiente, capturan carbono en mayor o menor medida (**de Groot, et al.**, 2000; **Ma, et al.**, 2018; **MEA**, 2005). También se consideró que todas las especies vegetales tenían SEP relacionados con el ciclo de nutrientes dado el papel de la biota en el almacenamiento y reciclaje de nutrientes (por ejemplo, nitrógeno, fósforo y azufre) (**de Groot, et al.**, 2002), lo que no afectó la comparación entre los hábitats con vegetación, pero sí sirvió para compararlos con aquellos sin vegetación.

Los SEP se clasificaron como de soporte, regulación, aprovisionamiento y valor cultural siguiendo la estructura del **MEA** (2005).

SEP según la distribución de las aves

La distribución de las aves en cada hábitat se tomó de **Apeño** (2020), quien estudió las aves de este humedal en el periodo de marzo del 2018 a febrero del 2019. En dicho estudio se hicieron avistamientos por las mañanas (6 a.m.) en los hábitats previamente determinados considerando 360° de visión de un observador durante 10 minutos en un alcance máximo de 50 m. Las anotaciones de campo de dicho estudio se utilizaron como base para construir una matriz de distribución por hábitat.

Los SEP establecidos según las aves se basaron en la metodología sugerida por **Pacheco** (2013), en la cual se determina el hábito alimenticio primario de cada especie según su fuente de alimento: carroña (CA), néctar e insectos (NI), frutos o frutos y semillas (FS), néctar, frutos e insectos (NF), semillas e insectos (SI), pequeños invertebrados (PI), pequeños invertebrados y fruta (ON), pequeños vertebrados y grandes invertebrados (VI), grandes invertebrados, pequeños vertebrados y fruta (OM), y vertebrados (VE). Estos datos se extrajeron de los estudios de **del Hoyo, et al.** (2016), **Costa** (2019) y **Tello & Castillo-Polo** (2010). Una vez establecido el hábito alimenticio primario, se utilizó la equivalencia de SEP a la que correspondía cada hábito (tomada del trabajo de **Pacheco**, 2013). El SEP del ciclo de nutrientes se consideró a partir del papel de la biota en todas las especies como consumidoras (por ejemplo, nitrógeno, fósforo y azufre) (**de Groot, et al.**, 2002); esta adición no afectó la comparación entre hábitats.

Al igual que en las plantas, los SEP identificados se organizaron en las categorías de aprovisionamiento, regulación, valor cultural y soporte siguiendo la estructura del **MEA** (2005) con las adiciones de **Whelan, et al.** (2008).

Cálculo del índice de priorización (IP)

Se elaboró una matriz con las especies de flora vascular y avifauna, su hábitat, y los SEP que brindan. Se calculó el IP para cada hábitat mediante la Ecuación 1, de la siguiente manera:

$$IP = NSEP / A \quad (\text{Ecuación 1}),$$

donde I_p corresponde al índice de priorización, $NSEP$ al número de SEP distintos reportados para cada hábitat, y A al área de la superficie del hábitat (en hectáreas).

Los IP de cada hábitat se ordenaron de mayor a menor y los valores más altos correspondieron a hábitats prioritarios. Con esta información se elaboró un mapa de los hábitats del humedal Santa Rosa indicando los IP mediante el programa Google Earth Pro y ArcGIS.

Evaluación de la correlación

Para evaluar si existió correlación entre el área de los hábitats, el número de especies totales (plantas vasculares y aves) por hábitat, el NSEP y el IP, se hizo una prueba de correlación por pares de estas variables. Para ello se calculó el índice de correlación de Spearman (rs) para cada par después de verificar que cumplieran con el supuesto de normalidad (prueba de Shapiro Wilk), lo cual no se hizo para el IP ($p > 0,05$).

Resultados

Área de los hábitats evaluados

El área total del humedal fue de 84,86 ha, distribuidas en 9 hábitats, incluidos aquellos sin vegetación, los modificados y los perturbados: cuerpo de agua principal (23,10 ha), totoral (11,7 ha), zona sin vegetación (11,7 ha), vega mixta en zona de cultivo (11,6 ha), zona de playa (7,94 ha), vega mixta en zona urbana (7,53 ha), juncal (5,45 ha), zona de desmonte (3,22 ha) y zona arbustiva (2,62 ha) (**Figura 1**).

SEP de las plantas vasculares y aves

La **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1569/3200>, contiene el listado de 89 especies de aves y sus SEP asignados; se reconocieron entre 5 y 7 SEP por especie ($5,89 \pm 0,5$). Se registró presencia de la especie *Tadorna tadorna* en el humedal por primera vez en Perú (**Cotillo, et al., 2019**). Por otro lado, en la **tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1569/3200>, se incluyen las 57 especies de plantas vasculares, con 3 a 9 SEP por especie ($4,5 \pm 1,68$).

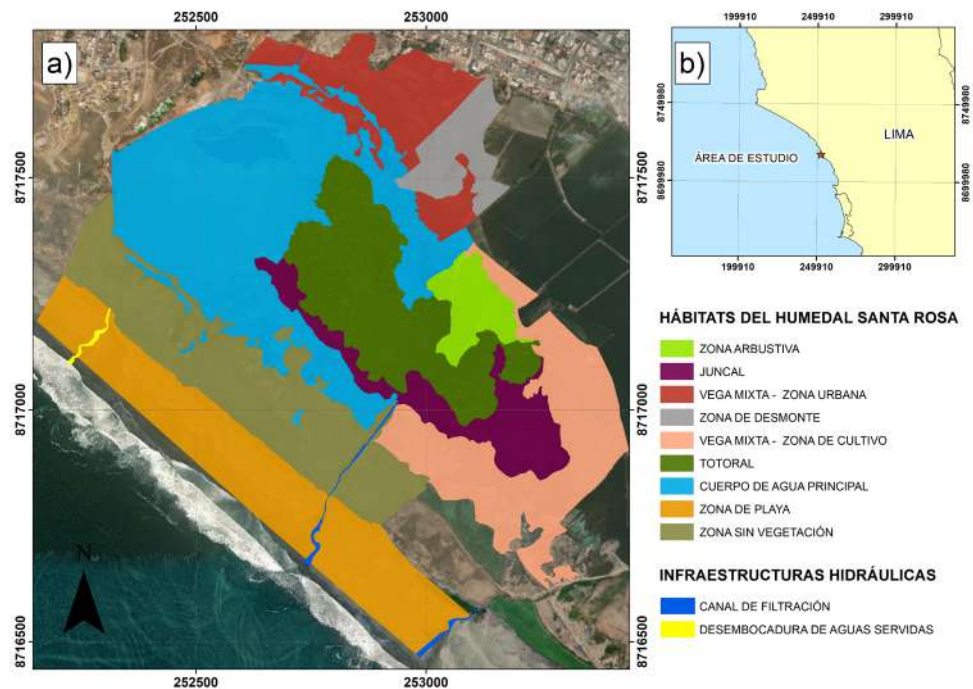


Figura 1. Mapas del humedal Santa Rosa donde se aprecian: **a)** sus hábitats y **b)** su posición con respecto a la costa de Lima

IP por hábitat

Los SEP establecidos para cada hábitat y su correspondiente IP se relacionan en la **tabla 1** y el resumen gráfico de los resultados en la **figura 2**. El hábitat que presentó la mayor cantidad de SEP fue el cuerpo de agua principal (25 SEP); sin embargo, el IP más alto (6,87 SEP/ha) se obtuvo en la zona arbustiva, con un total de 18 SEP distribuidos en la menor área de humedal (2,62 ha), seguida por el juncal, con 16 SEP en un área de 5,45 ha (IP: 2,94 SEP/ha). Los hábitats sin cobertura vegetal registraron los valores más bajos de SEP, dos de ellos con los NSEP e IP más bajos: la zona de playa (7 SEP: 0,88 SEP/ha) y la zona sin vegetación (7 SEP: 0,60 SEP/ha). Se reportaron valores intermedios para los otros hábitats. La **figura 3** muestra el mapa de los hábitats prioritarios de conservación con base en el IP. Estos resultados evidenciaron que la zona arbustiva es el hábitat prioritario.

Tabla 1. Extensión de hábitats, riqueza de especies, servicios ecosistémicos potenciales (SEP) e índice de priorización (IP)

Hábitats	Área (ha)	Especies aves	Especies de plantas vasculares	Total de especies	SEP aves	SEP plantas vasculares	NSEP	IP
Cuerpo de agua principal	23,10	46	16	62	8	17	25	1,08
Zona sin vegetación	11,70	18	0	18	7	0	7	0,60
Zona de desmonte	3,22	11	0	11	8	0	8	2,48
Zona arbustiva	2,62	41	13	54	9	9	18	6,87
Juncal	5,45	17	10	27	8	8	16	2,94
Totoral	11,70	21	2	23	8	11	19	1,62
Vega mixta - zona urbana	7,53	25	12	37	8	12	20	2,66
Vega mixta - zona de cultivo	11,60	24	44	68	8	17	25	2,16
Zona de playa	7,94	26	0	26	7	0	7	0,88

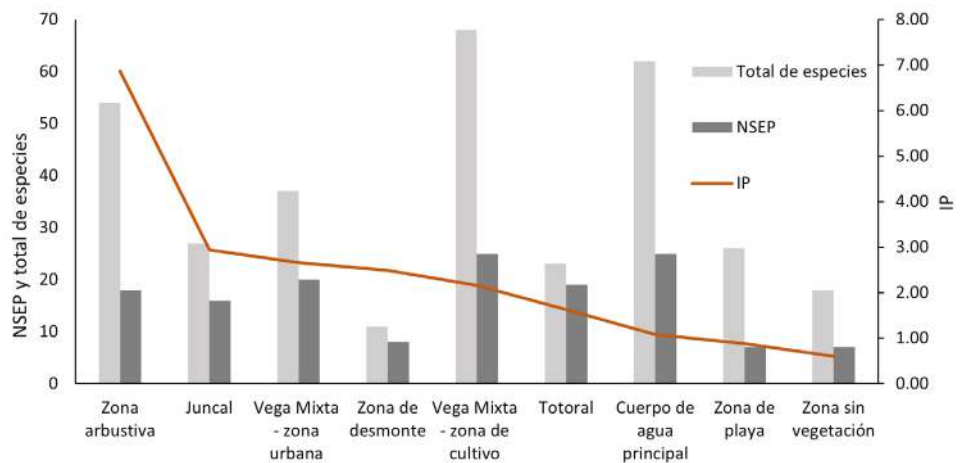


Figura 2. Número de especies, servicios ecosistémicos e índice de priorización en los diferentes hábitats del humedal Santa Rosa

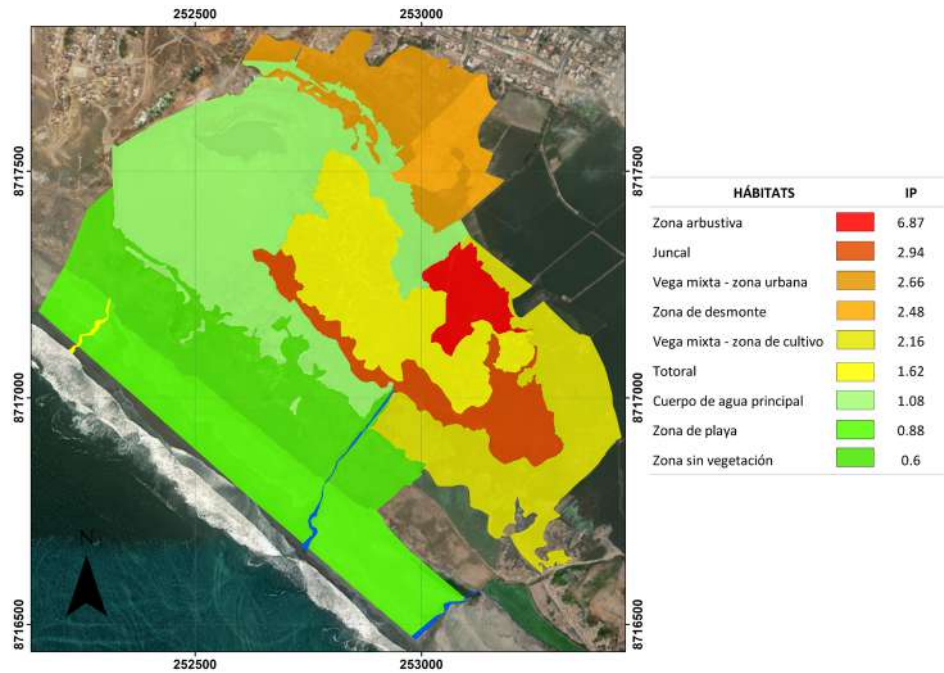


Figura 3. Mapa de los hábitats del humedal Santa Rosa indicando sus valores de IP

Tabla 2. Resultados del análisis de correlación del área de los hábitats

	A	N	NSEP	IP
A		0,78	0,44	0,01
N	0,11		0,02	0,45
NSEP	0,29	0,78		0,49
IP	-0,79	0,28	0,26	

Se indica el área (A), el número total de especies de flora vascular y aves por hábitat (N), el NSEP y el IP. La diagonal inferior izquierda presenta los resultados del índice de Spearman y la superior derecha contiene los valores de p de cada índice.

Evaluación de la correlación

Los resultados de la prueba de correlación se muestran en el **tabla 2**. El análisis indicó que existía una correlación entre el número total de especies y el NSEP y entre ellas, la relación fue directamente proporcional ($r=0,78$; $p<0,05$) y se encontró una correlación inversamente proporcional entre A e IP ($r=-0,79$; $p<0,05$). Entre todos los otros pares de variables no hubo correlación ($p>0,05$).

Discusión

La diversidad de especies influye en el número de SE, tal como se demuestra en estudios previos en que ambas variables han demostrado ser directamente proporcionales (**Quijas, et. al., 2012**), observaciones que concuerdan con nuestros resultados, en los que el NSEP se correlacionó y aumentó con el número de especies presentes. Por lo tanto, el mal uso de los recursos afectaría negativamente el número de SEP de cada hábitat por el impacto en su flora y fauna (**Corredor-Camargo, et al., 2012**).

Nuestros resultados señalan que el hábitat prioritario de conservación es el arbustivo, ya que presentó el mayor IP. El mal uso de los recursos en este hábitat (por ejemplo, una extracción excesiva de especies como *Colocasia esculenta* con fines ornamentales o el

mal uso del drenaje que cruza este sector), podría afectar sus SEP deteriorándolos. Dado de que el riesgo de pérdida de un hábitat es mayor cuando su área es más pequeña (Von, *et al.*, 2018), es importante proteger la zona arbustiva, ya que su superficie es menor que la de otros hábitats en este humedal. En el presente estudio se demostró la importancia de este hábitat para la conservación de los SEP y la necesidad de establecer estrategias para protegerlo.

Tal como afirman Los, *et al.* (2016), solo hay servicios ecosistémicos donde hay vida (carbono orgánico y agua), y cada especie vegetal o animal tiene una función ecológica en el equilibrio de la naturaleza, lo que quedó evidenciado en los resultados del presente estudio, pues los hábitats sin cobertura vegetal (zona de playa y zona sin vegetación) registraron los valores más bajos de IP y NSE. La zona de desmonte es fruto del impacto de actividades antrópicas que han dejado el hábitat sin vegetación; dado el reducido tamaño de su área y las aves que la habitan (Apeño, 2020), presenta un valor medio de IP, pero ello no justifica que continúe la disposición de desechos del desmonte, ya que el cambio de uso del suelo conduce a una disminución permanente de la diversidad local, especialmente de plantas (MEA, 2005) y, por consiguiente, de los SEP. En algunos casos, la disposición de los desechos del desmonte es el preludio de la invasión del terreno (Moschella, 2012), por lo que debe evitarse, dado el gran deterioro que genera, además de propiciar una situación adecuada para la destrucción irreversible del hábitat.

A diferencia de otras metodologías cualitativas de revisión de la literatura basadas en la opinión de expertos o en encuestas (Potts, *et al.*, 2014; Quijas, *et al.*, 2012), el IP propuesto es un método innovador para determinar hábitats prioritarios para la conservación con base en los SEP que ofrecen la flora y la avifauna en un determinado espacio. Además, este inventario de los SEP permite reconocer el valor intrínseco de las especies y determinar su valor a partir del uso potencial que tienen y el beneficio que ofrecen (Bitrán, 2015). Sin embargo, una de las limitaciones del índice propuesto es que requiere de los listados de las especies por hábitat, los cuales no siempre están disponibles. Por ello, insistimos en la necesidad de hacer inventarios de flora y fauna, que, como se aprecia en el presente estudio, permiten conocer la diversidad de especies de un ecosistema y generar estrategias de conservación basadas en los beneficios que ofrecen.

Es importante complementar la metodología propuesta con otras variables como el estado de conservación de las poblaciones del humedal. Por ejemplo, pese al bajo valor del IP de la zona de playa, esta presenta especies en peligro como *Pelecanus thagus* y *Sula variegata* (IUCN, 2020). Otra limitación de esta técnica es que no incluye los SE prestados por los componentes abióticos del ecosistema, por ejemplo, el agua, que genera servicios como la regulación del microclima, el control del flujo hídrico y su provisión (MEA, 2005). A pesar de estas limitaciones, la metodología propuesta permite una aproximación a la gama completa de SEP para la toma de decisiones sobre la conservación del humedal y de otros en los que se cuente con inventarios vegetales y de la ornitofauna, dos de las variables bióticas más estudiadas en los humedales costeros del Perú (Rivera, *et al.*, 2021), además de ser una visión complementaria de los inventarios. Dada la ausencia de correlación ($p > 0,05$) entre el IP y la riqueza, el presente índice constituye una herramienta distinta que debe considerarse para conservar los hábitats y los beneficios que brindan.

La elaboración del mapa de los hábitats del humedal Santa Rosa con los valores del IP es importante en el reconocimiento y planificación de la conservación y una herramienta útil para la toma de decisiones y la gestión (Egoh, *et al.*, 2007; Duarte, *et al.*, 2016). Por ello se incluyó un mapa de este tipo en el presente estudio, que pueda ser de utilidad para los responsables de actividades en este campo. Se brindan, asimismo, las primeras estimaciones de los SEP por unidad de área traducidas en el IP y se proporciona el listado de los que pueden atribuirse a las especies de flora y avifauna. Esta información será de utilidad para evaluaciones similares en otros ecosistemas de la región que compartan especies con los humedales de la costa peruana inventariadas y publicadas (Aponte & Cano, 2013; Pulido, 2018).

Conclusiones

El presente trabajo propone un índice de priorización de hábitats basado en los SEP. Su aplicación y cálculo en los hábitats del humedal Santa Rosa evidenciaron que el hábitat arbustivo presenta la mayor cantidad de SEP por unidad de área, por lo que merece atención prioritaria. Se demostró cualitativamente cómo la avifauna y la flora se pueden utilizar para traducir sus SEP en un índice que permita determinar hábitats prioritarios de conservación. Además, el mapa que aquí se presenta resulta una herramienta espacial para el reconocimiento y conservación de hábitats que servirá en la toma de decisiones en el área. Se sugiere que estos resultados se utilicen de manera complementaria en la estimación de la riqueza y el estado de conservación de las especies que albergan los hábitats estudiados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Williams Jurado y a los miembros del CVA Humedales de Santa Rosa por su apoyo en la realización de la fase de campo y a la Universidad Científica del Sur por su apoyo con los materiales de campo.

Información suplementaria

Tabla 1S. Listado de especies de aves registradas en cada hábitat y su SEP. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1569/3200>

Tabla 2S. Listado de especies de flora vascular registradas en cada hábitat y su SEP. Ver tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1569/3200>

Contribución de los autores

DOB: financiamiento, diseño del estudio, recolección de datos, análisis estadístico e interpretación de resultados, y preparación del manuscrito; SG y AA: recolección de datos y preparación del manuscrito; HA: diseño del estudio, recolección de datos, análisis estadístico e interpretación de resultados, y preparación del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Apeño, A.** (2020). Diversidad, variación espacio-temporal y estado de conservación de la comunidad de aves en el humedal marino costero «Santa Rosa» (Lima-Perú). Universidad Científica del Sur. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/UCS/1138>
- Aponte, H. & Cano, A.** (2013). Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa de Lima (Perú): actualización y nuevos retos para su conservación. *Revista Latinoamericana de Conservación*. **3** (2): 15-27.
- Aponte, H., Jiménez, R., Alcántara, B.** (2012). Challenges for management and conservation of Santa Rosa Wetland (Lima-Perú). *Científica*. **9** (3): 257-264.
- Aponte, H. & Ramírez, D. W.** (2011). Humedales de la costa central del Perú: estructura y amenazas de sus comunidades vegetales. *Ecología Aplicada*. **10** (1-2): 31. <https://doi.org/10.21704/rea.v10i1-2.411>
- Bitrán-Dirven, D.** (2015). Valoración de servicios ecosistémicos culturales para una zona desértica: La Región de Tarapacá, Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133161>
- Castillo-Velásquez, R. M. & Huamantínco-Araújo, A. A.** (2020). Spatial variation of the aquatic macroinvertebrates community in the littoral zone of the Santa Rosa Coastal Wetland, Lima, Peru. *Revista de Biología Tropical*. **68** (1): 50-68. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.35233>
- Costa, M.** (2019) Aves Patagónicas, Proyecto Freebirds. Fecha de consulta: 16 de septiembre 2019. Disponible en: www.freebirds.com.ar
- Cotillo, A., Apeño, A., Aponte, H.** (2019). Primer registro documentado del Pato Tarro Blanco, *Tadorna tadorna* (Linnaeus, 1758), en el Perú. *Ecología Aplicada*. **18** (2): 185-188. <https://doi.org/10.21704/rea.v18i2.1336>

- Corredor-Camargo, E., Fonseca-Carreño, J., Páez, E.** (2012). Los servicios ecosistémicos de regulación: tendencias e impacto en el bienestar humano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. **3**: 77. <https://doi.org/10.22490/21456453.936>
- Davidson, N., B. A., Finlayson, M., McInnes, R.** (2019). Worth of wetlands: Revised global monetary values of coastal and inland wetland ecosystem services. *Marine and Freshwater Research*. **70** (8): 1189-1194. <https://doi.org/10.1071/MF18391>
- de Groot, R., Perk, J., Chiesura, A., Marguliew, S.** (2000). Ecological Functions and Socioeconomic Values of Critical Natural Capital as a Measure for Ecological Integrity and Environmental Health. En: Paper presented at NATO Advanced Research Workshop «Implementing ecological integrity»: Restoring regional and global environmental and human health, National Institute of Health, Budapest, June 26-July 1, 1999. - [S.l.]: [S.n.], 1999 (pp. 191-214). https://doi.org/10.1007/978-94-011-5876-3_13
- de Groot, R., Wilson, M., Boumans, R.** (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*. **41** (3): 393-408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- del Hoyo, J., Elliott, A., Sargatal, J., Christie, D. A., de Juana, E.** (2016). *Handbook of the birds of the world alive*. Barcelona: Lynx Edicions. Fecha de consulta: 30 de septiembre 2019. Disponible en: <https://www.hbw.com/>
- Duarte, G. T., Ribeiro, M. C., Paglia, A. P.** (2016). Ecosystem Services Modeling as a Tool for Defining Priority Areas for Conservation. *PLOS ONE*. **11** (5): e0154573. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154573>
- Egoh, B., Rouget, M., Reyers, B., Knight, A. T., Cowling, R. M., van Jaarsveld, A. S., Welz, A.** (2007). Integrating ecosystem services into conservation assessments: A review. *Ecological Economics*. **63** (4): 714-721. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.04.007>
- Gardner, R. C., Barchiesi, S., Beltrame, C., Finlayson, C. M., Galewski, T., Harrison, I., Paganini, M., Perennou, C., Pritchard, D. E., Rosenqvist, A., Walpole, M.** (2015). Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: Una recopilación de análisis recientes [Nota Informativa Ramsar 7]. Secretaría de la Convención de Ramsar.
- Gómez-Baggethun, E. & Groot, R. de.** (2007). Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Revista Ecosistemas*. **16** (3): Article 3. <https://doi.org/10.7818/re.2014.16-3.00>
- González, S., Aponte, H., Cano, A.** (2019). Actualización de la flora vascular del humedal Santa Rosa—Chancay (Lima, Perú). *Arnaldoa*. **26** (3): 867-882. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26303>
- IUCN.** (2020). The IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/en>
- León, B., Young, K., Cano, A.** (1998). Uso Actual de la Flora y Vegetación en los Humedales de la Costa Central del Perú. En: Cano, A. & Young, K. (eds.). *Los Pantanos de Villa: Biología y Conservación*. (pp. 104-191). Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Los, M., Lagoria, A., Pomares, M., Herrera, G., Alderete, M., Sirombra, M.** (2016). Los servicios ecosistémicos, biodiversidad y restauración ecológica en el nivel secundario. Asociación de Docentes de Ciencias Biológicas de la Argentina. Buenos Aires, Argentina. 4 pp.
- Ma, S., He, F., Tian, D., Zou, D., Yan, Z., Yang, Y., Zhou, T., Huang, K., Shen, H., Fang, J.** (2018). Variations and determinants of carbon content in plants: A global synthesis. *Biogeosciences*. **15**: 693-702. <https://doi.org/10.5194/bg-15-693-2018>
- McCarthy, D. P., Donald, P. F., Scharlemann, J. P. W., Buchanan, G. M., Balmford, A., Green, J. M. H., Bennun, L. A., Burgess, N. D., Fishpool, L. D. C., Garnett, S. T., Leonard, D. L., Maloney, R. F., Morling, P., Schaefer, H. M., Symes, A., Wiedenfeld, D. A., Butchart, S. H. M.** (2012). Financial Costs of Meeting Global Biodiversity Conservation Targets: Current Spending and Unmet Needs. *Science*. **338** (6109): 946-949. <https://doi.org/10.1126/science.1229803>
- Millennium Ecosystem Assessment.** (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. World Resources Institute. Washington DC., USA. 100 pp.
- Moschella, P.** (2012). Variación y protección de humedales costeros frente a procesos de urbanización: casos Ventanilla y Puerto Viejo. Tesis para optar el título de Magister en Desarrollo Ambiental. Escuela de Posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/452>
- Pacheco, L.** (2013). Las comunidades de aves, sus grupos funcionales y servicios ecosistémicos en un paisaje cafetero colombiano. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 47 pp.

- Potts, T., Burdon, D., Jackson, E., Atkins, J., Saunders, J., Hastings, E., Langmead, O.** (2014). Do marine protected areas deliver flows of ecosystem services to support human welfare? *Marine Policy*. **44**: 139-148.
- Pronaturaleza.** (2010). Humedales de la Costa Peruana. Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana. Pronaturaleza. Primera edición. Lima, Perú. 94 pp.
- Pulido, V.** (2018). Ciento quince años de registros de aves en Pantanos de Villa. *Revista Peruana de Biología*. **25** (3): 291-306. <https://doi.org/10.15381/rpb.v25i3.15212>
- Quijas, S., Jackson, L. E., Maass, M., Schmid, B., Raffaelli, D., Balvanera, P.** (2012). Plant diversity and generation of ecosystem services at the landscape scale: Expert knowledge assessment. *Journal of Applied Ecology*. **49** (4): 929-940.
- Rivera, G., Gonzáles, S., Aponte, H.** (2021). Wetlands of the South American pacific coast: a bibliometric analysis. *Wetlands Ecology and Management*, 1-9. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-563498/v1>
- Roberts, C. M., McClean, C. J., Veron, J. E. N., Hawkins, J. P., Allen, G. R., McAllister, D. E., Mittermeier, C. G., Schueler, F. W., Spalding, M., Wells, F., Vynne, C., Werner, T. B.** (2002). Marine Biodiversity Hotspots and Conservation Priorities for Tropical Reefs. *Science*. **295** (5558): 1280-1284. <https://doi.org/10.1126/science.1067728>
- Rutter, R.** (2008). Catálogo de plantas útiles de la Amazonia peruana. Comunidades y culturas peruanas. Instituto Lingüístico de Verano. Tercera edición. Lima, Perú. 369 pp.
- Suárez-Mota, M. E. & Téllez-Valdés, O.** (2014). Red de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad del Eje Volcánico Transmexicano analizando su riqueza florística y variabilidad climática. *Polibotánica*. **38**: 67-93.
- Tello, A. & Castillo-Polo, L.** (2010). Humedales de la Región Lima: Guía de su flora y fauna silvestre. Gobierno Regional de Lima. Primera edición. Lima, Perú. 97pp.
- USDA, ARS, National Plant Germplasm System.** (2018). World Economic Plants—GRIN-Global Web v 1.10.2.8. <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxon/taxonomysearcheco.aspx>
- Von, P., Lara, I., De la Pava, R., Herrera, J.** (2018). Servicios ecosistémicos y riesgo de su pérdida para las comunidades indígenas: Orientaciones técnicas para la caracterización y mapeo de servicios ecosistémicos y la evaluación del riesgo de su eventual pérdida en las comunidades indígenas. WWF-Colombia. Primera edición. Bogotá, Colombia. 122 pp.
- Whelan, C. J., Wenny, D. G., Marquis, R. J.** (2008). Ecosystem services provided by birds. *Annals of the New York academy of sciences*. **1134** (1): 25-60.

Artículo original

Variación espacial de la comunidad de algas del perifiton en quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia

Spatial variation of the periphyton algae community in streams of the San Juan River basin, Chocó-Colombia

✉ Lidis Maria Martínez-Cuesta, ✉ Zuleyma Mosquera-Murillo*

Grupo de Limnología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Tecnológica del Chocó, Chocó-Colombia

Resumen

El perifiton es una de las comunidades más importantes en los ríos, pues desempeña un papel fundamental en su dinámica en cuanto al flujo de energía, el ciclo de nutrientes y la productividad primaria. En este estudio se analizó la variación espacial de la comunidad de algas del perifiton presentes en quebradas ubicadas en la cuenca media del río San Juan, Chocó, Colombia, así como su relación con las variables fisicoquímicas. La fase de campo se desarrolló entre abril y agosto del 2015 en cinco quebradas en las que se recolectaron algas del perifiton adheridas a piedras sumergidas utilizando un cuadrante de 8 cm² para un área de raspado de 200 cm²; simultáneamente se midieron algunas variables físicas y químicas del agua. La densidad total fue de 2.797,28 org/cm², distribuida en 106 morfoespecies pertenecientes a 17 órdenes, seis clases y cinco divisiones. Bacillariophyta fue la división más representativa en cuanto a densidad y riqueza específica, seguida de la división Charophyta. Hubo diferencias significativas en la diversidad y riqueza entre las quebradas ($p < 0,05$), pero no en la densidad y dominancia ($p > 0,05$). El análisis de agrupamiento reveló poca similitud en la composición de la comunidad de algas del perifiton entre quebradas. Las variables físicas y químicas estuvieron dentro de rangos normales para este tipo de ambientes y se correlacionaron significativamente con la comunidad de algas del perifiton presentes en los ecosistemas. Este estudio constituye una línea base para el conocimiento de las comunidades de algas perifíticas presentes en ambientes lóticos de la zona del San Juan (Chocó), necesario dados los impactos antrópicos a los que se enfrentan las fuentes hídricas de esta zona.

Palabras clave: Composición; Quebradas; Espacial; Algas perifíticas; Río San Juan.

Abstract

The periphyton is one of the most important communities present in rivers because it plays a fundamental role in their dynamics in relation to the energy flow, nutrient cycles, and primary productivity. Here we analyzed the spatial variation of the periphyton algae community present in streams located in the middle basin of the San Juan River, Chocó-Colombia, as well as its relationship with the physicochemical variables. The field phase was developed between April and August 2015 in five streams where we collected the periphyton algae adhered to submerged stones using 8 cm² quadrants for a scraping area of 200 cm²; simultaneously some physical and chemical variables of the water were measured. We registered a total density of 2,797.28 org/cm² distributed in 106 morphospecies belonging to 17 orders, six classes, and five divisions. Bacillariophyta was the most representative division in terms of density and specific richness followed by the Charophyta division. The streams presented significant differences in diversity and richness ($p < 0.05$), but not in density and dominance ($p > 0.05$). The grouping analysis revealed a low similarity in the composition of the periphyton algae community between streams. The physical and chemical variables were found within normal ranges for this type of environment and were significantly correlated with the periphyton algae community present in the ecosystems. This study constitutes a baseline for the knowledge of the periphyton algae communities present in lotic environments in the San Juan area (Chocó) confronted with anthropic impacts in its water sources.

Key words: Composition; Streams; Spatial; Periphyton algae; San Juan River.

Citación: Martínez-Cuesta LM, Mosquera-Murillo Z. Variación espacial de la comunidad de algas del perifiton en quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):192-205, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1593>

Editor: Gabriel Roldán

***Correspondencia:**
Zuleyma Mosquera-Murillo;
zuleymamosquera@gmail.com

Recibido: 5 de noviembre de 2021

Aceptado: 11 de febrero de 2022

Publicado: 23 de marzo de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

El perifiton es una biopelícula que se forma en sustratos sumergidos y constituye una de las comunidades más importantes en los sistemas acuáticos; se compone principalmente de algas y cianobacterias, así como bacterias, hongos y microinvertebrados, que se desarrollan sobre superficies sólidas sumergidas, tales como rocas, sedimento, material vegetal, arenas, hojas y macrófitas (Romaní, 2001; Trbojević, *et al.*, 2018). Su compleja estructura incluye también mucilagos y detritos orgánicos, así como un componente inorgánico procedente de diferentes tipos de partículas (Trbojević, *et al.*, 2018).

Particularmente las algas del perifiton desempeñan un papel fundamental en la dinámica de los ríos y de otros ecosistemas acuáticos: en el ciclo de nutrientes, el flujo de la energía y la productividad primaria. Recientemente, además, se vienen utilizando como indicadores de la calidad del agua, ya que pueden desarrollarse adheridos a diferentes sustratos y reflejan los cambios ocurridos por alteraciones físicas, químicas y biológicas (Pérez, *et al.*, 2007; Steinman, *et al.*, 2016), por lo que es posible obtener información derivada de su presencia o su ausencia como indicación del estado ecológico de su entorno (Lobo, *et al.*, 2016).

Estas comunidades se desarrollan en función de diversos factores, entre los que se destacan la disponibilidad de luz, la temperatura, la transparencia, el tipo y disponibilidad de los sustratos, la dinámica del agua, las concentraciones de nutrientes y materiales disueltos (fósforo, nitrógeno, sílice, carbono, calcio, hierro y cobre, entre otros), el pH y el pastoreo (Biggs, 2000; Stevenson, *et al.*, 2006, Roldán & Ramírez, 2008). Debido a su habilidad para responder a los cambios ambientales, las algas del perifiton han sido utilizadas en estudios ecológicos (Murakami, *et al.*, 2009).

Las características hidrológicas, físicas y químicas, así como las perturbaciones y la heterogeneidad espacial y temporal de los ríos, definen la distribución, la dispersión, la colonización y la respuesta de los organismos al medio (Martínez & Donato, 2003). Hay factores que gobiernan los procesos físicos y morfológicos de los ríos; entre los factores morfológicos están el clima local, la naturaleza de la vegetación riparia, el uso de la tierra en su área de influencia y la intervención directa del hombre por extracción de materiales y modificación del curso (Roldán & Ramírez, 2008).

En Colombia, los trabajos de Zapata & Donato (2005), López-Muñoz & Pérez-Gallego (2014), Bustamante, *et al.* (2008), Pedraza & Donato (2011), Jiménez-Pérez, *et al.* (2014), y Godoy-Lozada & Peláez-Rodríguez (2020) son importantes contribuciones al conocimiento de las algas del perifiton en sistemas lóticos. En el departamento del Chocó son pocos los trabajos publicados sobre esta importante comunidad, aunque se destacan en los ríos los de Abuhatab, *et al.* (2005) y Salas, *et al.* (2011), en ciénagas los de Maturana, *et al.* (2002) y Mosquera-Murillo (2020), y los de Mosquera, *et al.*, (2020) en pozas mineras.

Teniendo en cuenta la escasa información sobre las comunidades de algas del perifiton en los ecosistemas lóticos en el Chocó, es de gran importancia hacer este tipo de estudios sabiendo de la gran diversidad de diferentes grupos biológicos en esta zona y de los procesos antrópicos de tipo minero que se han desarrollado desde hace décadas en el departamento, en especial en la zona del río San Juan (Medina, *et al.*, 2011), con las consecuentes alteraciones en los ecosistemas acuáticos. En este orden de ideas, en el presente estudio se analizó la variación espacial de las comunidades de algas del perifiton, así como su relación con las variables fisicoquímicas en cinco quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó-Colombia, como una forma de contribuir al conocimiento de esta comunidad en los ecosistemas acuáticos de la región y generar una línea de base para futuros programas de conservación, dado el impacto de la actividad minera en la zona.

Materiales y métodos

Área de estudio

La zona de estudio se encuentra localizada en los municipios de Tadó y Unión Panamericana, ubicados en la cuenca media del río San Juan, departamento del Chocó, Colombia (Figuras 1 y 2). La cuenca está entre los 5°16'N y los 76°73'O, y presenta una temperatura

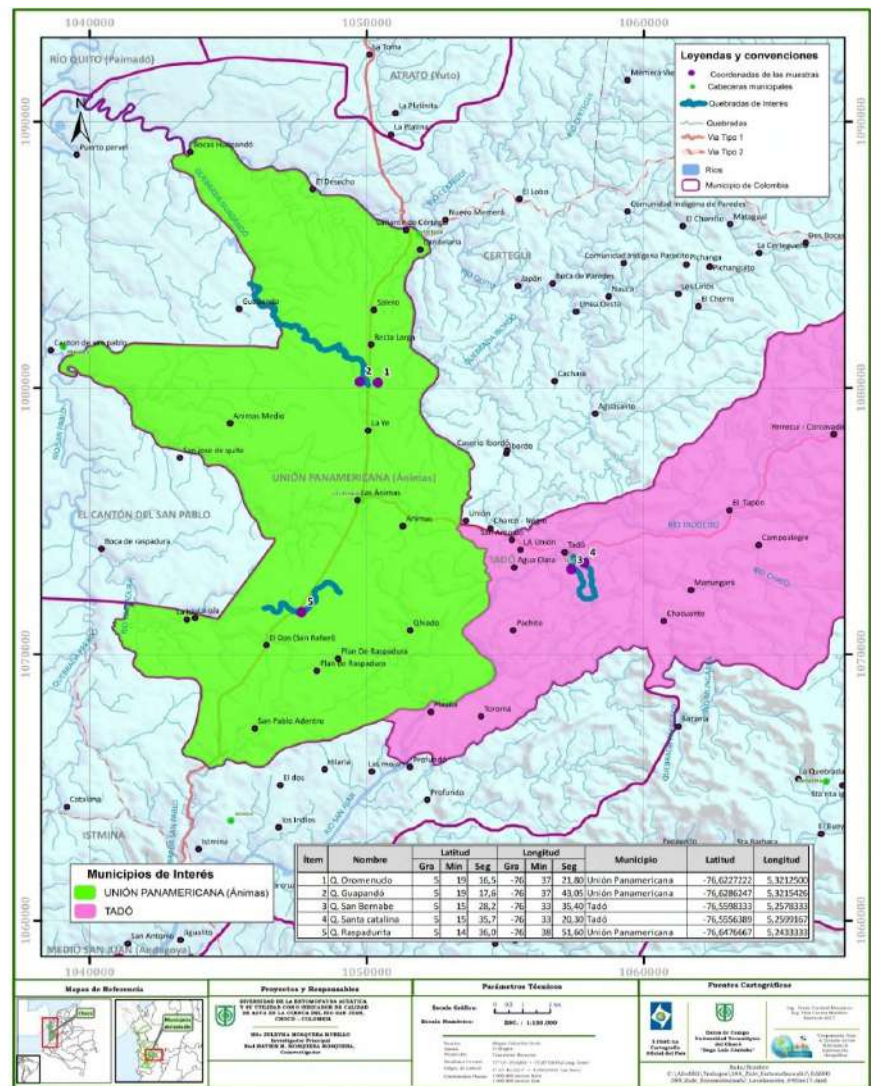


Figura 1. Localización de las quebradas estudiadas en la zona del San Juan, Chocó



Figura 2. Quebradas de la cuenca del río San Juan: a) Quebrada Santa Catalina. b) Quebrada Guapandó. c) Quebrada Raspadurita

entre los 27 y los 29 °C y una precipitación anual promedio que oscila entre los 6.800 y los 7.600 mm; está a una altura de 75 m s.n.m. y pertenece a la zona de vida de bosque pluvial tropical (bp-T) (Holdridge, 1996). En la **tabla 1** se describen las características de las cinco quebradas seleccionadas en la zona de estudio.

Tabla 1. Descripción de las quebradas estudiadas en la cuenca media del río San Juan, Chocó - Colombia

Quebrada	Coordenadas y altitud	Descripción
Quebrada Oromenudo	5°19' LN 76°37' LO 130 msnm	Ancho promedio de 1,44m y profundidad de 0,28m. Temperatura del agua promedio de 26,35°C, velocidad de 0,23m/s y caudal de 0,080m ³ /s. Sustrato cubierto por arena, piedras y hojarasca. La vegetación es la asociada con ambientes de terrazas de material rocoso cubiertas por epifitos (musgos y hepáticas) y especies de helechos, individuos de Cyclanthacea e individuos herbáceos de Rubiaceae.
Quebrada Guapando	5°19' LN 76°34' LO 103msnm	Ancho promedio de 6,6m y profundidad de 0,31m. Temperatura del agua promedio de 26,80°C, velocidad de 0,44m/s y caudal de 0,85m ³ /s. Sustrato cubierto por piedras y guijarros. Vegetación de llanura aluvial con bosque medianamente intervenido, representado a nivel de ribera por las familias Moraceae, Rubiaceae, Acanthaceae, Myristicaceae, Arecaceae, y a nivel del suelo, por Cyclanthaceae y Pteridofitos (helechos) (Figura 2).
Quebrada Santa Catalina	5°15' LN 76°33' LO 95msnm	Ancho promedio de 3,03m y profundidad de 0,32m. Temperatura del agua de 27,57°C, velocidad de 0,31m/s y caudal de 0,27m ³ /s. Sustrato cubierto por arena y piedras. Vegetación de llanura aluvial, con bosque medianamente intervenido representado por las familias Rubiaceae, Melastomataceae (<i>Miconia</i> sp.), Heliconiaceae, Araceae, Dioscoreaceae, Acanthaceae y gramíneas (<i>Paspalum</i> sp.) (Figura 2).
Quebrada Raspadurita	5°14' LN 76°38' LO 133msnm	Ancho promedio de 11,64m y profundidad de 0,46m. Temperatura del agua de 26,30°C, velocidad de 0,49m/s y caudal de 2,52m ³ /s. Sustrato cubierto por piedras de gran tamaño. Vegetación de llanura aluvial, bosque intervenido con individuos de porte arbóreo de algunas familias como Mimosaceae (Pichinde), Myrtaceae, Araceae, helechos (<i>Sticherus</i> sp. y <i>Gleichenia</i> sp.) y algunas gramíneas (Figura 2).
Quebrada San Bernabé	5°15' LN 76°33' LO 94msnm	Ancho promedio de 4,97m y profundidad de 0,35m. Temperatura del agua de 26,37°C, velocidad de 0,39m/s y caudal de 0,63m ³ /s. Sustrato cubierto por piedras y arena. Vegetación de llanura aluvial con bosque altamente intervenido. Se distinguen en sus riberas las familias Melastomataceae (<i>Miconia</i> sp.), helechos (<i>Sticherus</i> sp. y <i>Gleichenia</i> sp.), Araceae, Gramínea (<i>Paspalum</i> sp.), Myristicaceae, Arecaceae y Rubiaceae.

Fase de campo

Los muestreos se hicieron mensualmente entre abril y agosto del 2015; para la recolección de las algas del perifiton en cada quebrada se seleccionaron al azar cinco piedras sumergidas en la corriente, en las cuales se hizo el raspado de la comunidad adherida utilizando como unidad de área un cuadrante de 8 cm² y raspando cinco veces, con lo que se obtuvo un área total de 200 cm²; se tomaron una muestra y una repetición por sección. Posteriormente, la muestra recolectada fue almacenada en frascos de 50 ml con agua estéril y fijada con lugol al 10 % (**Tümping & Friedrich, 1999**).

En cada quebrada estudiada se midieron *in situ* con un equipo digital multiparámetros (HACH HQ30d) el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura del agua, la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos; además, se tomaron muestras de agua para el análisis de nutrientes (nitratos, nitritos, amonio y ortofosfatos) y de la alcalinidad total siguiendo las recomendaciones de la *American Public Health Association (APHA)*, la *American Water Works Association (AWWA)*, y la *Water Environment Federation (WEF)* (2012).

Fase de laboratorio

Las muestras se llevaron al laboratorio de limnología de la Universidad Tecnológica del Chocó, en donde se hizo la identificación taxonómica y la cuantificación de los organismos perifíticos con un microscopio binocular considerando 100 campos con un objetivo de 40X (Uehlinger, 1964), según los trabajos de Förster (1982), Parra, *et al.* (1983), Prescott, *et al.* (1983), Krammer & Lange-Bertalot (1991), Komárek & Anagnostidis (2005), y Bicudo & Menezes (2006), y bases de datos digitales (Guiry & Guiry, 2021). Los organismos unicelulares, las colonias y los filamentos se consideraron como individuos y su cuantificación se obtuvo mediante la fórmula propuesta por Hauer & Lamberti (2007), donde la densidad se expresa como el número de individuos por área de superficie (cm^2).

Análisis de datos

Mediante estadística descriptiva se analizaron los datos físicos y químicos estableciendo el promedio y el coeficiente de variación de Pearson; se empleó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias de los datos físicos y químicos entre quebradas. La diversidad de la comunidad de algas del perifiton se estimó mediante los índices de diversidad de Shannon-Weaver (Shannon & Wiener, 1949) y de dominancia de Simpson (Simpson, 1949), en tanto que la riqueza específica se estimó con la función *diversity* del programa estadístico Past 1.57 (Hammer, *et al.*, 2001). Las diferencias en la densidad y la diversidad totales, y en la riqueza y la dominancia de la comunidad en las quebradas se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA de una vía). Este mismo análisis se empleó para evaluar las diferencias en la proporción de las distintas divisiones de algas entre las quebradas estudiadas; los supuestos inherentes a esta prueba se verificaron como aceptables ($p > 0,05$), las diferencias significativas se registraron con una prueba de Tukey y se usó el programa Minitab (2014). Para comparar la composición de la comunidad de algas del perifiton entre quebradas se hizo un análisis de *cluster*, utilizando el índice de similitud de Bray-Curtis (Magurran, 1988). Además, se empleó un análisis de correlación múltiple para determinar la relación entre las variables físicas y químicas y la densidad total, la diversidad, la dominancia, la riqueza específica, y las divisiones de algas presentes en las quebradas estudiadas utilizando el programa Statgraphics Centurion XV (2006).

Resultados

Variables físicas y químicas

Las variables de oxígeno disuelto, alcalinidad, conductividad eléctrica y amonio presentaron diferencias significativas entre las quebradas estudiadas ($p < 0,05$), siendo el oxígeno disuelto, la alcalinidad y la conductividad eléctrica mayores en la quebrada Santa Catalina, y el amonio en la quebrada Guapando. Las variables restantes no presentaron diferencias significativas; sin embargo, el pH y la temperatura del agua registraron sus mayores valores en la quebrada Santa Catalina y los más bajos en Raspapurita. En el caso de los nutrientes, estos tienden a ser mayores en Raspapurita (nitritos y nitratos) y Santa Catalina (ortofosfatos) (Tabla 2). El oxígeno disuelto, la temperatura del agua y el pH, se caracterizaron por su poca variación ($< 15\%$), en tanto que la alcalinidad, la conductividad y los nutrientes fueron los de mayor variabilidad ($> 25\%$).

Comunidad fitoperifítica

La comunidad de algas del perifiton de las quebradas estudiadas registró una densidad total de 2.797,28 org/ cm^2 , distribuidos en 106 morfoespecies pertenecientes a 26 familias, 17 órdenes, 6 clases y 5 divisiones (Tabla 3). La división Bacillariophyta fue la más representativa, con una densidad promedio de 451,10 org/ cm^2 , seguida por la división Charophyta, con 40,88 org/ cm^2 (Figura 3). No se presentaron diferencias significativas en la densidad de las divisiones entre las quebradas ($p > 0,05$). En términos de riqueza,

Tabla 2. Valores promedios, coeficientes de variación (CV) y resultados del análisis de varianza de las variables físicas y químicas

Variables	Quebradas					CV %	p
	Oro Menudo	San Bernabé	Santa Catalina	Guapando	Raspapurita		
	Promedios						
Oxígeno disuelto (mg. l ⁻¹)	5,69	7,33	7,41	5,96	6,85	11,84	0,001
pH (unidades)	5,84	6,40	6,56	6,55	5,64	6,92	0,301
Temperatura del agua (°C)	26,35	26,37	27,57	26,80	26,20	2,01	0,327
Alcalinidad (mg. l ⁻¹ CaCO ₃)	8,67	11,17	14,75	12,57	6,83	28,98	0,013
Conductividad eléctrica (µS/cm)	7,14	21,25	29,77	22,44	11,23	49,60	0,001
Nitritos (mg. l ⁻¹)	0,13	0,02	0,01	0,19	0,27	89,73	0,736
Nitratos (mg. l ⁻¹)	0,64	0,72	0,11	0,88	1,15	54,73	0,829
Amonio (mg. l ⁻¹)	0,09	0,26	0,08	0,38	0,05	82,77	0,041
Ortofosfatos (mg. l ⁻¹)	0,05	0,05	0,22	0,07	0,09	74,24	0,097

Los valores en negrilla corresponden a las variables que presentaron diferencia significativa entre quebradas

la división Bacillariophyta ocupó el primer lugar, con un promedio de 22 de las morfoespecies, seguida de las Charophytas, con un promedio de 11 morfoespecies por quebrada (**Tabla 3**).

La quebrada Oromenudo registró la mayor densidad de organismos perifíticos (39,23 %), seguida de la quebrada San Bernabé (23,99 %), la Santa Catalina (20,27 %), la Guapando (10,63 %) y la Raspadura (5,88%) (**Figura 3**). La riqueza promedio fue mayor en la quebrada Santa Catalina y menor en la quebrada Raspadura; en el caso de la diversidad, esta fue mayor en la quebrada San Bernabé y menor en la quebrada Oromenudo, y la dominancia fue mayor en Oromenudo y menor en San Bernabé (**Tabla 3**). El análisis de varianza evidenció la existencia de diferencias significativas entre las quebradas estudiadas en cuanto a la diversidad de la comunidad de algas del perifiton (ANOVA, F=4,68; p=0,051) y la riqueza (ANOVA, F=8,85; p=0,017); en el caso de la diversidad, las diferencias se presentaron entre la quebrada Oromenudo y las restantes, en tanto que para la riqueza, las quebradas Bernabé y Santa Catalina difirieron del resto. La densidad y la dominancia no presentaron diferencias significativas entre quebradas (p>0,05) (**Figura 4**).

Solo el 2,83 % de las morfoespecies (3 morfoespecies) se encontró presente en las cinco quebradas, en tanto que el 52,83 % (56 morfoespecies) resultó ser exclusivo de alguna de ellas (**Tabla 3**). Los valores del índice de similitud de Bray-Curtis revelaron un bajo rango aproximado de similitud del 6,95 % en la composición de la comunidad de algas perifíticas entre las cinco quebradas (**Figura 5**), siendo las quebradas de San Bernabé y Santa Catalina las que presentaron mayor afinidad, con un 28,83 %, al compartir algunos taxones de Bacillarioficeas y Charoficeas con 25 morfoespecies, seguidas de Raspadura y Guapando, con el 11,81 % y 12 morfoespecies compartidas.

El análisis de correlación entre las variables físicas, químicas y la comunidad de algas del perifiton demostró correlaciones significativas: la variable riqueza se relacionó con la conductividad eléctrica; el oxígeno disuelto y el pH lo hicieron con la dominancia y la diversidad; las euglenoficeas se asociaron con el oxígeno disuelto; la densidad con las cloroficeas y las bacillarioficeas; las euglenoficeas lo hicieron con la riqueza, la dominancia y la diversidad, y las charoficeas con los nitratos (**Tabla 4**).

Tabla 3. Composición taxonómica y densidad de la comunidad de algas del perifiton en las quebradas estudiadas

División	Orden	Géneros	Q. San Bernabé		Q. Guapando		Q. Santa Catalina		Q. Oromenudo		Q. Raspadura	
			N*	D*	N*	D*	N*	D*	N*	D*	N*	D*
Chlorophyta	Oedogoniales	<i>Oedogonium</i>	1	22,42	2	20,44	1	6,17	1	0,06	1	8,21
		<i>Bulbochaete</i>	1	0,06								
	Sphaeropleales	<i>Microspora</i>	1	2,04	1	2,04			1	67,26		
	Ulotrichales	<i>Ulothrix</i>	1	2,04	1	16,31						
Charophyta	Desmidiaceales	<i>Cosmarium</i>	3	0,18	4	8,27	3	2,16	1	2,10	2	10,37
		<i>Pleurotaenium</i>					1	0,06				
		<i>Bambusina</i>							1	0,06		
		<i>Actinotaenium</i>	2	18,46	2	8,21	2	2,10	3	32,73	1	10,25
		<i>Closterium</i>	6	2,52	3	18,46	5	4,37			4	10,49
	Zygnematales	<i>Spirogyra</i>	1	0,06	1	0,12	2	14,45			1	3,82
		<i>Zygnema</i> sp	1	4,14								
		<i>Mougeotia</i>	1	16,31			1	2,04	2	2,10		
		<i>Cylindrocystis</i>					1	18,34			1	12,23
Bacillariophyta	Cymbellales	<i>Cymbella</i>	2	6,17			2	32,61	1	0,06	1	0,06
		<i>Encyonema</i>	1	18,34								
		<i>Encyonema</i>					1	0,12				
		<i>Gomphonema</i>	2	116,18	1	0,06	3	22,72			1	2,10
	Eunotiales	<i>Eunotia</i>	4	255,37	6	74,33	4	83,75	6	35,07	4	26,68
		<i>Actinella</i>	2	0,12					2	277,20	1	4,08
	Surirellales	<i>Surirella</i>	1	2,04			1	2,04	2	61,15	1	2,04
		<i>Stenopterobia</i>			1	2,04						
	Naviculales	<i>Frustulia</i>	1	0,24	1	6,11	1	8,15	1	87,64	1	46,88
		<i>Pinnularia</i>	3	10,37	3	20,50	4	4,32			2	2,22
		<i>Navicula</i>	2	36,69	3	20,44	4	40,88	1	4,08		
		<i>Diploneis</i>					1	0,06				
		<i>Craticula</i>			1	6,11	1	2,04	1	2,04	1	20,38
		<i>Neidium</i>	1	10,31	1	10,19	1	0,06	1	6,11		
	Bacillariales	<i>Nitzschia</i>	2	2,16	1	0,06	2	0,12	2	460,64		
	Fragilariales	<i>Fragilaria</i>	3	130,45	2	2,04	6	81,89	1	0,06	1	2,04
	Mastogloiales	<i>Achnanthes</i>	1	4,08			2	201,78				
Euglenophyta	Euglenida	<i>Euglena</i>	1	0,06	2	2,1						
		<i>Trachelomonas</i>							1	4,08	1	2,04
Cyanobacteria	Oscillatoriales	<i>Oscillatoria</i>			1	77,45	1	0,06			1	0,12
		<i>Lyngbya</i>			1	2,04	2	34,65			1	0,36
	Synechococcales	<i>Pseudanabaena</i>	1	2,04			1	2,04				
	Nostocales	<i>Scytonema</i>	1	8,21								
		<i>Stigonema</i>							1	55,03		
	Spirulinales	<i>Spirulina</i>						0,06				
Densidad promedio (org/cm2)				671,05		297,32		567,04		1097,47		164,37
Diversidad promedio				2,27		2,09		2,14		1,32		2,11
Riqueza promedio				30		23		33		18		17
Dominancia promedio				0,18		0,21		0,22		0,42		0,19

N: No. morfoespecies D: Densidad

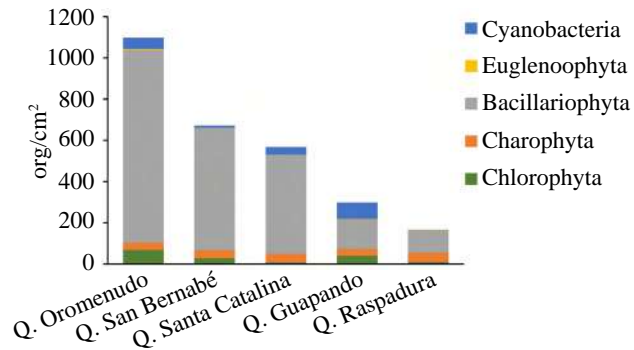


Figura 3. Densidad promedio (org/cm²) y contribución por divisiones de la comunidad de algas del perifiton en las quebradas estudiadas

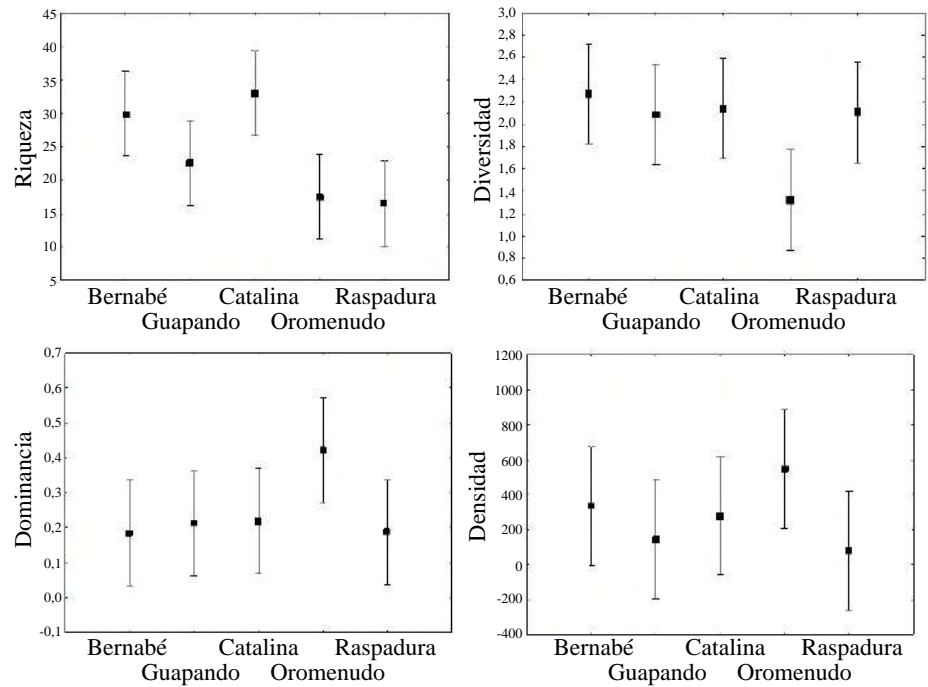


Figura 4. Gráfico de medias para la densidad, diversidad, riqueza específica y dominancia de la comunidad de algas del perifiton en cinco quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó-Colombia

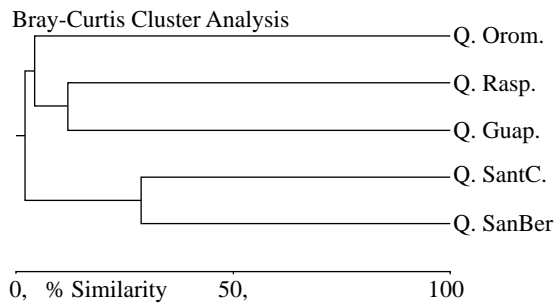


Figura 5. Similitud de la comunidad de algas del perifiton de las quebradas estudiadas mediante el índice de Bray-Curtis. NSanBer: quebrada San Bernabé; SantC: quebrada Santa Catalina; Guap: quebrada Guapandó; Rasp: quebrada Raspadurita; Orom: quebrada Oromenudo

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables físicas y químicas y los índices ecológicos y grupos perifíticos presentes en las quebradas estudiadas. * $p < 0,05$; significativo; ** $p < 0,01$; muy significativo; NS: no significativo

Parámetros	Densidad	Riqueza	Dominancia	Diversidad	Oxígeno disuelto	pH	Conductividad	Nitratos
Densidad		0,17NS	0,35NS	-0,29NS	-0,35NS	0,46NS	-0,05NS	-0,18NS
Riqueza	0,17NS		-0,35NS	0,55NS	0,54NS	0,04NS	0,74**	-0,53NS
Dominancia	0,35NS	-0,35NS		-0,93**	-0,64*	-0,79**	-0,28NS	0,07NS
Diversidad	-0,29NS	0,55NS	-0,93**		0,74**	-0,72**	0,42NS	0,15NS
Euglenophyta	0,15NS	-0,74**	0,69*	-0,77**	-0,62*	0,39NS	-0,57NS	0,04NS
Chlorophyta	0,65*	0,09NS	0,48NS	-0,34NS	-0,49NS	0,33NS	-0,35NS	-0,07NS
Bacillariophyta	0,98**	0,20NS	0,32NS	-0,28NS	-0,30NS	0,49NS	-0,01NS	-0,04NS
Charophyta	0,28NS	0,04NS	-0,51NS	0,44NS	0,13NS	-0,48NS	0,14NS	0,64*

Discusión

Variables físicas y químicas

En las quebradas estudiadas los parámetros medidos se encontraron dentro de los rangos normales para este tipo de ambientes, con valores relativamente altos de oxígeno disuelto ($>5,50 \text{ mg. l}^{-1}$), pH ligeramente ácido ($<6,60$ unidades), así como alta temperatura del agua ($>26 \text{ }^\circ\text{C}$). Estos valores de oxígeno disuelto y de pH coinciden con los reportados por **Mosquera & Córdoba** (2015) en quebradas ubicadas en la zona del San Juan en el Chocó. En cuanto a la temperatura del agua, los valores superiores a $26 \text{ }^\circ\text{C}$ registrados en las quebradas son característicos de los ambientes acuáticos ubicados en regiones tropicales, con valores entre 25 y $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (**Roldán & Ramírez**, 2008). Asimismo, los valores de alcalinidad fueron bajos ($<50 \text{ mg. l}^{-1}$), al igual que los de conductividad ($<20 \text{ } \mu\text{S/cm}$), pero se encuentran dentro de los rangos reportados para ecosistemas neotropicales colombianos (**Roldán & Ramírez**, 2008). En el caso de los nutrientes, solo los ortofosfatos superaron los valores aceptables en agua naturales, que es de $0,05 \text{ mg. l}^{-1}$ (**Piedrahita**, 1988), lo cual puede estar asociado a la presencia de pequeños poblados en las cercanías de algunos de los ecosistemas acuáticos; sin embargo, fueron similares a los reportados por **Mosquera & Córdoba** (2015) en quebradas de la misma zona.

Comunidad fitoperifítica

En todas las quebradas estudiadas la comunidad de algas del perifiton estuvo dominada en abundancia y riqueza por la división Bacillariophyta, lo cual coincide con otras investigaciones realizadas en sistemas lóticos como las de **Montoya & Ramírez** (2007), **Bustamante, et al.** (2008), **Pedraza & Donato** (2011), **Marín-Villegas, et al.** (2011), **De la Parra-Guerra, et al.** (2017), y **Huertas, et al.** (2019). Según **Ramírez & Plata** (2008), los miembros de la división Bacillariophyta suelen ser comunes y abundantes en ecosistemas lóticos gracias a su capacidad de ocupar con rapidez los sustratos y a la presencia de estructuras especializadas que les permiten a los individuos fijarse al sustrato con mayor facilidad y competir con ventaja frente a otros grupos, además de soportar cambios de temperaturas y altos niveles de perturbación ser potencialmente capaces de colonizar diversas zonas de un cuerpo lótico a pesar de su heterogeneidad (**Ramírez, et al.**, 2009). Igualmente, la riqueza exhibida por esta división se atribuye a la capacidad que tiene para desarrollarse en hábitats bentónicos, los cuales le ofrecen una variedad de microhábitats disponibles para su colonización, y variables físicas y químicas que definen el tipo de organismos que crecen en el sustrato, lo que se asocia a las estrategias de crecimiento que estas exhiben (**Cavati & De Oliveira**, 2008; **Flynn, et al.**, 2013).

Los restantes grupos perifíticos presentaron abundancias muy inferiores, lo que podría asociarse con los requerimientos particulares de estos grupos de algas. En el caso de las divisiones Chlorophyta y Charophyta, su presencia se asocia con aguas ricas en nutrientes

y con una relación P:N alta (Pinilla & Duarte, 2006), presentando su mayor desarrollo en medios alcalinos (Ramírez, 2000; Martín, *et al.*, 2004), en tanto que las cianobacterias suelen proliferar en zonas con alta penetración de luz y con alta perturbación (Komarek, 2003); por su parte, las euglenofitas se encuentran de forma ocasional, ya que son características de ambientes con alto contenido de materia orgánica de origen natural, y flujos y ambientes lénticos (Vilches, *et al.*, 2016).

Desde el punto de vista espacial, las variaciones observadas en diversidad y riqueza entre las quebradas pueden atribuirse a su ubicación particular en zonas alejadas de asentamientos urbanos y de perturbaciones de tipo antrópico, como es el caso de las quebradas Santa Catalina y San Bernabé, las cuales exhibieron los mayores valores de riqueza y diversidad, en tanto que una quebrada como Raspadura presentó bajos valores de estas variables por estar sujeta a una mayor actividad antrópica, ya que es un balneario popular en la zona. Según Stevenson, *et al.* (1996), la distribución de los organismos perifíticos depende significativamente de las características físicas del sustrato y de la dinámica física del entorno, de manera que factores como la geología, la topografía y los usos del suelo en las áreas de influencia directa de los cuerpos de agua tienden a ser factores relevantes a gran escala en la ecología de estos organismos (Stevenson, 1997; Potapova & Donald, 2002).

Un alto porcentaje de morfoespecies fue exclusivo de alguna de las cinco quebradas (Tabla 3) y solo los géneros *Oedogonium*, *Frustulia* y *Actinotaenium* se encontraron presentes en los cinco ecosistemas en estudio. Estos resultados evidencian una variabilidad significativa en la composición de morfoespecies de algas perifíticas en estas quebradas, lo que estaría asociado a las características del sustrato y de la dinámica del entorno en relación con los usos del suelo en sus áreas de influencia directa. Según Felisberto, *et al.* (2001), el predominio de diferentes grupos de microalgas y cianobacterias en determinados ecosistemas es función, principalmente, de las características predominantes del medio ambiente; asimismo, estos organismos están sujetos a una serie de factores presentes en los ambientes acuáticos (nutrientes, luz, pH, temperatura, sustrato, entre otros), lo que se refleja positiva o negativamente en su dinámica espacial (Lowe, 1996; Reynolds, 2006), y su distribución tiende a ser altamente dependiente de las características del sustrato y de la dinámica física del entorno (Stevenson, *et al.*, 1996).

El género *Oedogonium* es cosmopolita y habita principalmente en aguas quietas o con poco movimiento en un amplio rango de condiciones ecológicas (Bellinger & Sigee, 2015); por su parte, *Frustulia* es un género frecuente en agua dulce, capaz de producir matrices mucilaginosas que facilitan su fijación al sustrato y son a menudo dominantes en los ambientes acuáticos, sobre todo los de tipo oligotrófico y pH ácido (Werum & Lange-Bertalot, 2004; Metzeltin & Lange-Bertalot, 2009). Asimismo, el género *Actinotaenium* es frecuente en ecosistemas oligotróficos de pH ácido (Hall, *et al.*, 2008).

En cuanto a las correlaciones observadas entre las variables físicas, químicas y la comunidad de algas del perifiton, diversos estudios han demostrado la importancia de variables como el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura y los nutrientes en la composición, abundancia y riqueza de la comunidad perifítica en ecosistemas acuáticos (Verb & Vis, 2005; Soininen, 2007; Montoya & Ramírez, 2007; Pedraza & Donato, 2011; Rusanov, *et al.*, 2012). Según Hill, *et al.* (2000), las comunidades fitoperifíticas resultan ser muy dependientes de las condiciones ambientales y en especial de la química del agua, ya que estas variables actúan sobre su desarrollo al afectar su fisiología, influenciado también en sus variaciones espaciales y temporales (Oliveira-Martins, 2006)

Conclusión

La densidad y la dominancia de las comunidades de algas del perifiton en las quebradas estudiadas no presentaron variaciones espaciales importantes; sin embargo, la riqueza y la diversidad evidenciaron cambios significativos asociados con la ubicación específica de las quebradas en zonas alejadas de asentamientos urbanos y de perturbaciones de tipo antrópico, así como a la variación observada en las formas de nitrógeno y ortofosfatos

entre las quebradas estudiadas. Las diatomeas fueron el grupo dominante en densidad y riqueza, coincidiendo con lo reportado en otras investigaciones de este tipo en el país, en tanto que grupos como Euglenoficeas y Cianoficeas tuvieron baja representatividad, lo que se asocia con sus requerimientos particulares. Asimismo, se evidenciaron correlaciones significativas entre la comunidad de algas del perifiton y las variables físicas y químicas analizadas. El presente estudio constituye una línea base para el conocimiento de las comunidades perifíticas que se desarrollan en sistemas lóticos de las cuencas del departamento del Chocó.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a la Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología del Banco de la República por la financiación de la fase de campo de esta investigación y a la Universidad Tecnológica del Chocó, por facilitar la infraestructura de campo y laboratorios.

Contribución de los autores

LMMC: determinación de las muestras, colaboración en el análisis e interpretación de resultados y su discusión y en la redacción del informe final; ZMM: asesoría continua en el proceso de determinación de las muestras, análisis e interpretación de resultados y su discusión, y redacción del informe final.

Conflicto de intereses

Las autoras declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Abuhatab, Y. A., Geovo, S., Asprilla, S.** (2005). Incidencia de las variaciones fisicoquímicas del agua sobre la colonización del fitoperifiton en un sustrato artificial en la quebrada La Francisca, Quibdó, Chocó - Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó*. **23** (1): 26-33.
- APHA, AWWA, WEF.** (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22nd ed. Washington, USA: American Public Health Association. 1360 p.
- Bellinger, E. G. & Sigee, D. C.** (2015). *Freshwater algae: identification, enumeration and use as bioindicators*. John Wiley & Sons. 275 p.
- Bicudo, E.M. & Menezes, M.** (2006). *Gêneros de algas de águas continentais do Brasil (Chave de identificação e descrições)*. 2 ed. São Carlos, Brasil: RiMa Editora. 502 p.
- Biggs, B. J. F.** (2000). Eutrophication of streams and rivers: dissolved nutrient-chlorophyll relationships for benthic algae. *Journal of the North American Benthological Society*. **21**: 17-31.
- Bustamante, C. A., Dávila, C. A., Torres, S. L., Ortíz, J. F.** (2008). Composición y abundancia de la comunidad de fitoperifiton en el río Quindío. *Rev. Invest. Univ. Quindío*. **20**: 15-21.
- Cavati, B. & De Oliveira, F.** (2008) Algas perifíticas em dois ambientes do baixo rio Doce (lagoa Juparanã e rio Pequeno – Linhares, Estado do Espírito Santo, Brasil): variação espacial e temporal. *Acta Scientiarum Biological Sciences*. **30** (4): 439-448.
- De la Parra-Guerra, A., García-Alzate, C., Rodelo-Soto, K., Gutiérrez-Moreno, L.** (2017). Composición y estructura fitoperifítica de la cuenca media y baja del río Cesar, departamento Cesar-Colombia. *Revista MVZ Córdoba*. **22** (2): 5938-5950.
- Felisberto, S. A., Rodrigues, L., Leandrini, J. A.** (2001). Chlorococcales registradas na comunidade perifítica no reservatório Corumbá, Estado de Goiás, Brasil, antes e após o represamento das águas. *Acta Scientiarum*. **23** (2): 275-282.
- Flynn, K., Chapra, S., Suplee, M.** (2013) Modeling the lateral variation of bottom-attached algae in rivers. *Ecological Modelling*. **267**: 11-25.
- Godoy-Lozada, D. & Peláez-Rodríguez, M.** (2020). Diversidad y distribución de la comunidad fitoperifítica presente en un río andino amazónico y su relación con variables ambientales. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **44** (171): 437-451.
- Guiry, M.D. & Guiry, G.M.** (2019). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Fecha de consulta: accedida entre enero y julio de 2021. Disponible en <http://www.algaebase.org>.

- Hall, J.D., Karol, K.G., McCourt, R.M., Delwiche, C.F.** (2008). Filogenia de las algas verdes en conjugación basada en datos de secuencia de nucleótidos mitocondriales y de cloroplasto. *Journal of Phycology*. **44**: 467-477.
- Hammer, O., Harper, D.A.T., Ryan, P.D.** (2001). PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. **4**: 1-9.
- Hauer, F.R. & Lamberti, G.A.** (Eds). (2007). *Methods in stream ecology*. 2nd ed. San Diego, USA: Academic Press. 895 p.
- Hill, B.H., Herlihy, A.T., Kaufmann, P.R., Stevenson, R.J., McCormick, F.H., Johnson, C.B.** (2000). Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity. *J. North American Benthological Society*. **19** (1): 50-67. <https://doi.org/10.2307/1468281>
- Holdridge, R.L.** (1996). Ecología basada en zonas de vida. Instituto Inter. Americano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José de Costa Rica. 1-6.
- Huertas-Farías, K., Tatiana-Parra, Y., Reinoso, G.** (2019). Aspectos ecológicos de la comunidad fitoperifítica en el río Anchique, cuenca andina colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **43** (166): 98-107.
- Jiménez-Pérez, P., Toro-Restrepo, B., Hernández-Atilano, E.** (2014). Relación entre la comunidad de fitoperifiton y diferentes fuentes de contaminación en una quebrada de los Andes colombianos. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de Caldas*. **18** (1): 49-66.
- Komárek, J.** (2003). Coccoid and Colonial Cyanobacteria. Pp: 59-116. En: Wehr, J., R. Sheath (Eds.). *Fresh Water Algae of North America. Ecology and Classification*. Academic Press. USA.
- Komárek, J. & Anagnostidis, K.** (2005). Cyanophyta part 2: Oscillatoriales. In: Büdel, B., Krienitz, L., Gärtner, G., Schagerl, M. (ed.). *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 19/2*. München, Germany: Spektrum Akademischer Verlag, Elsevier.
- Krammer, K. & Lange-Bertalot, H.** (1991). 2/3 Bacillariophyceae. 2. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heyning, H., Mollenhauer, D. (eds). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart, Germany: Gustav Fischer Verlag.
- Lobo, E. A., Heinrich, C. G., Schuch, M., Wetzel, C. E., Ector, L.** (2016). Diatoms as bioindicators in rivers. *River Algae*. **1**: 245-271.
- López-Muñoz, M.T. & Pérez-Gallego, C.M.** (2014). Dinámica espacial y temporal de los géneros ficoperifíticos del río La Miel (cuenca del río Magdalena), aguas abajo del embalse Amaní (Caldas, Colombia), entre 2006 y 2009. *Biota Colombiana*. **15** (2): 127-151.
- Lowe, R.L.** (1996). Periphyton patterns in lakes. In, Stevenson, R.J., Bothwell, M.L., Lowe, R.L. (Eds). *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems*. Academic Press, San Diego, p. 57-76.
- Magurran, A.E.** (1998). *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press. New Jersey. 179 p.
- Marín-Villegas, N. C., Corredor-Coy, N. V., Bustamante-Toro, C. A.** (2011). Aspectos ecológicos de comunidades bénticas de un sistema fluvial andino, Armenia-Quindío, Colombia. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*. **22** (1): 58-69.
- Martín, G., Alcalá, E., Solá, C., Plazuelo, A., Burgos, M.D., Reyes, E., Toja, J.** (2004). Efecto de la contaminación minera sobre el perifiton del río Guadamar. *Limnética*. **23** (3-4): 315-330.
- Martínez, L. & Donato, J.** (2003). Efectos del caudal sobre la colonización de algas en un río de alta montaña tropical (Boyacá, Colombia). Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia. *Limnología. Revista Caldasia*. **25** (2): 337-354.
- Maturana, M., Cuesta, J., Asprilla, S.** (2002). Estructura de la comunidad de ficoperifiton en *Nymphoides* sp. en la ciénaga Plaza Seca, corregimiento de Sanceno, municipio de Quibdó - Chocó, Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó*. **8**: 21-27.
- Medina-Mosquera, F. M., Ayala-Mosquera, H. J., Perea, J. D.** (2011). Determinación de la contaminación mercurial en personas vinculadas con la minería de oro en el Distrito Minero del San Juan, departamento del Chocó, Colombia. *Bioetnia*. **8** (2):195-206.
- Metzeltin, D. & Lange-Bertalot, H.** (2009). Tropical diatoms of South America II. Special remarks on biogeographic disjunction. *Iconographia diatomologica*. **18**: 1-877.
- Minitab INC 17.1.0.** (2014). *Minitab Statistical Software*. State College, Pennsylvania, USA: Minitab Inc.
- Montoya, M. & Ramírez, J. J.** (2007). Variación estructural de la comunidad perifítica colonizadora de sustratos artificiales en la zona de ritral del río Medellín, Colombia. *Revista de Biología Tropical*. **55**: 585-593.
- Mosquera-Murillo, Z.** (2020). Fitoperifiton asociado con macrófitas en una ciénaga tropical de la cuenca del río Atrato, Quibdó (Chocó), Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **44** (173): 1060-1072.

- Mosquera-Murillo, Z., Martínez-Cuesta, L. M., Murillo-Mosquera O., Mosquera-Perea, M. Y.** (2020). Phytoplankton associated with lagoons generated by mining, San Juan River basin, Chocó-Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. **23** (2): e1156.
- Mosquera, Z. & Córdoba, K.E.** (2015). Caracterización de la entomofauna acuática en cuatro quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **39** (150): 67-76.
- Murakami, E.A., Bicudo, D.C., Rodrigues, L.** (2009). Periphytic algae of the Garças Lake, Upper Paraná River floodplain: comparing the years 1994 and 2004. *Brazilian Journal of Biology*. **69**: 459-468.
- Oliveira-Martins, F.C.** (2006). Respostas ecofisiológicas da comunidade perifítica in situ a diferentes condições ambientais no rio Santa Maria da Vitória, ES. Tesis de Maestría. Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo. 132 p.
- Parra, O., González, M., Dellarossa, V.** (1983). Manual taxonómico del fitoplancton de aguas continentales; con especial referencia al fitoplancton de Chile. Concepción, Chile: Editorial de la Universidad de Concepción. 353 p.
- Pedraza, E. & Donato, J.** (2011). Diversidad y distribución de diatomeas en un arroyo de montaña de los Andes colombianos. *Caldasia*. **33**: 177-191.
- Pérez, R., Pineda, R., Medina, M.** (2007). Integridad biótica de ambientes acuáticos. Primera edición. Instituto Nacional de Ecología. México. 83 p.
- Piedrahíta, R.H.** (1988). Introducción al modelado por computadora de ecosistemas de estanques acuáticos. Investigación sobre acuicultura. **19** (1): 1-12.
- Pinilla, G. & Duarte, J.** (2006). La importancia ecológica de las ciénagas del Canal del Dique y la determinación de su estado limnológico. Cormagdalena – Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 97 p.
- Potapova, M.G. & Donald, F.C.** (2002). Benthic diatoms in USA rivers: distributions along spatial and environmental gradients. *Journal of Biogeography*. **29**: 167-187.
- Prescott, G.W.** (1983). How to know the freshwater algae, third ed., Iowa, USA: W.C. Brown. 293 p.
- Ramírez, C. A. & Plata, D. Y.** (2008). Diatomeas perifíticas en diferentes tramos de dos sistemas lóticos de alta montaña (páramo De Santurbán, Norte de Santander, Colombia) y su relación con las variables ambientales. *Acta biol. Colomb.* **13** (1): 199-216.
- Ramírez, J.** (2000). Fitoplancton de agua dulce: aspectos ecológicos, taxonómicos y sanitarios. Medellín. Universidad de Antioquia. ¿p?
- Reynolds, C.S.** (2006) Ecology of phytoplankton. Cambridge, Cambridge University Press. 551 p.
- Roldán, G. & Ramírez, J.J.** (2008). Fundamentos de Limnología Neotropical. 2ª ed. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia-ACCEFYN-Universidad Católica de Oriente. 442 p.
- Romaní, A.** (2001). Biofilms Fluvial. Institut d' Estudis Catalans d' Ecologia, Arxius de les Seccions de Ciències, Secció de Ciències Biològiques. Barcelona. 254 p.
- Rusanov, A. G., Stanislavskaya, E. V., Acs, E.** (2012). Periphytic algal assemblages along environmental gradients in the rivers of the Lake Ladoga basin, Northwestern Russia: implication for the water quality assessment. *Hydrobiologia*. **695**: 305-327.
- Salas, Y., Geovo, S., Córdoba, K., Asprilla, S.** (2011). Caracterización de las comunidades perifíticas y de macroinvertebrados acuáticos presentes en el río Pacurita, corregimiento de Pacurita, Quibdó, Chocó-Colombia. *Revista Biodiversidad Neotropical*. **1** (2): 98-104.
- Shannon, C. E. & Wiener, W.** (1949). The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, USA. 117 p.
- Simpson, E. H.** (1949). Measurement of diversity. *Nature*. **163**: 689-698.
- Soininen, J.** (2007). Environmental and spatial control of freshwater diatoms - a review. *Diatom Research*. **22**: 473-490.
- Statgraphics Centurion XV.** (2006). Programa de ordenador. Versión Centurion XV. E.U.A: Stat Point, Inc.
- Steinman, A., Abdimalik, M., Ogdahl, M.E., Oudsema, M.** (2016). Understanding planktonic vs. benthic algal response to manipulation of nutrients and light in a eutrophic lake. *Lake and Reservoir Management*. **32** (4): 402-409.
- Stevenson, R.J., Bothwell, M.L., Lowe, R.L.** (1996). Algal ecology of freshwater benthic ecosystems. Academic Press. New York. 753 p.
- Stevenson, R.J.** (1997). Scale-dependent determinants and consequences of benthic algal heterogeneity. *Journal of the North American Benthological Society*. **16**: 248-262.

- Stevenson, R. J., Rier, S. T., Riseng, C. M., Schultz, R. E., Wiley, J.** (2006). Comparing effects of nutrients on algal biomass in streams in two regions with different disturbance regimes and with applications for developing nutrient criteria. *Hydrobiologia*. **561**: 149-165.
- Trbojević, I., Jovanović, J., Kostić, D., Popović, S., Predojević, D., Karadžić, V., Subakov-Simić, S.** (2018). Periphyton Developed on Artificial Substrates: Effect of substrate type and incubation depth. *Russian Journal of Ecology*. **49** (2): 135-142.
- Tümping, W.V. & Friedrich, G.** (eds.). (1999). *Methoden der Biologischen Wasseruntersuchung. Biologische Gewässeruntersuchung*. **2**: 310-331.
- Uehlinger, V.** (1964). Étude statistique des Méthodes de dénombrement planctonique. *Archives des sciences*. **17** (2):121-223.
- Verb, R. G. & Vis, M. L.** (2005). Periphyton assemblages as bioindicators of mine-drainage in unglaciated Western Allegheny Plateau lotic systems. *Water, Air, and Soil Pollution*. **161**: 227-265.
- Vilches, C., Casco, M., Giorgi, A.** (2016). El perifiton como indicador de contaminación difusa: el caso de la cuenca superior del río Reconquista (Buenos Aires, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. **51** (4): 579-595.
- Werum, M. & Lange-Bertalot, H.** (2004). Diatoms in springs. *Iconographia diatomologica*. **13**: 1-417.
- Zapata, A. M. & Donato, J. C.** (2005). Cambios diarios de las algas perifíticas y su relación con la velocidad de corriente en un río tropical de montaña (río Tota-Colombia). *Limnetica*. **24**: 327-338.

Artículo original

Variación estructural de familias de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad del agua en quebradas asociadas con cultivos de café y ganadería vacuna en el sector de La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta

Structural variation of families of aquatic macroinvertebrates and their relationship with the quality of water in streams associated with coffee crops and beef cattle in La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta

✉ Melizza Tobias-Loaiza*, 📧 Cristian Guzmán-Soto

Grupo de Investigación en Biodiversidad y Ecología Aplicada, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Resumen

Los ecosistemas tropicales se ven fragmentados y afectados por las actividades humanas. Es muy importante comprender cómo estas actividades inciden en la biodiversidad con miras a la conservación y el manejo de los ecosistemas acuáticos. En este estudio se evaluó la variación estructural de las familias de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad del agua en quebradas asociadas con cultivos de café y ganadería vacuna en el sector de La Tagua en la Sierra Nevada de Santa Marta. Se seleccionaron tres sitios de muestreo: uno con influencia de ganadería (La Cuca), otro cercano a cultivos de café (La Marrana) y un área sin intervención productiva evidente que sirvió como sitio de referencia (Doña Sofía). Se recolectaron 7.367 individuos distribuidos en 29 familias y 10 órdenes. Los órdenes con mayor número de familias fueron Díptera, Trichoptera y Hemiptera, con cinco familias cada uno. Se comprobaron diferencias significativas en las abundancias de las familias entre los sitios (Anosim: $R=0,026$; $p=0,035$). Según el índice BMWP-Col (*Biological Monitoring Working Party*), la quebrada La Cuca presentó aguas moderadamente contaminadas, en tanto que en La Marrana el agua estaba levemente contaminada y en la quebrada Doña Sofía tenía buena calidad. Por último, las familias tolerantes a la contaminación orgánica se encontraron en las quebradas cercanas a los cultivos de café y lugares con ganado vacuno, en tanto que en la quebrada de referencia se registró un aumento de la abundancia y el número de familias sensibles a los niveles de contaminación.

Palabras claves: Bioindicador; Índice BMWP; Agricultura; Ganadería.

Abstract

Tropical ecosystems are fragmented and affected by human activities. Understanding how these activities affect biodiversity is very important for the conservation and management of aquatic ecosystems. In the present study, we evaluated the structural variation of the families of aquatic macroinvertebrates and their relationship with water quality in streams associated with coffee crops and beef cattle in La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta. We selected three sampling sites: one with the influence of beef cattle (La Cuca), another close to coffee crops (La Marrana), and an area without evident productive intervention that served as a reference site (Doña Sofía). A total of 7367 individuals were collected distributed in 29 families and 10 orders. The orders with the highest number of families were Diptera, Trichoptera, and Hemiptera with five families each. Significant differences were found in the abundances of the families between the sites (Anosim: $R = 0.026$; $p = 0.035$). According to the BMWP-Col index, La Cuca stream presented moderately polluted water while in La Marrana the water was slightly contaminated and, in the Doña Sofía, it had good quality.

Citación: Tobias-Loaiza M, Guzmán-Soto C. Variación estructural de familias de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad del agua en quebradas asociadas con cultivos de café y ganadería vacuna en el sector de La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):206-216, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1577>

Editor: Gabriel Roldán

***Correspondencia:**

Melizza Tobias-Loaiza;
melizatatobias.26@gmail.com

Recibido: 8 de octubre de 2021

Aceptado: 10 de marzo de 2022

Publicado: 23 de marzo de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Finally, families tolerant to organic contamination were associated with streams close to coffee crops and beef cattle while in the reference stream we registered an increase in the abundance and the number of families sensitive to levels of contamination.

Keywords: Bioindicator; BMWP index; Agriculture; Livestock.

Introducción

Los ecosistemas de agua dulce, como los ríos, quebradas, lagos y lagunas, son muy vulnerables debido a que reciben todos los contaminantes producto de las actividades agropecuarias que representan el vertimiento de grandes cantidades de sedimentos y agroquímicos en los cuerpos de agua (**Dudgeon, 2008; Lasso, et al., 2015**).

Se ha descrito cómo las cuencas urbanizadas presentan grandes impactos negativos que se reflejan en la composición fisicoquímica del agua y en las características del hábitat (**Walsh, et al., 2005**). Tales cambios alteran las condiciones de los ecosistemas y, por lo tanto, la diversidad de los organismos que viven en ellos (**Roy, et al., 2016**). La evaluación de las respuestas de los organismos acuáticos a las perturbaciones ocasionadas por la actividad humana es particularmente importante en regiones de gran diversidad que a menudo están amenazadas y han sido poco estudiadas (**Jantz, et al., 2015**).

Los macroinvertebrados acuáticos son considerados organismos indicadores y se usan para evaluar la calidad del agua en los ecosistemas dulceacuicolas (**Vannote, et al., 1980; Hodkinson & Jackson, 2005; Ruaro, et al., 2016**). Las larvas de algunas familias responden rápidamente a los cambios del microhábitat causados por factores como la contaminación, la sedimentación y la escasez de recursos, lo que se refleja en cambios en la diversidad (**Gómez-Anaya, 2009**).

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es un macizo montañoso situado en el norte de Colombia, cuyos picos, tan altos como los de los Andes, permanecieron aislados por estar rodeados de extensos valles de poca elevación. Este aislamiento y la variedad de regiones climáticas y zonas de vida hacen de esta región una de las más diversas de Colombia, con altos niveles de endemismo (**Camero, 2003; Unidad Administrativa Especial Del Sistema De Parque Nacionales Naturales - UAESPNN, 2005**). Aunque parte de la SNSM está protegida como parque nacional, se evidencian importantes procesos de alteración de su cobertura vegetal y de sus dinámicas, así como la fragmentación de los sistemas hídricos, causada principalmente por actividades antropogénicas como la deforestación, el turismo recreativo, y la producción agropecuaria, entre otras, lo que ha provocado, directa e indirectamente, una fragmentación gradual del hábitat que podría conducir a un detrimento irreversible de su diversidad (**Gordon, 1985; UAESPNN, 2005; Tamaris-Turizo, et al., 2013**).

En dicho contexto, este estudio pretendió hacer un aporte científico que permita disminuir las brechas de conocimiento en torno a la respuesta de las comunidades acuáticas a las actividades humanas mediante la evaluación del grado de variación estructural de familias de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad de agua utilizando el índice BMWP/Col (**Roldán, 2003**) en quebradas asociadas con cultivos de café y ganado vacuno. Se analizó, además, una quebrada sin intervención productiva como sitio de referencia.

Materiales y métodos

Sitios de muestreo

Se seleccionaron tres quebradas en la cuenca del río Toribio: La Cuca, La Marrana y Doña Sofía (**Figura 1**). La Cuca se encuentra a 1.506 m s.n.m., entre los 11°5'12,48"N y los 74°2'59,23"O. Se caracteriza por senderos en su ribera donde constantemente transita ganado de una finca a otra. La quebrada La Marrana se encuentra a 1.552 m s.n.m., entre los 11°4'49,08"N y los 74°2'23,00"O, en la vecindad de cultivos de café muy cercanos al cuerpo de agua, por lo que recibe todos los desechos del lavado y la producción del café. Sin embargo, esta zona presenta un bosque de galería en buen estado de conservación. Por

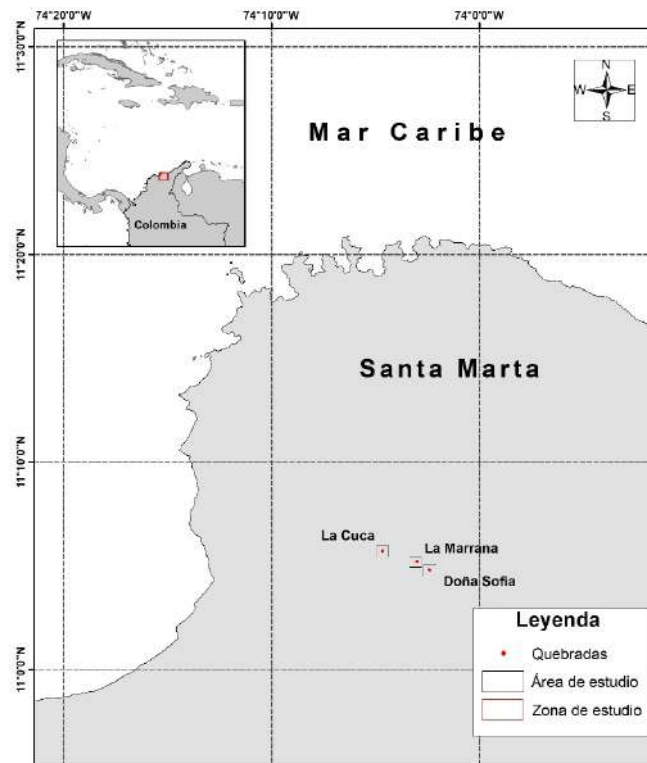


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreos

último, el tercer sitio de muestreo es conocido por los habitantes del sector como quebrada Doña Sofía; se ubica a 1.600 m s.n.m., entre los 11°5'42,72"N y los 74°4'38,86"O, y en sus alrededores no hay actividades productivas; se caracteriza, además, por tener un bosque de ribera conservado de dosel cerrado.

Fase de campo

En cada una de las quebradas se hicieron dos muestreos mensuales, uno cada 15 días, durante tres meses, principalmente en época de baja precipitación. En cada sitio se seleccionó un tramo de 50 metros en el cual se tomaron tres réplicas por cada microhábitat. Se tuvo en cuenta que en los sitios no hubiera influencia de urbanización o cualquier otro factor que pudiera aportar fuentes difusas de contaminación en las quebradas.

Los macroinvertebrados se recolectaron en la mayoría de los microhábitats presentes utilizando una red Surber (poro de 0,25 mm y área de 0,09 m²). Se capturaron organismos alojados en la grava y la hojarasca y con un nucleador (diámetro de 15 cm) se tomaron muestras de sedimentos. Las muestras recolectadas se preservaron en alcohol al 70 %. La identificación en el laboratorio se hizo con las claves taxonómicas de **Merritt, et al.** (2008), **Domínguez & Fernández** (2009) y **Prat, et al.** (2011).

Análisis de datos

Se determinó el número de familias y la abundancia en cada sitio de muestreos para conocer su asociación con las actividades agrícolas y ganaderas en la zona de estudio mediante un análisis de correspondencia simple (ACS). Para corroborar la existencia de diferencias significativas se aplicó un análisis de similitud (ANOSIM) utilizando la distancia de Bray-Curtis. Para medir la calidad del agua a partir de los macroinvertebrados acuáticos, se aplicó el índice BMWP/Col por muestreo y se obtuvo el valor medio en cada quebrada; los puntajes de cada familia se utilizaron para clasificarlas como tolerantes, no tolerantes y moderadamente tolerantes (**Roldán, 2003**).

Para determinar el grado de respuesta de las familias a las actividades agropecuarias, se utilizó un modelo lineal generalizado (MLG) por familia en el que la abundancia fue la variable dependiente y los sitios de muestreos, la independiente. Tras la exploración de los datos se evidenció que la varianza condicional era mayor a la media condicional, por lo que se utilizó el modelo binomial negativo. Se consideró significativo todo valor de $p < 0,05$. Todos los análisis se hicieron con el paquete estadístico R. Studio 0.99.903 (www.r-project.org).

Resultados

Estructura de las familias de macroinvertebrados

Según la identificación y clasificación de los macroinvertebrados acuáticos en los tres sitios de muestreo, los 7.367 individuos recolectados se distribuyeron en 29 familias y 10 órdenes (**Tabla 1**). Los órdenes con mayor número de familias fueron Díptera, Trichoptera y Hemiptera, con cinco familias cada uno. Se observó que las tres quebradas compartían 21 familias, en tanto que una familia se presentó exclusivamente en La Cuca (Empididae), una en La Marrana (Glossosomatidae) y tres en Doña Sofía (Notonectidae, Odontoceridae y Oligoneuriidae) (**Figura 2**).

En la quebrada La Cuca se recolectaron 1.982 organismos distribuidos en 22 familias y 10 órdenes. La familia más representativa fue Physidae, con 744 individuos, es decir, el 38 % del total de las muestras para este sitio, seguida de las familias Simuliidae y Chironomidae, las cuales representaron el 17 % y el 12 %, respectivamente. Las familias con menos organismos fueron Corydalidae (cuatro individuos), Mesoveliidae (tres individuos) y Empididae (un solo individuo) (**Tabla 1**).

En la quebrada La Marrana se registraron 2.062 individuos pertenecientes a 25 familias y 10 órdenes. La familia más abundante fue Chironomidae, con 452 individuos, es decir, el 26 % del total en el sitio de muestreo, seguida de las familias Calamoceratidae y Physidae, con el 13 % y el 11 %, respectivamente. Las familias con menores abundancias fueron Gerridae, Glossosomatidae y Oligoneuriidae, cada una con un solo individuo (**Tabla 1**).

En la quebrada Doña Sofía se recolectaron 3.323 individuos distribuidos en 27 familias y 10 órdenes. Las familias más abundantes fueron Simuliidae (21 %), Hydropsychidae (16 %) y Perlidae (15 %), y las menos abundantes Gerridae, Notonectidae y Odontoceridae, con dos organismos cada una (**Tabla 1**).

En el análisis de similitud se registraron diferencias significativas entre los sitios (Anosim: $R=0,026$; $p=0,035$). Además, el análisis de correspondencia simple sugiere que la quebrada La Cuca se caracterizó principalmente por la gran abundancia de Physidae (familia tolerante) y Calopterygidae (familia moderadamente tolerante). En La Marrana, por su parte, predominaron Helicopsychidae (familia no tolerante) y Chironomidae (familia tolerante), en tanto que en la quebrada Doña Sofía prevalecieron las familias Perlidae (no tolerante), Corydalidae e Hydropsychidae (moderadamente tolerantes) (**Figura 3**).

En cuanto a la respuesta estructural, se encontró que la abundancia de las familias Perlidae (BMWP=10), Ptilodactylidae (BMWP=10) e Hydropsychidae (BMWP=7) fueron menores en La Cuca y La Marrana, en comparación con las encontradas en la quebrada Doña Sofía para estas familias. Asimismo, se observó una disminución de la abundancia de las familias Calamoceratidae (BMWP=10), Leptophlebiidae (BMWP=9), Leptohyphidae (BMWP=7), Corydalidae (BMWP=6) y Libellulidae (BMWP=6) en la quebrada La Cuca, en comparación con Doña Sofía. En cuanto a la familia Physidae (BMWP=3), fue la única cuya abundancia aumentó en La Cuca, en contraste con los otros dos sitios.

El modelo lineal generalizado aplicado a cada familia permitió comprobar estadísticamente que la abundancia de la familia Perlidae disminuyó 14 veces en la quebrada La Cuca y 2,8 veces en La Marrana, comparada con la abundancia encontradas en la quebrada Doña Sofía. Asimismo, la familia Calamoceratidae disminuyó su abundancia 3,1 veces en La Cuca y 1,2 veces en La Marrana comparada con la quebrada Doña Sofía (**Tabla 2**). En la quebrada La Cuca la abundancia de la familia Corydalidae

Tabla 1. Abundancia de las familias en las zonas de estudio

Orden	Familia	Quebrada La Cuca	Quebrada La Marrana	Quebrada Doña Sofía	Abundancia total
Basommatophora	Physidae	744	190	5	939
Coleoptera	Ptilodactylidae	/	/	5	5
	Elmidae	94	116	115	325
Diptera	Simuliidae	334	330	714	1378
	Empididae	1	/	/	1
	Tipulidae	6	2	5	13
	Chironomidae	234	452	240	926
	Blephariceridae	/	3	5	8
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	17	102	121	240
	Baetidae	10	32	46	88
	Leptohiphidae	16	25	39	80
	Oligoneuriidae	/	1	7	8
Hemiptera	Veliidae	41	50	133	224
	Naucoridae	125	/	153	278
	Mesoveliidae	3	11	16	30
	Naucoridae	/	123	/	123
	Gerridae	/	1	2	3
	Notonectidae	/	/	2	2
Lepidoptera	Pyralidae	47	11	30	88
Megaloptera	Corydalidae	4	6	35	45
Odonata	Gomphidae	9	18	32	59
	Calopterygidae	39	12	5	56
	Libellulidae	30	30	102	162
Plecoptera	Perlidae	29	150	484	663
Trichoptera	Calamoceratidae	85	230	308	623
	Helicopsychidae	17	38	22	77
	Leptoceridae	58	60	153	271
	Hydropsychidae	39	68	542	649
	Glossosomatidae	/	1	/	1
	Odontoceridae	/	/	2	2
Total:		1982	2062	3323	7367

disminuyó 7,7 veces, la de Leptophlebiidae 6,3 veces y la de Leptohiphidae 2,1 veces en comparación con la quebrada Doña Sofía (**Tabla 2**), en tanto que la abundancia de la familia Hydropsychidae disminuyó 12,5 veces en La Cuca y 7,1 veces en La Marrana comparadas con Doña Sofía. La abundancia de la familia Libellulidae, por su parte, se redujo 2,1 veces en La Cuca y 1,8 La Marrana comparadas con la abundancia en la quebrada Doña Sofía (**Tabla 2**). Por el contrario, la abundancia de la familia Physidae aumentó 172,3 veces en La Cuca y 43,5 veces La Marrana, comparada con la quebrada Doña Sofía (**Tabla 2**).

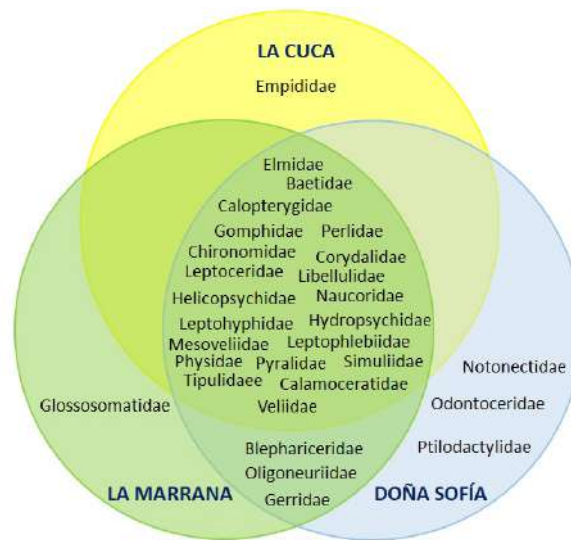


Figura 2. Familias exclusivas y compartidas entre los sitios de muestreos

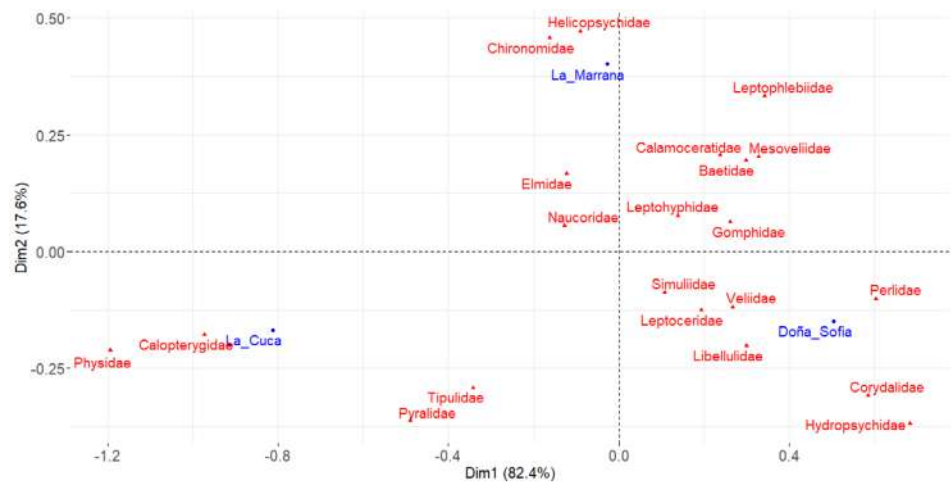


Figura 3. Análisis de Correspondencia Simple (ACS) para las estaciones de muestreo evaluadas

Índice BMWP-Col

El valor medio del índice BMWP-Col para la quebrada La Cuca fue de 53 puntos, lo que indica una calidad del agua dudosa, es decir, moderadamente contaminada. En la quebrada La Marrana el puntaje promedio fue de 70 puntos, indicativo de una calidad de agua aceptable, es decir, ligeramente contaminada. Por el contrario, la quebrada Doña Sofía presentó un puntaje promedio de 101, lo que significa una buena calidad del agua, entre limpia y muy limpia (**Tabla 3**).

Las familias de mayor abundancia en la quebrada La Cuca obtuvieron los menores puntajes en el índice BMWP (Physidae y Chironomidae), lo que indica que los organismos más abundantes se consideran tolerantes (**Figura 4**). Por el contrario, en la quebrada Doña Sofía las familias más abundantes tuvieron puntuaciones altas en el índice (Perlidae, Calamoceratidae, Simuliidae e Hydropsychidae), lo que indica que abundan los organismos más sensibles a la contaminación orgánica (**Figura 5**). En la quebrada La Marrana, aunque la familia más abundante tuvo una calificación de dos (Chironomidae), se encontró un número representativo de familias con calificación mayor a seis (**Figura 6**).

Tabla 2. Familias de macroinvertebrados en la que se evidenció grado de respuestas en sus abundancias por el tipo de impacto ($p < 0,05$)

Familia	Valor p: Cuca vs Sofía	Valor p: Marrana vs Sofía	Grado de respuesta Cuca vs Sofía	Grado de respuesta Marrana vs Sofía
Calamoceratidae	0,0102		3,1	1,2
Perlidae	8,65E-11	0,0015	14,0	2,8
Ptilodactylidae	1,83E-02	0,0034		
Leptophlebiidae	0,0009		6,3	
Hydropsychidae	4,14E-05	1,77E-02	12,5	7,1
Leptoxyphidae	0,0052		2,1	
Corydalidae	0,0179		7,7	
Libellulidae	0,0030	0,0149	2,1	1,8
Physidae	1,83E-02	0,0034	172,3	43,5

Tabla 3. Puntaje del índice BMWP por muestreo y quebrada

Muestreo	Quebrada La Cuca	Quebrada La Marrana	Quebrada Doña Sofía
Enero-1	80	114	105
Enero-2	58	84	96
Febrero-1	36	63	111
Febrero-2	66	68	85
Marzo-1	16	31	105
Marzo-2	61	62	104
Promedio	52,8	70,3	101,0

Clase III, dudosa. Aguas moderadamente contaminadas
 Clase II, aceptable. Aguas ligeramente contaminadas
 Clase I, buena. Aguas limpias a muy limpias

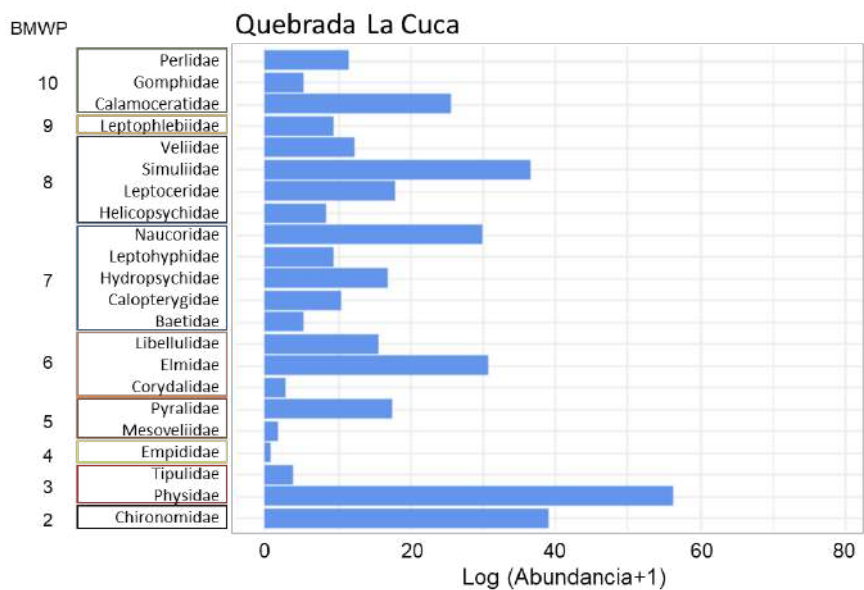


Figura 4. Puntaje del índice BMWP y abundancias de las familias en la quebrada La Cuca

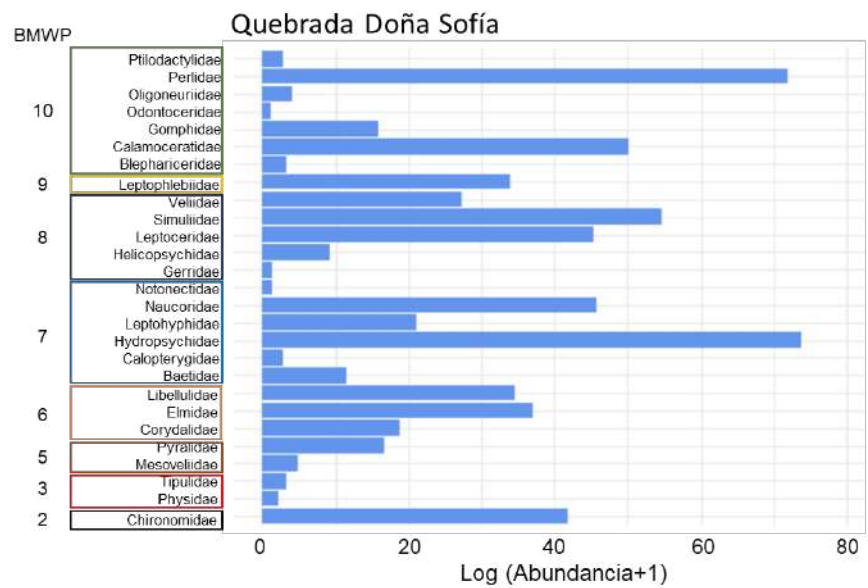


Figura 5. Puntaje del índice BMWP y abundancias de las familias en la quebrada Doña Sofía

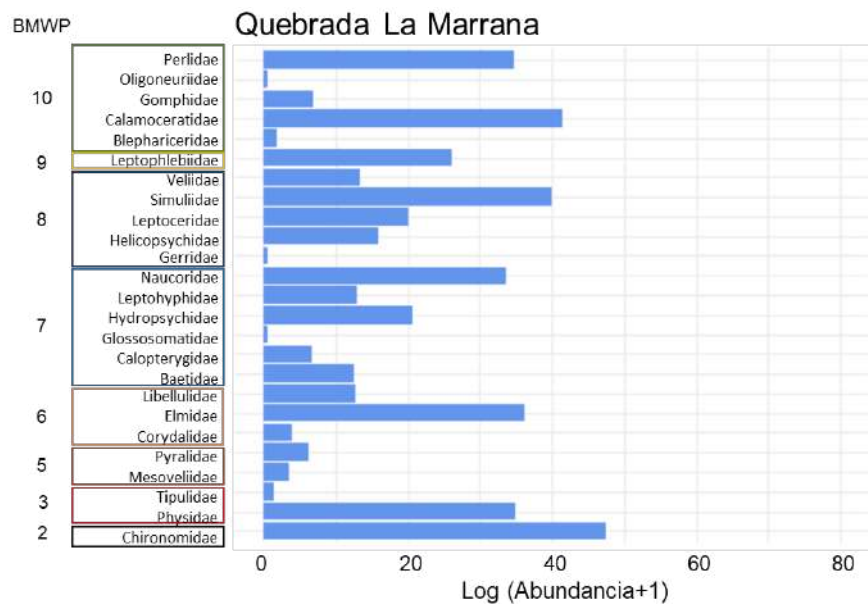


Figura 6. Puntaje del índice BMWP y abundancias de las familias en la quebrada La Marrana

Por último, la quebrada Doña Sofía presentó el mayor número de familias con un puntaje de diez (Ptilodactylidae, Blephariceridae, Oligoneuriidae, Gomphidae, Perlidae, Calamoceratidae y Odontoceridae), seguido de La Marrana (Oligoneuriidae, Blephariceridae, Gomphidae, Perlidae y Calamoceratidae).

Discusión

Los órdenes y la riqueza de familias en las tres quebradas del sector de La Tagua se aproximan a lo observado por Granados (2013) en la parte alta, media y baja de la cuenca del río Gaira, donde se han reportado 35 familias y 10 órdenes de macroinvertebrados. Las quebradas seleccionadas en el presente estudio tienen condiciones ambientales similares

a los afluentes de la cuenca del río Gaira en cuanto a la variabilidad del clima y los tipos de bosque presentes según la altura. Esto se debe a que los ríos Gaira y Toribio nacen en la cuchilla de San Lorenzo y descienden por la vertiente occidental de la SNSM (**Corporación Autónoma Regional del Magdalena - CORPAMAG**, 2016). Por ello, el sector de La Tagua es muy diverso, ya que contiene el 82 % de las familias reportadas en el estudio de **Granados** (2013) a lo largo de la cuenca de río Gaira, con la excepción de las familias Atyidae, Byrrhoidea, Ceratopogonidae, Dytiscidae, Hydrobiosidae y Muscidae, que no se encontraron en el presente estudio.

Los órdenes Díptera y Trichoptera se cuentan entre los grupos de macroinvertebrados acuáticos más diversos, de mayor distribución y mejor conocidos en el Neotrópico. Estos constituyen gran parte de la biomasa en los ecosistemas dulceacuícolas y tienen un papel fundamental en las redes tróficas (**Roldán**, 2016). En el presente trabajo, fueron los de mayor número de familias y abundancia en general, lo que coincide con lo observado en la cuenca de San Alberto en Perú y en el río Chinchiná en Caldas, Colombia, donde los órdenes Díptera y Trichoptera fueron los más dominantes y con la mayor cantidad de familias (**Gustavson, et al.**, 2013; **Villada-Bedoya, et al.**, 2017).

La Quebrada Doña Sofía, dada la variedad de su hábitat y la buena calidad del agua, favoreció la abundancia de las familias Perlidae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Leptophlebiidae, Hydropsychidae y Leptoheptidae, todas con un puntaje mayor a siete en el BMWP-Col, lo que demuestra que son particularmente sensibles a la contaminación orgánica (**Herrera**, 2005; **Roldán**, 2016; **Leaño-Sanabria & Pérez-Barriga**, 2020). La exclusividad de las familias Notonectidae, Odontoceridae y Oligoneuriidae en esta quebrada se debe a que estos organismos no son tolerantes a la contaminación orgánica (**Domínguez & Fernández**, 2009; **Roldán**, 2016). Algunas familias como Chironomidae, en cambio, se encontraron en gran abundancia en las tres quebradas, lo que probablemente se debe a que son organismos que toleran un amplio nivel de contaminación y se adaptan a diversas condiciones ambientales (**Paggi**, 1999; **Liévano & Ospina**, 2007).

En la quebrada La Marrana, a pesar de presentar aguas moderadamente contaminadas, el número de familias fue diferente a los otros sitios de muestreo. Se observó una abundancia importante de familias tolerantes (Chironomidae y Physidae) y no tolerantes a la contaminación orgánica (Simuliidae, Calamoceratidae), lo que posiblemente responda al hecho de que las plantaciones de café que la rodean no han tenido impacto en el total de la vegetación ribereña, lo que favorece los ciclos de vida de la fauna acuática. Diversos autores señalan que en las zonas donde se mantienen los bosques de ribera, la riqueza y las abundancias de los organismos acuáticos son mayores en comparación con aquellas que han perdido su vegetación porque tienen mayor disponibilidad de recursos en el cuerpo de agua, además de que evitan la erosión y los altos niveles de sedimentación (**Naiman, et al.**, 1997; **Meza, et al.**, 2012; **Chará-Serna, et al.**, 2015). Sin embargo, en los tramos alrededor de las plantaciones se observó una elevada sedimentación en la quebrada, hábitat preferido por las familias Gomphidae y Libellulidae.

En cuanto a la quebrada La Cuca, esta se caracterizó por presentar aguas moderadamente contaminadas, bosque secundario, zona de pastizales, senderos al borde de la quebrada y constante tránsito de ganado. Estas características resultaron en la disminución del número de familias y de su abundancia en comparación con los otros dos sitios de muestreo, y, además, se reflejaron en la abundancia de las familias Physidae y Chironomidae, las cuales se han relacionado claramente con la contaminación y eutrofización de los ecosistemas dulceacuícolas (**González del Tánago & García-Jalón**, 1984). Al igual que en otros estudios, la familia Physidae fue importante para determinar los usos del suelo (**Ramírez, et al.**, 2013). Se ha documentado que esta se adapta rápidamente en ambientes con altas cargas orgánicas, detritus y bajos niveles de oxígeno, por lo que parece ser un indicador clave de áreas degradadas (**González del Tánago & García-Jalón**, 1984; **Roldán**, 2003; **Liévano, et al.**, 2007).

Conclusiones

Se demostró que las actividades ganaderas y agrícolas producen cambios en la calidad del agua y variaciones en la estructura de las familias de macroinvertebrados en el sector de La Tagua en la SNSM. Dichas actividades incidieron en la disminución observada en la abundancia y el número de familias no tolerantes a la contaminación orgánica. En la quebrada conservada, por el contrario, se observó un aumento de la abundancia y el número de familias no tolerantes a niveles de contaminación.

El presente estudio es importante para la región noroccidental de la SNSM porque permite comprender cómo varía la estructura de las familias de macroinvertebrados y la calidad de agua según el grado de asociación con las actividades agrícolas y ganaderas desarrolladas en el sector. Esta información es muy útil, puesto que servirá como base para desarrollar estrategias encaminadas a determinar el impacto de las prácticas agropecuarias sobre la biodiversidad de macroinvertebrados.

Agradecimientos

A la Fundación Atelopus, por financiar las salidas de campo y a sus integrantes, Luis Alberto Rueda, José Luis Pérez, José Barros, Sintana Rojas y Jefferson Villalba, por su apoyo en campo. A la comunidad del sector de La Tagua, por su colaboración y guía en campo.

Contribución de los autores

MTL y CGS participaron en el proceso de recolección de datos, el análisis de la información y la escritura del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Camero, E.** (2003). Caracterización de la fauna de carábidos (Coleoptera: Carabidae) en un perfil altitudinal de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*. **27** (105): 491-516.
- Chará-Serna, A. M., Chará, J., Giraldo, L. P., Zúñiga, M. D. C., Allan, J. D.** (2015). Understanding the impacts of agriculture on Andean stream ecosystems of Colombia: a causal analysis using aquatic macroinvertebrates as indicators of biological integrity. *Freshwater Science*. **34** (2): 727-740.
- Corporación Autónoma Regional del Magdalena - CORPAMAG.** (2016). Estudios base para la reglamentación de corrientes de los Ríos Buritacá, Gaira, Toribio, Córdoba, Orihueca y Sevilla, a partir de la oferta y disponibilidad del recurso hídrico. Santa Marta, Colombia. Corpamag, 262 pp.
- Domínguez E. & Fernández H.** (2009). Macroinvertebrados bentónicos Sudamericanos. Sistemática y biología. Tucumán, Argentina Fundación Miguel Lillo. 656 pp.
- Dudgeon, D.** (2008). *Tropical stream ecology*. USA: Elsevier Science. 300 pp.
- Gómez-Anaya, J. A.** (2009). Ecología de Los ensambles de larvas de odonatos (Insecta), y su uso potencial como indicadores de calidad ecológica en la Sierra de Coalconan, Michoacán, México. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo, México.
- González del Tánago, M. & García Jalón, D.** (1984). Desarrollo de un índice biológico para estimar la calidad de las aguas de la cuenca del Duero. *Limnética*. **1**: 263-272.
- Gordon, R.** (1985). La taxonomía de insectos: su importancia y perspectivas. Memorias XII Congreso Sociedad Colombiana de Entomología –SOCOLEN-. Medellín, Colombia.
- Granados, C.** (2013). Análisis de la dieta de los macroinvertebrados bentónicos en un gradiente altitudinal de la cuenca del río Gaira (Sierra Nevada de Santa Marta - Colombia). Tesis para optar el título de Magister Scientiarum en Ciencias Biológicas. Mención Ecología Acuática. Universidad de Zulia, Venezuela.
- Gustavson, S. S., Cosme, L. A., Trama, F. A.** (2013). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad de agua en la microcuenca San Alberto, Oxapampa, Perú. *Apuntes de Ciencia y Sociedad*. **3** (2): 124-139.

- Herrera, M. J. S.** (2005). El índice biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party score), modificado y adaptado al cauce principal del río pamplonita norte de Santander. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*. **3** (2): 54-67.
- Hodkinson, I. D. & Jackson, J. K.** (2005). Terrestrial and aquatic invertebrates as bioindicators for environmental monitoring, with particular reference to mountain ecosystems. *Environmental management*. **35** (5): 649-666.
- Jantz, S. M., Barker, B., Brooks, T. M., Chini, L. P., Huang, Q., Moore, R. M., Noel, J., Hurtt, G.C.** (2015). Future habitat loss and extinctions driven by land-use change in biodiversity hotspots under four scenarios of climate-change mitigation. *Conservation Biology*. **29** (4): 1122-1131. <https://doi.org/10.1111/cobi.12549>
- Lasso, C. A., Blanco-Liberos J. F., Sánchez-Duarte, P.** (Editores). 2015. XII. Cuencas pericontinentales de Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela: tipología, biodiversidad, servicios ecosistémicos y sostenibilidad de los ríos, quebradas y arroyos costeros. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., Colombia. 454 p.
- Leaño-Sanabria, J. J. & Pérez Barriga, D.** (2020). Determinación de la calidad del agua mediante el índice BMWP/BOL (bioindicadores ecológicos) del río Trancas, Municipio de Entre Ríos-Tarija. *Acta Nova*. **9** (4): 567-591.
- Liévano, A. & Ospina, R.** (2007). Guía ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón. Bogotá D.C. Universidad El Bosque E Instituto Alexander Von Humbolt. Bogotá, D. C. 130 p.
- Merritt, R. W. & Cummins, K. W.** (2008). An introduction to the aquatic insects of North America. Kendall Hunt. Ciudad: Dubuque, Iowa. 862 p.
- Meza, A. M., Rubio, J., Lucimar, G., Jeymy, M.** (2012). Calidad de agua y composición de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca alta del río Chinchiná. *Caldasia*. **34** (2): 443-456.
- Naiman, R.J. & Décamps H.** (1997). The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **28**: 621-658.
- Paggi, A. C.** (1999). Los Chironomidae como indicadores de calidad de ambientes dulceacuícolas. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. **58** (1-2): 202-207.
- Prat, N., Rieradevall, M., Acosta, R., Villamarín, C.** (2011). Guía para el reconocimiento de las larvas de Chironomidae (Diptera) de los ríos altoandinos de Ecuador y Perú. Grupo de Investigación FEM Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona, España, 78.
- Ramírez, D. F., Talero, G. M., López, R. H.** (2013). Macroinvertebrados bentónicos y calidad del agua en un tramo del río Bogotá. Cajicá-Colombia. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*. **16** (1): 205-214.
- Roldán-Pérez, G.** (2003). Pérez, G. R. (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Propuesta para el uso del método BMWP Col. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 165 p.
- Roldán-Pérez, G.** (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **40** (155): 254-274.
- Roy, A. H., Capps, K. A., El-Sabaawi, R. W., Jones, K. L., Parr, T. B., Ramírez, A., Smith, R.F., Walsh, C.J., Wenge, S.J.** (2016). Urbanization and stream ecology: diverse mechanisms of change. *Freshwater Science*. **35**: 272-277. <https://doi.org/10.1086/685097>
- Ruaro, R., Gubiani, É. A., Cunico, A. M., Moretto, Y., Piana, P. A.** (2016). Comparison of fish and macroinvertebrates as bioindicators of Neotropical streams. *Environmental monitoring and assessment*. **188** (1): 45. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5046-9>
- Tamaris-Turizo, C., Rodríguez-Barríos, J., Ospina-Torres, R.** (2013). Deriva de macroinvertebrados acuáticos a lo largo del río Gaira, vertiente noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Caldasia*. **35** (1): 149-163.
- Unidad Administrativa Especial Del Sistema De Parque Nacionales Naturales – UAESPNN.** (2005). Plan de Manejo Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta 2005-2009. Ministerio del Medio Ambiente, Santa Marta-Colombia.
- Vannote, R. L., Minshall, K. W., Cummins, J. R., Sedell, C. E., Cushing, C. E.** (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **37**: 130-137.
- Villada-Bedoya, S., Ospina-Bautista, F., G-Días, L., Estévez-Varón, J. V.** (2017). Diversidad de insectos acuáticos en quebradas impactadas por agricultura y minería, Caldas, Colombia. *Revista de Biología Tropical*. **65** (4): 1635-1659.
- Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., Morgan, R. P.** (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*. **24** (3): 706-723. <https://doi.org/10.1899/04-028.1>

Original article

Diversity and antibacterial activity of endophytic fungi of the Amazonian medicinal plant *sucuuba* [*Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson]

Diversidad y actividad antibacteriana de hongos endofíticos de la planta medicinal amazónica *sucuuba* [*Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson]

✉ Maria Francineide Ribeiro-Gomes¹, ✉ Fernanda Viana-Diniz^{1,*},
✉ Atilon Vasconcelos de-Araújo², ✉ Leila Priscila-Peters¹, ✉ Clarice Maia-Carvalho^{1,2,3}

¹Programa de Pós-graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, Acre, Brazil

²Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede Bionorte, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, Acre, Brazil

³Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, Acre, Brazil

Abstract

The Amazonian medicinal plant *sucuuba* (*Himatanthus sucuuba*) is widely used in ethnopharmacology and has pharmacological potential. Its endophytic fungi also have important bioactive substances of interest to the pharmaceutical industry. Despite this, there are no studies in the literature about its endophytic microorganisms. In this context, this work aimed to describe endophytic fungi of *H. sucuuba* and evaluate the antibacterial potential of its secondary metabolites against *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae*, *Escherichia coli*, and *Klebsiella pneumoniae*. We isolated leaves and stem material using the culture media potato-dextrose-agar (PDA) and Sabouraud-dextrose-agar (SDA) with or without 10 % of plant extract and then incubated at 18°C or 28°C. The isolated fungi were analyzed for macromorphological characteristics and classified into morphospecies for micromorphological characterization and production of fungal extracts. The fungi were grouped into 259 morphospecies, 135 (52.12%) were identified at the genus level, and 16 different genera were described. Endophytic fungi were most frequently isolated from *H. sucuuba* leaf (341 fungi) in the SDA culture medium at 28°C. *H. sucuuba* showed high diversity with a Shannon index of 5.26, a Simpson's diversity (D) index of 0.99, and an evenness index of 0.83. Of the 235 fungal extracts tested, 28 (12%) inhibited the growth of Gram-positive and Gram-negative bacteria. *S. pneumoniae* and *E. coli* were the most sensitive and *K. pneumoniae* the most resistant. This is the first report of studies with endophytic fungi from *H. sucuuba* indicating their potential for the production of antibacterial substances.

Keywords: Antibiotics; Bioprospecting; *Sucuuba*; Endophytic diversity.

Resumen

La planta medicinal amazónica *sucuuba* (*Himatanthus sucuuba*) es muy utilizada en etnofarmacología y tiene potencial farmacológico. Sus hongos endofíticos también poseen importantes sustancias bioactivas de interés para la industria farmacéutica. No existen estudios relacionados con sus microorganismos endofíticos, por lo que en este trabajo se planteó el objetivo de describir los hongos endofíticos de *H. sucuuba* y evaluar el potencial antibacteriano de sus metabolitos secundarios frente a *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae*, *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae*. Para ello se aisló material de hojas y tallos utilizando los medios de cultivo agar de papa y dextrosa (PDA) y agar de dextrosa Sabouraud (SDA), con o sin 10 % de extracto vegetal, que luego se incubó a 18 °C o 28 °C. Los hongos aislados se analizaron en busca de características macromorfológicas y se clasificaron en morfoespecies para la caracterización micromorfológica y la producción de extractos

Citation: Ribeiro-Gomes MF, Viana-Diniz F, Vasconcelos de-Araújo A, *et al.* Diversity and antibacterial activity of endophytic fungi of the Amazonian medicinal plant *sucuuba* [*Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson]. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):217-232, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1525>

Editor: Jairo Castaño Zapata

***Corresponding autor:**
Fernanda Viana-Diniz;
fvianadiniz@gmail.com

Received: July 27, 2021

Accepted: March 14, 2022

Published: March 23, 2022



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

de hongos. Los hongos se agruparon en 259 morfoespecies, 135 (52,12 %) se identificaron a nivel de género y se describieron 16 diferentes. Los hongos endofíticos se aislaron con mayor frecuencia de la hoja de *H. sucuuba* (341) en medio de cultivo SDA a 28 °C. *H. sucuuba* mostró una gran diversidad, con índice de Shannon de 5,26, índice de diversidad de Simpson (D) de 0,99 e índice de uniformidad de 0,83. De los 235 extractos de hongos probados, 28 (12 %) inhibieron el crecimiento de bacterias Gram-positivas y Gram-negativas. *S. pneumoniae* y *E. coli* fueron las bacterias más sensibles y las de *K. pneumoniae* las más resistentes. Este es el primer informe sobre hongos endofíticos de *H. sucuuba* que evidencia su potencial para la producción de sustancias antibacterianas.

Palabras clave: antibióticos; bioprospección; sucuba; diversidad endofítica.

Introduction

The Amazonian medicinal plant sucuba [*Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson] is widely used in ethnopharmacology with high pharmacological potential and isolated substances with proven biological activity (García-Ortiz, *et al.*, 2017; Da Silva, *et al.*, 2021). Among its traditional uses, its leaves, stem, and latex serve in infusion and decoction as antitumor and antifungal substances for the treatment of gastritis, ulcers, and arthritis (Larrosa & Duarte, 2005), of cough, flu, diarrhea, hemorrhoids, warts, dislocations, anemia, as well as for blood clearance, aphrodisiac and analgesic (Rodrigues, *et al.*, 2010; Linhares, *et al.*, 2011). Studies with *H. sucuuba* have shown its anti-inflammatory (Fakhrudin, *et al.*, 2014; Calero-Armijos, *et al.*, 2020), analgesic (Miranda, *et al.*, 2000), leishmanicidal (Soares, *et al.*, 2010), acaricide (Sprenger, *et al.*, 2016), and antibacterial action (Silva, *et al.*, 2010).

There are several studies about *H. sucuuba*, but none about its endophytic microorganisms. However, several promising endophytic microorganisms and their secondary metabolites have been discovered in medicinal plants (Gos, *et al.*, 2017; Abdalla & McGaw, 2018; Duhan, *et al.*, 2020). Furthermore, the antimicrobial activity of medicinal plants may be associated with the proportion of endophytic antagonists to pathogens (Egamberdieva, *et al.*, 2017). We should remember that endophytes are fungi and bacteria that live inside plants, in the roots, stems, and leaves, without causing damage to the host (Khare, *et al.*, 2018).

Although endophytic fungi have been described for over a century, it was in the late 1970s that studies focused on their taxonomy and ecology, and their ability to protect plants against predators and pathogenic insects, other fungi, and bacteria (Mantzoukas & Eliopoulos, 2020; Peters, *et al.*, 2020). Currently, these microorganisms are considered a second microbiological layer for plant defense (Dini-Andreote, 2020). Endophytic fungi are known to be an important resource of different secondary metabolites (Aboobaker, *et al.*, 2019; Bibi, *et al.*, 2020). They can provide more resistance to their hosts against water stress, alter the physiological properties of plants, and produce plant hormones, enzymes and other compounds of biotechnological importance (Kusari, *et al.*, 2014), which has increased the interest in exploring their potential.

The main factor driving the search for new active molecules is microbial resistance to conventional antibiotics. Current projections indicate that by 2050 there will be more deaths from bacterial infections than from current leading causes of death such as cancer. As indicated by the World Health Organization (WHO), some strains are a priority in the fight against *Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Enterobacter* spp. (López-Jácome, *et al.*, 2019).

In this sense, our study aimed to make the first description of mutualistic endophytic fungi for the Amazonian medicinal plant sucuba (*Himatanthus sucuuba*) and to evaluate the antibacterial activity of their secondary metabolites.

Materials and methods

Collection of botanical material and herborization

Three plants were randomly collected at different sites of the Zoobotanical Park (9°57'8 "S - 67°52'25" W) located at the *Universidade Federal do Acre* (UFAC) in Rio Branco, State of Acre, Brazil, between January and April 2015 (**Figure 1**). The leaves and stems were collected in the early morning hours and the plants were selected during the flowering period for identification in the UFAC herbarium using the manual by **Lorenzi** (1998); the three plants collected were identified as belonging to *Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson and deposited in the UFAC herbarium collection under number 22001 in January 2016 (**Figure 2**). The region where the sampling point for *H. sucuuba* seedlings is located has a hot and humid climate, a temperature variation of 1 to 2°C with average values between 24 and 26°C, heavy rains between November and March, droughts between May and September, and an average annual rainfall of 2,300 mm/year (**Fisch, et al., 1998**).

Isolation of endophytic fungi

Healthy leaves and stems were collected to prepare the culture medium with their extract and isolate their endophytic fungi using potato-dextrose-agar (PDA) and Sabouraud-dextrose-agar (SDA) culture media with or without 10% plant extract. The extract was prepared with 100 g of fresh plant tissue (leaf or stem) grounded with 500 mL of distilled

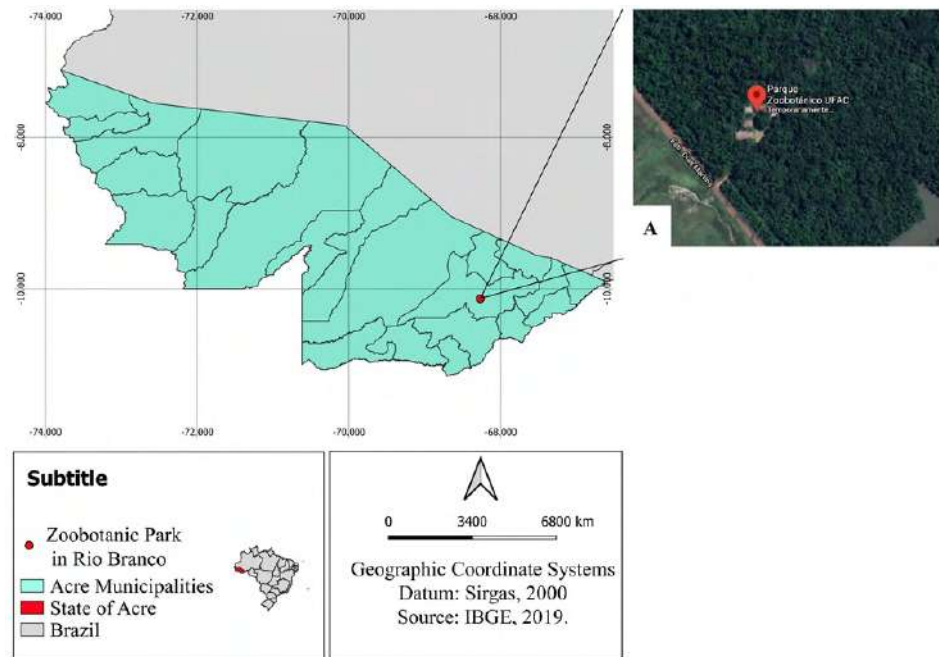


Figure 1. Map of the Acre State and collection site of *H. sucuuba* plants (made using QGIS)



Figure 2. *Himatanthus sucuuba*. A. Tree. B. Flower. C. Dry fruit with seeds in dispersion phase. D. Immature fruits

water and filtered on filter paper. For the preparation of the PDA+extract medium, 500 mL of 200 g of potato infusion were added to 500 mL of plant extract while for preparing the SDA+extract medium, 500 mL of water and the reagents used in the preparation of each culture medium were solubilized. Chloramphenicol (100 mg/mL) was added to all media to inhibit bacterial growth (Azevedo, *et al.*, 2000). The media supplemented with *H. sucuuba* extracts were used to provide the plant substances used for the growth of the endophytic fungi present in its tissues.

Leaves and stems were disinfected by immersion in 70% ethanol (1 min), 2.5% sodium hypochlorite (3 min), 70% ethanol (30 sec), and sterile distilled water (1 min) twice. Fragments with 5 mm in diameter were placed in the culture medium and incubated at 18°C or 28°C for 30 days. Endophytic fungi were purified and preserved using the mineral oil and distilled water methods (Azevedo, *et al.*, 2000).

For taxonomic identification, fungi isolated from *H. sucuuba* were grouped into morphospecies based on macromorphological characteristics (mycelium shape, mycelium texture, fungus color, agar color, and pigment diffusion in the medium). The macro and micromorphological characteristics of the morphospecies were observed and compared with those in the genera identification literature (Barnett & Hunter, 1998).

Bioassay of antibacterial activity

Endophytic fungi were cultivated in the PDA medium at 28°C for 14 days. Ten fungal discs were transferred to an Erlenmeyer flask containing 20 mL of potato-dextrose broth (PD) and incubated at 28°C, for 14 days. Two mL of metabolite medium were extracted by a liquid-liquid partition with ethyl acetate and solubilized in 300 µL of dimethylsulfoxide (DMSO) (Vitolo & Pessoa JR, 2015).

Extracts from endophytic fungi were evaluated to verify their activity against pathogenic bacteria using the disc infusion method (NCCLS, 2003). *S. aureus* (ATCC 12598), *S. pneumoniae* (ATCC 11733), *E. coli* (ATCC 10536), and *K. pneumoniae* (ATCC 700603) were grown at 37°C for 4-6 h and turbidity adjusted to a scale of 0.5 McFarland. Bacteria were inoculated in Petri dishes containing Muller-Hinton medium and the paper discs were placed in the medium and on 20 µL of extract. Samples were then incubated at 37°C for 24 h. Endophyte metabolic extracts inhibiting bacterial growth around the disc were considered as having antibacterial activity and the halo of inhibition was measured in millimeters. DMSO was the negative control and chloramphenicol 30 mg was the positive control. The inhibition zones were considered from 10 mm but we observed some up to 36 mm.

Molecular characterization

The endophytic fungi showing activity against the four bacteria tested and the highest inhibition halos were chosen for molecular characterization. Genomic DNA extraction from these fungi was performed using the Quick-DNA Fungal/Bacterial miniprep kit (Zymo Research) following the manufacturer's instructions. The amplification of rDNA from the ITS region was done in a 50 µL reaction mix, which included 2 µL of DNA template (1-20 ng), 0.4 µM ITS1 and ITS4 primers (White, *et al.*, 1990), 1.5 mM MgCl₂, 0.2 µM dNTPs, 5 µL Taq buffer, and 1.25 U Taq DNA polymerase (Qiagen). PCR amplification was performed on a PCR cycler (Bio-Rad) with an initial denaturation at 95 °C for 2 min followed by 35 cycles of amplification (95 °C for 30 sec, 55 °C for 30 sec, 72 °C for 1 min) and an extension step (72 °C for 7 min). PCR products at around 600 to 700 bps were purified using the QIAquick PCR Purification Kit (Qiagen) and quantified on a 2% agarose gel. The purified products were sent to LACTAD (Campinas, Brazil) for sequencing.

The sequences obtained were analyzed and edited in Bioedit 7.0.9.1, aligned to the region sequences (ITS1-5.8S-ITS2) using the Clustal W program, deposited in the GenBank databases while the species similarity index was calculated with the BLASTn tool. After identifying the species of interest, a phylogenetic tree was constructed using the neighborhood method and the MEGA 7.0 software (Tamura, *et al.*, 2007).

Data analysis

The frequency of fungal colonization (FC) was calculated using the formula where NCOL is the number of colonized fragments and TN corresponds to the total number of fragments. The relative frequency (RF) of the isolation was calculated as the number of isolates of a species divided by the total number of isolates and expressed as a percentage.

To calculate the diversity, we used the Simpson's formula: 2 while the Shannon-Wiener's formula was used to calculate the colonization frequency of the species in a sample: The evenness of species was calculated using the formula: where S is the number of species in the sample. As for the antibacterial analysis, the halos formed were measured in millimeters (mm) which enabled the calculation of means and standard deviation on the Excel program.

Results

Endophytic fungi

A total of 581 fungi were recovered from leaves and stems of *H. sucuuba* with a 97.9% colonization frequency (CF). There was a greater number of fungi isolated from the leaf (338 fungi - 58.2%) compared to the isolation of endophytic fungi from the stem (243 fungi - 41.8%) (Table 1).

The culture media without plant extract registered the highest number of fungi while the SDA medium had the highest isolation frequency with 187 fungi (32.2%) (Table 1). The second culture medium with the highest frequency of isolation was PDA with 142

Table 1. Number and relative frequency percentages of fungal endophytes isolated from *Himatanthus sucuuba* according to the plant tissue, culture medium, and temperature

Genus	Plant tissue		Culture medium						Temperature		T	RF (%)
	Leaf	Stem	PDA	PDA+ leaf	PDA+ stem	SDA	SDA+ leaf	SDA+ stem	18°C	28°C		
<i>Colletotrichum</i>	184	20	50	45	-	64	39	6	99	105	204	35.1
<i>Phomopsis</i>	27	34	18	11	5	10	7	10	40	21	61	10.5
<i>Xylaria</i>	2	27	4	1	8	9	-	7	17	12	29	5.0
<i>Penicillium</i>	4	9	4	-	1	6	1	1	7	6	13	2.2
<i>Guignardia</i>	9	-	3	1	-	4	1	-	4	5	9	1.6
<i>Pestalotiopsis</i>	7	1	-	1	-	5	1	1	3	5	8	1.4
<i>Aspergillus</i>	2	3	1	1	-	2	1	-	2	3	5	0.9
<i>Acremonium</i>	1	3	-	-	2	1	-	1	-	4	4	0.7
<i>Fusarium</i>	1	2	1	-	-	1	1	-	-	3	3	0.5
<i>Trichoderma</i>	2	1	-	-	-	2	1	-	1	2	3	0.5
<i>Cladosporium</i>	2	-	-	2	-	-	-	-	-	2	2	0.3
<i>Geotrichum</i>	2	-	2	-	-	-	-	-	2	-	2	0.3
<i>Phoma</i>	-	2	-	-	2	-	-	-	-	2	2	0.3
<i>Curvularia</i>	-	1	-	-	-	1	-	-	1	-	1	0.2
<i>Paecilomyces</i>	1	-	1	-	-	-	-	-	1	-	1	0.2
<i>Cylindrocladium</i>	1	-	-	-	-	1	-	-	1	-	1	0.2
<i>Mycelia sterilia</i>	93	140	58	26	31	81	15	22	111	122	233	40.1
Total	338	243	142	88	49	187	67	48	289	292	581	100
RF(%)	58.2	41.8	24.4	15.2	8.4	32.2	11.5	8.3	49.7	50.3		

T: Total identified in the sample; RF: Relative frequency

fungi (24.4%). The media with extracts used for isolation influenced the number of fungi recovered, as 155 fungi (26.7%) were isolated in the culture medium with leaf extract and 97 in the medium with stem extract (16.7%) (**Table 1**). On the contrary, the temperatures used in the isolation had little effect on the number of fungi isolated with 292 fungi (50.3%) isolated at 28°C and 289 fungi (49.7%) at 18°C (**Table 1**).

Endophytic fungi were classified into 259 morphospecies and 135 (52.1%) were identified distributed in 16 genera (**Table 1**). The isolates that formed reproductive structures were identified at the genus level after analyzing the macro and micromorphological aspects (**Figure S1**, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/1525/3199>). However, 124 (47.9%) morphospecies were not identified using morphological analysis given that they do not have reproductive structures.

Colletotrichum, *Phomopsis*, and *Xylaria* were the most dominant genera and some showed specificity. *Guignardia*, *Cladosporium*, *Geotrichum*, *Paecilomyces*, and *Cylindrocladium* were isolated only from the leaf while *Phoma* and *Curvularia* were isolated only from the stem (**Figure 3A**). The effect of temperature on fungus isolation evidenced that *Curvularia*, *Geotrichum*, *Paecilomyces*, and *Cylindrocladium* were isolated only at 18°C, and *Acremonium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, and *Phoma* only at 28°C (**Figure 3B**). Among the identified genera, only *Phomopsis* was isolated from all tissues and culture conditions used (**Figure 3C**).

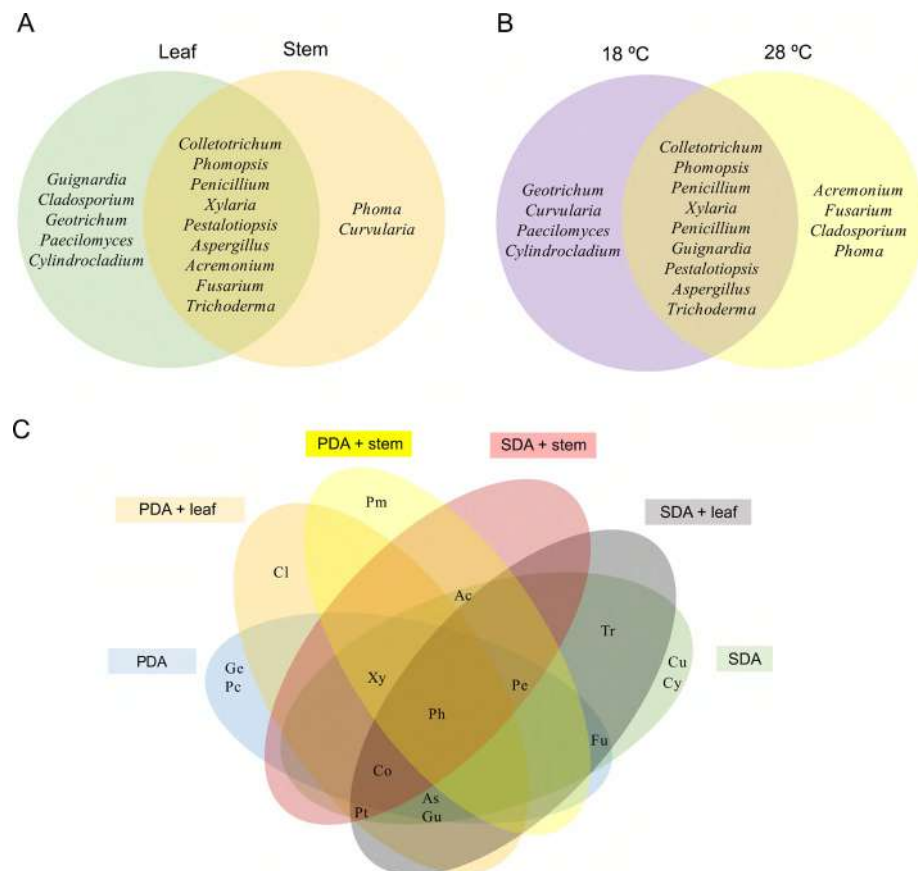


Figure 3. Venn diagram showing the effect of experimental conditions on the isolation of endophytic fungi isolated from *H. sucuuba*. **A)** Genera isolated according to plant tissue. **B)** Genera isolated according to temperature. **C)** Isolated genera according to the culture media used (Co: *Colletotrichum*; Ph: *Phomopsis*; Xy: *Xylaria*; Pe: *Penicillium*; Gu: *Guignardia*; Pt: *Pestalotiopsis* As: *Aspergillus*; Ac: *Acremonium*; Fu: *Fusarium*; Tr: *Trichoderma*; Cl: *Cladosporium*; Ge: *Geotrichum*; Pm: *Phoma*; Cu: *Curvularia*; Pc: *Paecilomyces*; Cy: *Cylindrocladium*)

Furthermore, the culture media used allowed the isolation of different *H. sucuuba* endophytic fungi. The Bi-plot and the load correlation graph from the principal component analysis (PCA) (**Figure 4A and B**) and the dendrogram showed that endophytic fungi such as *Colletotrichum*, *Aspergillus*, *Guignardia*, and *Fusarium* were more abundant in SDA and SDA+leaf extract (cluster 1) (**Figure 4C**). *Trichoderma* and *Pestalotiopsis* were more abundant in the SDA medium while *Curvularia* and *Cylindrocladium* were exclusive to this medium (cluster 2) (**Figure 4C**). Similarly, the *Phomopsis* and *Penicillium* genera were more frequent in the PDA medium and *Paecilomyces* was exclusive to this medium (cluster 3) (**Figure 4C**). **Figure 5** shows the distribution frequency of the genera, as well as the sterile mycelium, with the treatments under study.

Diversity indices provide important information about uncommon or common species in a community (**Table 2**). Stem and leaf extracts exhibited a high Shannon-Wiener index, higher in the stem (4.87) than in the leaf (4.60). Simpson's index had the same value for stem and leaves (0.99). Species uniformity was greater in the stem (0.89) than in the leaf (0.74).

The Shannon-Wiener diversity index was higher for the SDA medium (4.58) followed by the PDA (4.43). The culture media with extracts showed higher rates with the leaf medium showing higher values than the stem medium. Simpson's diversity index was

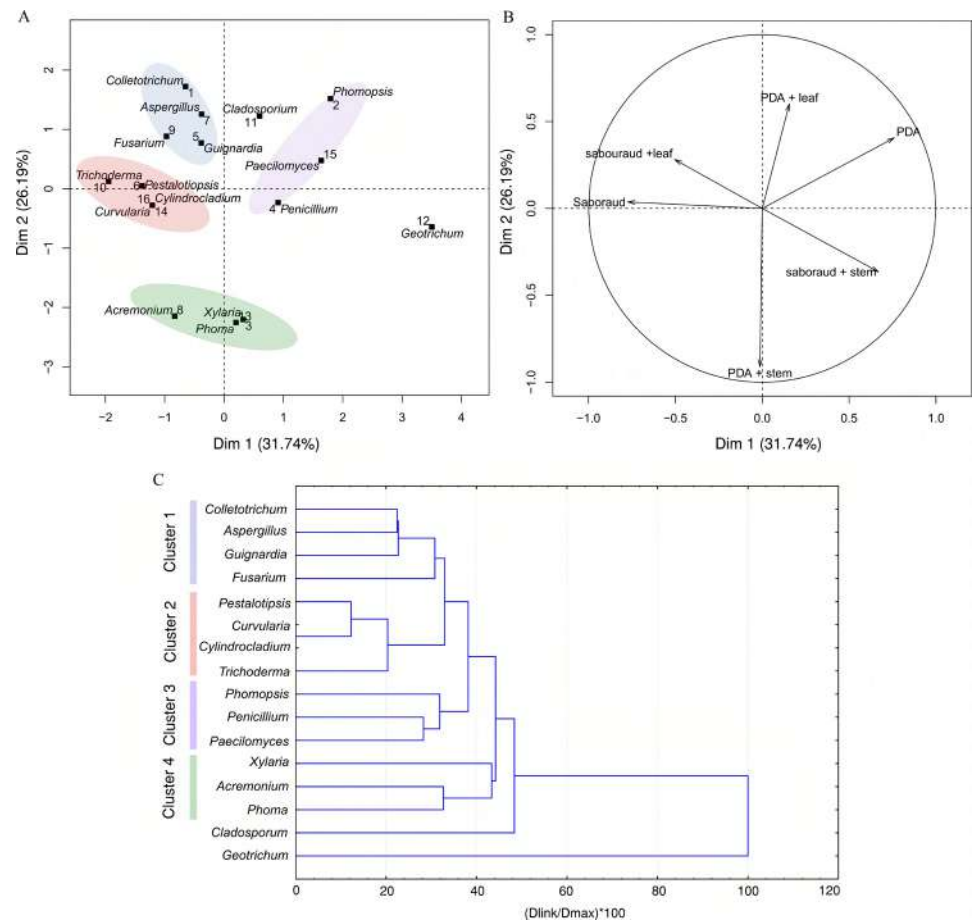


Figure 4. Principal component analysis (PCA) and dendrogram of fungal endophytes isolated on different culture media from *H. sucuuba*. **A)** Discriminations of endophytic fungi isolated on different media. **B)** Loading plot of media for the first two principal components, PC1, and PC2. **C)** Cluster analysis using Euclidean distance of endophytic fungi recovered from *H. sucuuba* based on different culture media

higher in the medium without extract, PDA, and SDA (0.99) followed by the medium with leaf (0.98) and stem (0.97) extracts. The uniformity of the observed species was greater for PDA+stem extract (0.95).

At 18°C (4.94) the highest values were registered with the Shannon-Wiener index followed by 28°C (4.83). Similar results were found for the evenness species at 18°C (0.87) and 28°C (0.85).

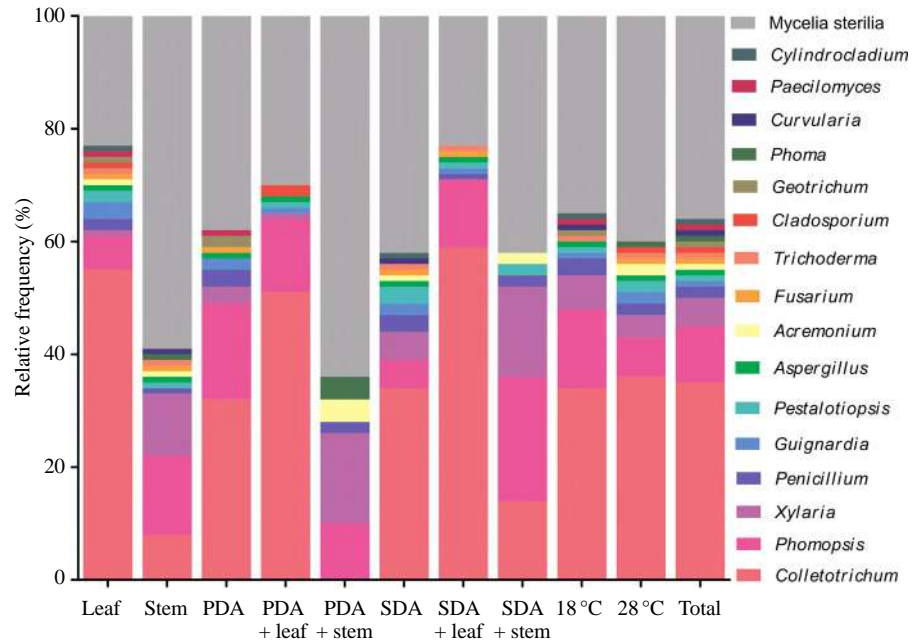


Figure 5. Relative frequency of genus of endophytic fungi isolated from *H. sucuuba* related to plant tissue, culture medium and temperature used

Table 2. Diversity indices of endophytic fungi from *Himatanthus sucuuba* according to the plant tissue, culture medium, and temperature

Index of diversity	Abundance	Species richness	Shannon-Wiener diversity	Simpson diversity	Species evenness
Tissue Type					
Leaf	338	141	4.60	0.99	0.79
Stem	243	152	4.87	0.99	0.89
Culture medium					
PDA	140	98	4.43	0.99	0.90
PDA+Leaf	90	57	3.89	0.98	0.87
PDA+Stem	49	42	3.69	0.97	0.95
SDA	187	119	4.58	0.99	0.88
SDA+Leaf	67	54	3.82	0.98	0.91
SDA+Stem	48	42	3.69	0.97	0.95
Temperature					
18°C	289	161	4.94	0.99	0.87
28°C	292	161	4.83	0.99	0.85
Total Sample	581	263	5.26	0.99	0.83

Antibacterial activity

A total of 235 endophytic fungal extracts were tested of which 28 (12%) had activity against *E. coli*, *K. pneumoniae*, *S. pneumoniae*, or *S. aureus* (Figure 6).

Among the *H. sucuuba* identified endophytic fungi, the genus *Xylaria* presented more morphospecies with antibacterial activity. The *Colletotrichum* genus inhibited the growth of all tested bacteria, mainly *S. pneumoniae* and *E. coli*. *Colletotrichum* sp. 3 (code 2. 3659) morphospecies showed antibacterial activity against all bacteria tested. Based on the sequencing of the ITS rDNA gene, this fungus was identified as *C. gloeosporioides* under the GenBank accession number MN639701 (Figure 7).

Fungal extracts produced by *Phomopsis* showed inhibitory activity mainly against *S. pneumoniae*. The fungal extract of *Phomopsis* sp. 3 (code 2. 3008) showed specific activity against *K. pneumoniae*, which was the most resistant bacterium to all extracts.

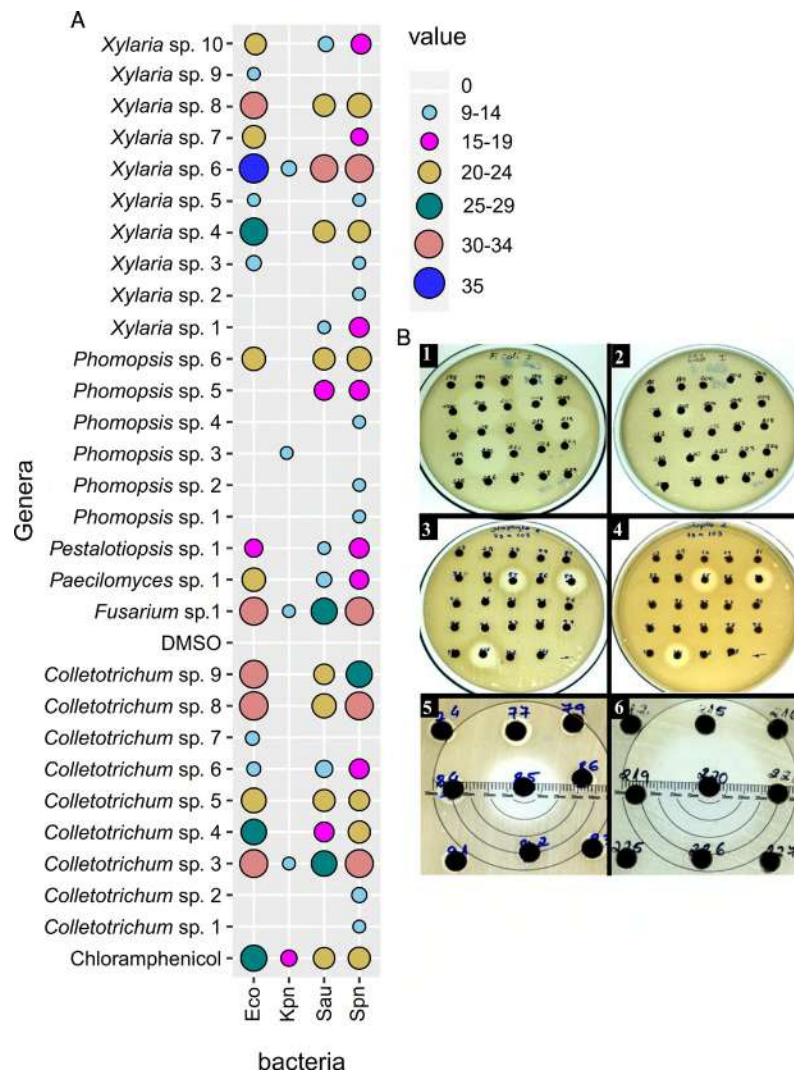


Figure 6. Antibacterial activity of endophytic fungi extracts isolated from *H. sucuuba*. **A**) Bubble chart showing antibacterial activity of endophytic fungi. Eco = *Escherichia coli*; Kpn= *Klebsiella pneumoniae*; Sau = *Staphylococcus aureus* and Spn = *Streptococcus pneumoniae*. **B**) Examples of bioassay plates of endophytic fungi extracts showing growth inhibition zones for *E. coli* (1), *K. pneumoniae* (2), *S. aureus* (3), and *S. pneumoniae* (4). The numbers 5 and 6 show measurement of growth inhibition zones of tested bacteria

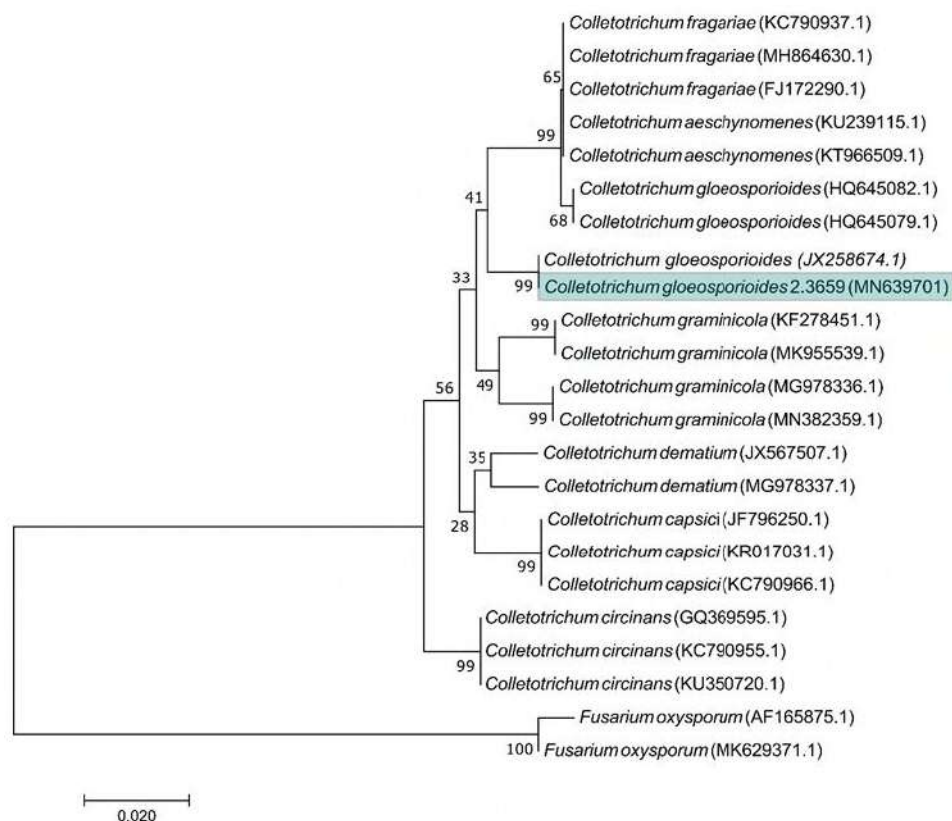


Figure 7. Neighbor-joining tree from ITS sequences showing the relationship between *Colletotrichum* species of the present study and other closely related *Colletotrichum* species retrieved from the GenBank. Bootstrap values (1000 replicates) are shown on the branches. Bar = 2 nucleotide substitutions per 100 nucleotides

The *Fusarium* genus presented activity against all tested bacteria. Although *Fusarium* isolates from *H. sucuuba* have not been effective as antibacterials, they can still be investigated for other biotechnological applications. *Paecilomyces* and *Pestalotiopsis* also had a single fungal extract showing activity against *E. coli*, *S. pneumoniae*, and *S. aureus*. The most sensitive bacteria to fungal extracts were *S. pneumoniae* and *E. coli*. *K. pneumoniae* was the most resistant when compared to the chloramphenicol control with (**Figure 6**).

Regarding the action of fungal extracts against pathogenic bacteria, only 10.7% of the extracts inhibited the four tested bacteria, but 39.2% of them inhibited *E. coli*, *S. pneumoniae*, and *S. aureus*, and 10.7% of the extracts specifically inhibited *S. pneumoniae* (**Figure S2**, <https://www.raccefy.n.co/index.php/raccefy.n/article/view/1525/3199>).

Discussion

Our results showed a high frequency of isolation of *H. sucuuba* endophytic fungi (CF = 97.9%) and are similar to those observed for *Piper glabratum* Kunth (Oliveira, et al., 2015). However, this frequency is not always high in the isolation of endophytic fungi such as *Euterpe precatoria* Mart., with an IF of 33% (Batista, et al., 2018). This suggests that the frequency of isolates and the species of fungi isolated may vary depending on the plant investigated (Vaz, et al., 2014).

Besides the environmental conditions in which the collected plants are found in nature, plant tissue, the culture medium, and the temperature can influence the frequency of isolation. The greatest number of isolated fungi was observed in the leaves, which confirms that they are the main entrance for endophytic microorganisms occurring due to the presence of

stomata and hydathodes, natural openings in the leaves. Although the leaf is considered the main entry of endophytes to the plant, they can migrate to other organs depending on the plant species, the seasonal conditions, and the nutritional variation of each plant according to age (**Petrini, et al.**, 1993). A greater number of endophytic fungi isolated from the leaf has also been observed in *Eugenia jambolana* Lam. (**Yadav, et al.**, 2015).

In the present study, the culture media with no extracts had the highest number of isolates while in the SDA medium we registered the greatest abundance followed by PDA. PDA is the most used culture medium in the isolation of endophytic fungi and here we used it for the isolation of *Pinus radiata* D. Don (**Martínez-Álvarez, et al.**, 2016) and *Polygonum hydropiper* L. (**Ye, et al.**, 2019).

Of the total of isolated fungi, 26.7% was recovered in the leaf extract medium and 16.7% in the stem extract medium (**Table 1**). The media with plant extract still showed good results, as they represented the isolation of 43.4% of endophytic fungi. Studies with plant extract to supplement culture media can be the object of more specific experiments to define concentrations and other tests that demonstrate that the nutritional conditions of the host plant are maintained.

Another important condition for the isolation of endophytic fungi is temperature. Most studies on endophytic isolation are done at a temperature between 28°C and 37°C (**Farhat, et al.**, 2019; **Ye, et al.**, 2019). However, isolation done at lower temperatures (for example, 18°C) allows the growth of less frequent or slower-growing fungi which offers a better representation of the endophytic community (**Azevedo, et al.**, 2000).

Here, at 28°C we registered the highest number of *H. sucuuba* fungi despite the small difference as compared to the number isolated at 18°C. Another study also used 28°C as the standard temperature for isolation as it allows good conditions for the development of most endophytic fungi (**Freire, et al.**, 2015). Different environmental and nutritional conditions are important for the expression of endophytic fungi diversity and some genera grow in culture media or environmental conditions similar to those of the host.

Of the 581 endophytic fungi isolated from *H. sucuuba*, 52.1% were identified and distributed into 16 genera. However, 143 (55.2%) morphospecies were not identified. The high rate of unidentified fungi is associated with the identification method used. The use of morphological analysis methods is not easy due to the lack of specialists in taxonomy and recent advances (**Ding, et al.**, 2013). There is no ideal methodology for the characterization of microorganisms but the use of polyphasic taxonomy (micro and macromorphology, physiology, production of metabolites, and molecular data) is recommended given that using a set of techniques seems to help for better and more effective classification of fungi (**Passarini**, 2013).

Colletotrichum, *Phomopsis*, *Xylaria*, *Penicillium*, *Guignardia*, *Pestalotiopsis*, *Aspergillus*, *Acremonium*, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, *Geotrichum*, *Phoma*, *Curvularia*, *Paecilomyces*, and *Cylindrocladium* were identified as *H. sucuuba* endophytic fungi. Other studies in tropical regions also found these fungi to be endophytic. *Acremonium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, and *Trichoderma* were isolated from *Opuntia ficusindica* Mill. (**Bezerra, et al.**, 2012), and *Acremonium*, *Aspergillus*, *Colletotrichum*, *Fusarium*, and *Phoma* from *Theobroma cacao* (Mill.) Bernoulli (**Hanada, et al.**, 2010).

The *Colletotrichum* genus was the most frequent (**Figure 5**); its high frequency may be related to its facility to spread. Plants are subject to this genus of fungus at all stages of development, it can be disseminated from one plant to another by the wind, and the seeds can also infect seedlings (**Oshero & May**, 2001). They are commonly reported by authors of studies on endophytic fungi (**Oliveira, et al.**, 2020; **Santos, et al.**, 2020).

After *Colletotrichum*, *Phomopsis*, and *Xylaria* were the most frequent genera in this study. *Phomopsis* has more than 1,000 species, it is a plant parasite that grows on several plant species causing wilt, necrosis, cancer, rot, and dry stems and twigs, among other diseases (**Udayanga, et al.**, 2011). However, several studies have also described this fungus as endophytic in Amazonian plants (**Diniz, et al.**, 2020; **Inácio, et al.**, 2021;

Diniz, et al., 2021a; Diniz, et al., 2021b). *Xylaria* is described as a wood-damaging fungus isolated rather from tropical than subtropical plants (**Photita, et al., 2001; Inácio, et al., 2021**), which corroborates the findings in *H. sucuuba*.

Twelve percent of the tested fungal extracts showed antibacterial activity *Xylaria* being the genus with more fungi showing antibacterial activity. Several studies have reported the production of important substances by this genus, such as the compounds griseofulvin and dechlorhydriseofulphin with antibacterial and antifungal activity (**Chapla, et al., 2018; McMullin, et al., 2020**). In a study on the bioprospecting of *Ficus pumila* L. endophytic fungi, *Xylaria* sp. FPL-25 (M) showed a broad-spectrum antimicrobial activity against plant and human pathogens where the substance xylobovide-9-methyl ester was evidenced by bioautography. It is a promising hybrid product derived from natural polyketide as it is the basis for important antibiotics on the market (**Rakshith, et al., 2020**). Another endophytic strain of *Xylaria* sp., isolated from the stem of *Isodon sculponeatus* (Vaniot) Kudo, also produced six new xylariahgens A - F (1 - 6) compounds (**Chen, et al., 2018**). These studies support the idea that *Xylaria* strains are sources of potential drugs.

Colletotrichum can be found on many plant hosts as pathogens or endophytes, as well as saprobes (**Ma, et al., 2018**). In the present study, the endophyte inhibited the growth of all tested bacteria, mainly *S. pneumoniae* and *E. coli*. *Colletotrichum* sp. 3 (2,369) was identified by molecular characterization as *C. gloeosporioides*. In the literature, numerous bioactive substances from *C. gloeosporioides* endophytes such as coleoptic acid with activity against *Bacillus subtilis*, *Sarcina lutea*, *Pseudomonas* sp. and *S. aureus* have been reported (**Hong Lu, et al., 2000; Zou, et al., 2000**). The expression of the HupA gene by the *C. gloeosporioides* Cg01 strain has also been reported, which leads to the production of huperzine A, an important substance in Alzheimer's treatment (**Kang, et al., 2019**). The inhibitory activity of phosphoinositide 3-kinase (PI3K α) is important for chemical therapy as it has shown antitumor activity; it was detected in the *C. gloeosporioides* (*Uncaria rhynchophylla* endophyte) strain due to the production of cycle L-leucil-L-leucyl and brevianamide F substances (**Yang, et al., 2019**) thus contributing to advances in pharmaceutical research.

Fungal extracts produced by *Phomopsis* exhibited inhibitory activity mainly against *S. pneumoniae*. Besides this inhibitory activity and the potential reported in several studies, the fungal extract produced by *H. sucuuba* *Phomopsis* sp. 3 (2.3008) showed specific activity against *K. pneumoniae*, the most resistant bacterium to all extracts, with great potential for the development of new drugs. It has been reported that *Phomopsis* strains have inhibitory activity against filamentous fungi, bacteria, and yeasts (**Corrado & Rodrigues, 2004; Weber, et al., 2004**). Furthermore, a recent study on the endophyte *Phomopsis prunorum* evidenced the presence of fomoterpenes and fomoisocoumarins with antibacterial activity (**Qu, et al., 2020**).

Considering our positive results on the antibacterial activity of *H. sucuuba* endophytic fungal extracts against Gram-positive and Gram-negative bacteria, this fungal community has promising research potential.

There is an endophytic diversity in the leaves and the stem of *H. sucuuba*. Besides, this species is a great host of endophytic fungi that deserve to be studied in other tissues such as roots and fruits. The extracts from these endophytic fungi have antibacterial activity, inhibiting Gram-positive and Gram-negative bacteria and, therefore, can be a source of broad-spectrum antibiotics. This is the first report on the endophytic fungal community of the Amazonian medicinal plant sucuba (*H. sucuuba*) and its antibacterial potential.

Supplementary information

Figure S1. Macromorphology (macro) and micromorphology (micro) of endophytic fungi isolated from *Himathantus sucuuba*. 1a. *Colletotrichum* macro. 1b. micro *Colletotrichum*. 2a. *Aspergillus* macro. 2b. micro *Aspergillus*. 3a. *Penicillium* macro. 3b. micro *Penicillium*.

4a. *Fusarium* macro. 4b. micro *Fusarium*. 5a. *Pestalotiopsis* macro. 5b. micro *Pestalotiopsis*. 6a. *Cylindrocladium* macro. 7b. micro *Cylindrocladium*. See figure S1 in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1525/3199>

Figure S2. Antibacterial spectrum of endophytic fungi from *Himatanthus sucuuba*. Eco + Kpn + Spn + Sau: growth inhibition of all bacteria: *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Streptococcus pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*; Eco + Spn + Sau: growth inhibition of the three bacteria; Eco + Spn, Spn + Sau: growth inhibition of the two respective bacteria; Eco, Kpn, Spn, Sau: growth inhibition of the respective bacterium. See figure S2 in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1525/3199>

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support provided by the *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)* and *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)* through a scholarship to carry out the project.

Author contributions

MFRG: Methodology development and study data analysis; FVD: Methodology development and manuscript drafting; AVdeA: Manuscript drafting; LPP: Development of the molecular data analysis methodology; CMC: Direction and coordination of the planning stage and execution of research activities

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests.

References

- Abdalla, M. A., McGaw, L. J. (2018). Bioprospecting of South African plants as a unique resource for bioactive endophytic microbes. *Frontiers in Pharmacology*. **9**: 456. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00456>.
- Aboobaker, Z., Viljoen, A., Chen, W., Crous, P. W., Maharaj, V.J., Van Vuuren, S. (2019). Endophytic fungi isolated from *Pelargonium sidoides* DC: Antimicrobial interaction and isolation of a bioactive compound. *South African Journal of Botany*. **122**: 535-542. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.01.011>
- Azevedo, J. L., Maccheroni, Jr. W., Pereira, J. O., De Araújo, W. L. (2000). Endophytic microorganisms: a review on insect control and recent advances on tropical plants. *Electronic Journal of Biotechnology*. **3**: 15-16. <https://doi.org/10.4067/S0717-34582000000100004>
- Barnett, H.L., Hunter, B. B. (1999). *Illustrated genera of imperfect fungi*. St Paul, Brazil: APS. 218 p.
- Batista, B.N., Raposo, N.V.D.M., Silva, I.R.D. (2018). Isolamento e avaliação da atividade antimicrobiana de fungos endofíticos de açaizeiro. *Revista Fitos*. **12**: 161-174. <https://doi.org/10.5935/2446-4775.20180015>.
- Bezerra, J.D.P., Santos, M.G.S., Svedese, V.M., Lima, D.M.M., Fernandes, M.J.S., Paiva, L.M., Souza-Motta, C.M. (2012). Richness of endophytic fungi isolated from *Opuntia ficus-indica* Mill. (Cactaceae) and preliminary screening for enzyme production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. **28**: 1989-1995. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-1001-2>
- Bibi, S.N., Gokhan, Z., Rajesh, J., Mahomoodally, M.F. (2020). Fungal endophytes associated with mangroves—Chemistry and biopharmaceutical potential. *South African Journal of Botany*. **134**: 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.016>
- Calero-Armijos, L.L., Herrera-Calderon, O., Arroyo-Acevedo, J.L., Rojas-Armas, J.P., Hañari-Quispe, R.D., Figueroa-Salvador, L. (2020). Histopathological evaluation of latex of Bellaco-Caspi, *Himatanthus sucuuba* (Spruce) Woodson on wound healing effect in BALB/C mice. *Veterinary World*. **13**: 1045. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.1045-1049>
- Chen, R., Tang, J.W., Li, X.R., Liu, M., Ding, W.P., Zhou, Y.F., Wang, W.G., Du, X., Sun, H.D., Puno, P.T. (2018). Secondary metabolites from the endophytic fungus *Xylaria* sp. hg1009. *Natural Products and Bioprospecting*. **8** (2): 121-129. <https://doi.org/10.1007/s13659-018-0158-x>

- Cintrón, G., Lugo, A.E., Pool, D.J., Morris, G.** (1978). Manguezais de ambientes áridos em Porto Rico e ilhas adjacentes. *Biotropica*. **10** (2): 110-121. <http://www.jstor.org/pss/2388013>
- Corrado, M. & Rodrigues, K.F.** (2004). Antimicrobial evaluation of fungal extracts produced by endophytic strains of *Phomopsis* sp. *Journal of Basic Microbiology*. **44**: 157-160. <https://doi.org/10.1002/jobm.200310341>.
- Da Silva, M.B., Da Silva, M.P., Dos Reis Júnior, J.D.D., Lima, C.A.C., de Oliveira Souza, A.** (2021). Therapeutic activities of Amazonian plant *Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson (Apocynaceae): A Review. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*. **24** (2): 1-14 <https://doi.org/10.9734/jabb/2021/v24i230197>
- Ding, X., Liu K., Deng, B., Chen, W., Li W., Liu, F.** (2013). Isolation and characterization of endophytic fungi from *Camptotheca acuminata*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. **29**: 1831-1838. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1345-x>
- Dini-Andreote, F.** (2020). Endophytes: The Second Layer of Plant Defense. *Trends in Plant Science*. **25**: 319-322. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.01.007>
- Diniz, F.V., Doi, M.S.R.S., Fittipaldy, M.C.P.M., Lopes, R.F., Margarido, S.S.O.R., Pontes, S.M.A., Ramos, D.P., Araújo, A.V., Carvalho, C.M.** (2021a). Isolation and identification of endophytic fungi from the amazonian palm *Oenocarpus bataua* Mart. *South American Journal of Basic Education, Technical and Technological*. **8** (1): 139-153.
- Diniz, F.V., de Araújo, A.V., da Silva Faria, M. A., Elisabete, M., Morselli, P., Ramos, L.J., Carvalho, C.M.** (2021b). Cultivable endophytic fungi associated with the murumuru Amazon palm (*Astrocaryum ulei* Burret). *Scientia Vitae*. **12** (34): 23-32.
- Diniz, F.V., Lima, Y.D.M.M., Paz, F.S., Silva, A.L.D., Gomes, L.C., Santos, G.S., Carvalho, C.M.** (2020). Atividade enzimática de fungos endofíticos de bacaba (*Oenocarpus bacaba* Mart.). *Biota Amazônia (Biota Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota)*. **10** (3): 7-11 <https://doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v10n3p7-11>
- Duhan, P., Bansal, P., Rani, S.** (2020). Isolation, identification and characterization of endophytic bacteria from medicinal plant *Tinospora cordifolia*. *South African Journal of Botany*. **134**: 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.01.047>
- Egamberdieva, D., Wirth, S., Behrendt, U., Ahmad, P., Berg G.** (2017). Antimicrobial activity of medicinal plants correlates with the proportion of antagonistic endophytes. *Frontiers in Microbiology*. **8**: 199. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00199>
- Fakhrudin, N., Waltenberger, B., Cabaravdic, M., Atanasov, A. G., Malainer, C., Schachner, D., Heiss, E.H., Liu, R., Noha, SM, Grzywacz, A.M., Mihaly-Bison, J, Awad, E.M., Schuster, D., Breuss, J.M., Rollinger, J.M., Bochkov, V., Stuppner, H., Dirsch, V.M.** (2014). Identification of plumericin as a potent new inhibitor of the NF-κB pathway with anti-inflammatory activity *in vitro* and *in vivo*. *British Journal of Pharmacology*. **171**: 1676-1686. <https://doi.org/10.1111/bph.12558>
- Farhat, H., Urooj, F., Tariq, A., Sultana, V., Ansari, M., Ahmad, V.U., Ehteshamul-Haque, S.** (2019). Evaluation of antimicrobial potential of endophytic fungi associated with healthy plants and characterization of compounds produced by endophytic *Cephalosporium* and *Fusarium solani*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. **18**: 101043. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101043>
- Fisch, G., Marengo, J.A., Nobre, C.A.** (1998). Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazônica*. **28**: 101-101. <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>
- Freire, M., Carvalho, S., Coutinho, H., Imbeloni, T., Silva, V., Mussi-Dias, V.** (2015). Bio-prospecção da flora fúngica endofítica de Restinga para uso no controle biológico de pragas. *Ciências Biológicas e da Saúde*. **5**: 35. <https://doi.org/10.25242/88685182015767>
- Gos, F.M., Savi, D.C., Shaaban, K.A., Thorson, J.S., Aluizio, R., Possiede, Y.M., Rohr, J., Glienke, C.** (2017). Antibacterial activity of endophytic actinomycetes isolated from the medicinal plant *Vochysia divergens* (Pantanal, Brazil). *Frontiers in Microbiology*. **8**: 1642. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01642>
- Hanada, R.E., Pomella, A.W.V., Costa, H.S., Bezerra, J.L., Loguercio, L.L., Pereira, J.O.** (2010). Endophytic fungal diversity in *Theobroma cacao* (cacao) and *T. grandiflorum* (cupuaçu) trees and their potential for growth promotion and biocontrol of black-pod disease. *Fungal Biology*. **114**: 901-910. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2010.08.006>
- Hong, Lu., Zou, W.X., Meng, J.C., Hu, J., Tan, R.X.** (2000). New Bioactive Metabolites Produced by *Colletotrichum* sp., an Endophytic Fungus in *Artemisia annua*. *Plant Science*. **151**: 67-73. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00199-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00199-5)

- Inácio, I.A., Diniz, F.V., Peters, L.P., Carvalho, C.M.** (2021). Characterization of cultivable endophytic fungi from the medicinal plant *Senna reticulata* (Willd.) HS Irwin & Barneby. *Revista Cereus*. **13**(2): 42-58. <https://doi.org/10.18605/2175-7275/cereus.v13n2p42->
- Kang, X., Liu, C., Shen, P., Hu, L., Lin, R., Ling, J., Xiong, X., Xie, B., Liu, D.** (2019). Genomic characterization provides new insights into the biosynthesis of the secondary metabolite huperzine a in the endophyte *Colletotrichum gloeosporioides* Cg01. *Frontiers in microbiology*. **9**: 3237.
- Khare, E., Mishra, J., Arora, N.K.** (2018). Multifaceted interactions between endophytes and plant: developments and prospects. *Frontiers in Microbiology*. **9**: 2732. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02732>
- Kusari, S., Singh, S., Jayabaskaran, C.** (2014). Biotechnological potential of plant-associated endophytic fungi: hope versus hype. *Trends in Biotechnology*. **32**: 297-303. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.03.009>
- Larrosa, C.R., Duarte, M.R.** (2005). Contribution to the anatomical study of the stem of *Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson, Apocynaceae. *Revista Brasileira de Farmacognosia*. **15**: 110-114. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2005000200007>
- Linhares, J.F.P. & Pinheiro, C.U.B.** (2011). Sustentabilidade socioambiental da extração de janaúba (*Himatanthus* Willd. Ex schult.) no Município de Alcântara, Estado do Maranhão, Brasil. *Revista Pan-Amazônica de Saúde*. **2**: 57-58. <https://doi.org/10.5123/S2176-62232011000400009>
- Lorenzi, H.** (1998). Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa, Brasil: Editora Plantarum. 352 p.
- López-Jácome, E., Franco-Cendejas, R., Quezada, H., Morales-Espinosa, R., Castillo-Juárez, I., González-Pedrajo, B., Fernández-Presas, A.M., Tovar-García, A., Angarita-Zapata, V., Licona-Limón, P., Martínez-Vázquez, M., García-Contreras, R.** (2019). The race between drug introduction and appearance of microbial resistance. Current balance and alternative approaches. *Current Opinion in Pharmacology*. **48**: 48-56.
- Ma, X., Nontachaiyapoom, S., Jayawardena, R.S.** (2018). Endophytic *Colletotrichum* species from *Dendrobium* spp. in China and Northern Thailand. *MycKeys*. **43**: 23. <https://doi.org/10.3897/mycokeys.43.25081>
- Mantzoukas, S. & Eliopoulos, P.A.** (2020). Endophytic Entomopathogenic Fungi: A Valuable Biological Control Tool against Plant Pests. *Applied Sciences*. **10**: 360. <https://doi.org/10.3390/app10010360>
- Martínez-Álvarez, P., Fernández-González, R.A., Sanz-Ros, A.V., Pando, V., Díez, J.J.** (2016). Two fungal endophytes reduce the severity of pitch canker disease in *Pinus radiata* seedlings. *Biological Control*. **94**: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.11.011>
- McMullin, D.R., Tanney, J.B., Daly, G.J., Miller, J.D.** (2020). Antifungal polyketides from the *Picea rubens* and *Vaccinium angustifolium* endophyte *Lachnellula calyciformis*. *Mycological Progress*. **19** (10): 1101-1112. <https://doi.org/10.1007/s11557-020-01620-5>
- Miranda, A.L.P., Silva, J.R., Rezende, C.M., Neves, J.S., Parrini, S.C., Pinheiro, M.L.B., Cordeiro, M.C., Tamborini, E., Pinto, A.C.** (2000). Anti-inflammatory and Analgesic Activities of the Latex Containing Triterpenes from *Himatanthus sucuuba*. *Planta Medica*. **66**: 284-286. <https://doi.org/10.1055/s-2000-8572>
- NCCLS.** (2003). Methods for Dilution Antimicrobial Susceptibility Tests for Bacteria That Grow Aerobically; Approved Standard. Date of access: January 20, 2016. Retrieved from: http://www.sbac.org.br/pt/pdfs/biblioteca/clsi_OPASM7_A6.pdf
- Oliveira, J.A. dos S., Polli, A.D., Polonio, J.C., Orlandelli, R.C., Conte, H., Azevedo, J.L., Pamphile, J.A.** (2020). Bioprospection and molecular phylogeny of culturable endophytic fungi associated with yellow passion fruit. *Acta Scientiarum Biological Sciences*. **42** (1): 48321. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v42i1.48321>
- Oliveira, K.M., Boas, E.V., Bonetti, L.P., Júnior, E.L.C., Bernardi-Wenzel, J.** (2015). Isolamento e atividade antibacteriana de fungos endofíticos de *Piper glabratum* Kunth. *Arquivos de Ciências da Saúde UNIPAR*. **19**: 3-9. <https://doi.org/10.25110/arqsaude.v19i1.2015.5258>
- Oshero, N., May, G.S.** (2001). The molecular mechanisms of conidial germination. *FEMS Microbiology Letters*. **199**: 153-160. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2001.tb10667.x>
- Passarini, M.R.Z., Santos, C., Lima, N., Berlinck, R.G.S., Sette, L.D.** (2013). Filamentous fungi from the Atlantic marine sponge *Dragmacidon reticulatum*. *Archives of Microbiology*. **195**: 99-111. <https://doi.org/10.1007/s00203-012-0854-6>

- Peters, L.P., Prado, L.S., Silva, F.I., Souza, F.S., Carvalho, C.M.** (2020). Selection of endophytes as antagonists of *Colletotrichum gloeosporioides* in açai palm. *Biological Control*. **150**: 104350. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104350>
- Petrini, O., Sieber, T.N., Toti, L., Viret, O.** (1993). Ecology, metabolite production, and substrate utilization in endophytic fungi. *Natural Toxins*. **1**: 185-196. <https://doi.org/10.1002/nt.2620010306>
- Photita, W., Lumyong, S., Lumyong, P., Hyde, K.D.** (2001). Endophytic fungi of wild banana (*Musa acuminata*) at doi Suthep Pui National Park, Thailand. *Mycological Research*. **105**: 1508-1513. <https://doi.org/10.1017/S0953756201004968>
- Qu, H.R., Yang, W.W., Zhang, X.Q., Lu, Z.H., Deng, Z.S., Guo, Z.Y., Cao, F., Zou, K., Proksch, P.** (2020). Antibacterial bisabolane sesquiterpenoids and isocoumarin derivatives from the endophytic fungus *Phomopsis prunorum*. *Phytochemistry Letters*. **37**: 1-4.
- Rakshith, D., Gurudatt, D.M., Rao, H.Y., Mohana, N.C., Nuthan, B.R., Ramesha, K.P., Satish, S.** (2020). Bioactivity-guided isolation of antimicrobial metabolite from *Xylaria* sp. *Process Biochemistry*. **92**: 378-385. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.01.028>
- Rodrigues, E., Almeida, J.M.D., Pires, J.M.** (2010). Perfil farmacológico e fitoquímico de plantas indicadas pelos caboclos do Parque Nacional do Jaú (AM) como potenciais analgésicos. *Revista Brasileira de Farmacognosia*. **20**: 981-991. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2010005000008>
- Santos, C., Silva, B.N.S., Ferreira, A.F.T.A.F., Santos, C., Lima, N., Silva Bentes, J.L.S.** (2020). Fungal endophytic community associated with guarana (*Paullinia cupana* var. *Sorbilis*): diversity driver by genotypes in the centre of origin. *Journal of Fungi*. **6** (3): 123. <https://doi.org/10.3390/jof6030123>
- Silva, J.R.A., Rezende, C.M., Pinto, A.C., Amaral, A.C.F.** (2010). Cytotoxicity and antibacterial studies of iridoids and phenolic compounds isolated from the latex of *Himatanthus sucuuba*. *African Journal of Biotechnology*. **9**: 7357-7360. <https://doi.org/10.5897/AJB10.345>
- Soares, D.C., Andrade, A.L., Delorenzi, J.C., Silva, J.R., Freire-de-Lima, L., Falcão, C.A., Pinto A.C., Rossi-Bergmann, B., Saraiva, E.M.** (2010). Leishmanicidal activity of *Himatanthus sucuuba* latex against *Leishmania amazonensis*. *Parasitology International*. **59**: 173-177. <https://doi.org/10.1016/j.parint.2010.01.002>
- Sprenger, L.K., Vanhoni, M.S., Giese, E.G., Dos Santos, J.N., Molento, M.B.** (2016). Efeito acaricida in vitro do extrato hidroalcoólico de *Himatanthus sucuuba* contra *Rhipicephalus microplus*. *Archives of Veterinary Science*. **21** (2): 64-74. <https://doi.org/10.5380/avs.v21i2.44506>
- Tamura, K., Dudley, J., Nei, M., Kumar, S.** (2007). MEGA4: molecular evolutionary genetics analysis (MEGA) software version 4.0. *Molecular Biology and Evolution*. **24**: 1596-1599. <https://doi.org/10.1093/molbev/msm092>
- Udayanga, D., Liu, X., Mckenzie, E.H., Chukeatirote, E., Bahkali, A.H., Hyde, K.D.** (2011). The genus *Phomopsis*: biology, applications, species concepts and names of common phytopathogens. *Fungal Diversity*. **50**: 189. <https://doi.org/10.1007/s13225-011-0126-9>
- Vaz, A.B.M., Da Costa, A.G.F.C., Raad, L.V.V., Goes-Neto, A.** (2014). Fungal endophytes associated with three South American Myrtaceae (Myrtaceae) exhibit preferences in the colonization at leaf level. *Fungal Biology*. **118**: 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2013.11.010>
- Vitolo, M. & Pessoa Jr. A.** (2015). *Biotecnologia Farmacêutica: Aspectos sobre aplicação industrial*. São Paulo: Editora Blucher, 50 p.
- Weber, R.W., Stenger, E., Meffert, A., Hahn, M.** (2004). Brefeldin A production by *Phoma medicaginis* in dead pre-colonized plant tissue: a strategy for habitat conquest? *Mycological Research*. **108**: 662-671. <https://doi.org/10.1017/S0953756204000243>
- White, T.J., Bruns, T., Lee, S.J.W.T., Taylor, J.** (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications*. **18**: 315-322.
- Yadav, P., Owiti, N., Kim, N.** (2015). The role of topoisomerase I in suppressing genome instability associated with a highly transcribed guanine-rich sequence is not restricted to preventing RNA: DNA hybrid accumulation. *Nucleic Acids Research*. **44**: 718-729. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv1152>
- Yang, ZD, Li, Z.J., Zhao, J.W., Sun, J.H., Yang, L.J., Shu, Z.M.** (2019). Secondary metabolites and PI3K inhibitory activity of *Colletotrichum gloeosporioides*, a fungal endophyte of *Uncaria rhynchophylla*. *Current Microbiology*. **76** (7): 904-908.
- Ye, D., Li, T., Yi, Y., Zhang, X., Zou, L.** (2019). Characteristics of endophytic fungi from *Polygonum hydropiper* suggest potential application for P-phytoextraction. *Fungal Ecology*. **41**: 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2019.05.001>

Artículo original

Materiales carbonosos jerarquizados derivados de la borra de café para su aplicación en supercondensadores

Hierarchical carbonaceous materials derived from spent coffee grounds for application in supercapacitors

Estefanía Arredondo-Ferrer¹, Robison Buitrago-Sierra², Diana López^{1,*}

¹Instituto de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

²Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para admisión de Diana López como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

El uso de residuos de borra de café para la obtención de carbones activados mediante carbonización hidrotérmica se ha abordado de forma poco sistemática en la literatura, lo que sumado a la necesidad de mejorar los sistemas de almacenamiento de energía, exige la realización de estudios sistemáticos de estos procesos. En el presente trabajo se obtuvieron carbones activados con porosidad jerarquizada a partir de biomasa por medio de carbonización hidrotérmica y activaciones químicas. Se analizó el efecto del tiempo y la temperatura de la carbonización hidrotérmica de la borra de café, con el fin de obtener un alto grado de carbonización y mejores rendimientos de reacción. En cuanto a la porosidad, se utilizaron tres agentes directores de estructura para obtener una distribución de poros jerarquizada. Con respecto al desarrollo de los materiales, el análisis termogravimétrico y el elemental confirmaron la obtención de un material mucho más carbonizado con la carbonización hidrotérmica a 250 °C durante 6 h, en tanto que a 200 °C durante 6 h se logró un mayor rendimiento de reacción. Los carbones activados se caracterizaron utilizando isoterms y micrografías de microscopía electrónica de barrido (MEB) para el análisis de la porosidad y el área superficial, y se comprobó que todos los materiales sintetizados obtuvieron una distribución jerárquica de poros. Asimismo, se evaluó el comportamiento de los materiales como electrodos para supercondensadores, evidenciándose una mejor capacitancia específica con el carbón obtenido por activación con hidróxido de potasio (KOH).

Palabras claves: Borra de café; Carbonización hidrotérmica; Supercondensadores; Activación química; Condensadores electroquímicos de doble capa-EDLC.

Abstract

The use of spent coffee grounds residues to obtain activated carbons by hydrothermal carbonization has not been approached in a systematic way in the literature, which, added to the need for improved energy storage systems, requires systematic studies of these processes. Here we obtained activated carbons with hierarchical porosity from biomass through hydrothermal carbonization and chemical activations. We analyzed the effect of the time and temperature of the hydrothermal carbonization of spent coffee grounds to obtain a high degree of carbonization and better reaction yields. As for the porosity, we used three structural directors to obtain a hierarchical pore distribution. Regarding the development of materials, the thermogravimetric and elemental analyses confirmed that hydrothermal carbonization at 250 °C for 6 h yielded much more carbonized material while at 200 °C for 6 h, a higher reaction performance was achieved. We also characterized the activated coals by isotherms and SEM micrographs to ensure the porosity and surface area required for obtaining a hierarchical distribution of pores in all the synthesized materials. Likewise, we evaluated their behavior as electrodes for supercapacitors obtaining a better specific capacitance with the carbon obtained by activation with *potassium hydroxide* (KOH).

Keywords: Spent coffee grounds; Hydrothermal carbonization; Chemical activation; Supercapacitors; EDLC.

Citación: Arredondo-Ferrer E, Buitrago-Sierra R, López D. Materiales carbonosos jerarquizados derivados de la borra de café para su aplicación en supercondensadores. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):233-247, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1585>

Editor: Diógenes Campos Romero

***Correspondencia:**

Diana López; diana.lopez@udea.edu.co

Recibido: 19 de octubre de 2021

Aceptado: 20 de diciembre de 2021

Publicado en línea: 28 de febrero de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Con el aumento en la demanda de electricidad, estimado en un 2,1 % por año hasta el 2040 (**International Energy Agency-IEA**, 2019), también se ha incrementado la necesidad de mejorar los sistemas de almacenamiento de energía y los supercondensadores son una alternativa. Estos son sistemas de almacenamiento de energía que se dividen en dos tipos según su funcionamiento: los sistemas de doble capa eléctrica (*electric double layer capacitor*, EDLC) y los pseudocondensadores. Los primeros almacenan la carga por medio de interacciones electrostáticas debidas a la adsorción y desorción de iones en la interfaz del material, y los segundos tienen en la superficie del material elementos o compuestos capaces de llevar a cabo reacciones de reducción-oxidación reversibles (**Subramanian, et al.**, 2007).

Los EDLC se caracterizan por tener una alta densidad de potencia, es decir, tienen una excelente capacidad de dar y almacenar la carga en periodos cortos de tiempo (**Subramanian, et al.**, 2007). Además, tienen ciclos de vida útil que suelen ser superiores a 5.000 (**Yun, et al.**, 2015), lo que es relativamente alto comparado con las baterías comerciales de ion litio, específicamente la de litio-ferrofosfato, que tiene una vida útil de hasta 1.500 ciclos (**Yang, et al.**, 2018). Dicha propiedad se fundamenta en las características texturales de los materiales que componen sus electrodos. Un almacenamiento de energía alto, es decir, una alta capacitancia, requiere de una amplia interacción de su superficie con el electrolito, por lo que a mayor área superficial mayor el área de interacción. Si el material tiene una porosidad desarrollada por donde puedan ingresar los iones del electrolito, la doble capa eléctrica tendrá una mayor longitud, aumentando así la capacitancia. Debido a que su sistema de almacenamiento de energía es netamente electrostático (para los EDLC), una vez se aplica un potencial externo se genera una polarización del material y, en consecuencia, una interacción de cargas con el electrolito, de manera que el proceso de carga y descarga se suele dar en el mismo tiempo y puede tardar segundos (**Kar**, 2020).

Actualmente los electrodos de los EDLC se hacen a partir de materiales carbonosos que pueden ser sintetizados de fuentes renovables; presentan, además, una gran conductividad, una amplia área superficial y fuerte estabilidad química, entre otras (**Elaiyappillai, et al.**, 2019).

La síntesis de electrodos de materiales carbonosos para EDLC ocurre a partir de dos características fundamentales: una alta área superficial y una porosidad jerarquizada. Cuanto mayor sea el área superficial mayor será el área de interacción entre la interfaz del material y el electrolito; la porosidad jerarquizada es fundamental por dos razones: por un lado, se requieren poros lo suficientemente grandes para el paso y movilidad de los iones en la interfaz del material, y por el otro, los poros deben ser lo suficientemente pequeños para que se genere la retención del ion y así se pueda generar la doble capa eléctrica dentro de las paredes de los poros (**M. Zhang, et al.**, 2018).

En la literatura especializada se han reportado diferentes técnicas y métodos para la síntesis de estos materiales dirigidos específicamente a las características ya mencionadas. Entre ellas se encuentra la síntesis de xerogeles por medio de microondas, el uso de plantillas, y las activaciones físicas y químicas, entre otras (**Zhang, et al.**, 2018; **Calvo, et al.**, 2013; **Rincón, et al.**, 2015; **Vinayagam, et al.**, 2020). Las activaciones químicas son de gran interés por el uso de diferentes agentes directores de estructura y de temperaturas de activación intermedias, entre 400 y 700 °C, comparadas con los procesos de pirólisis convencionales, con rangos entre 600 y 900 °C (**Bedia, et al.**, 2020). El uso de agentes directores de estructura como el KOH, el cloruro de zinc (ZnCl_2) y el ácido fosfórico (H_3PO_4), se ha reportado ampliamente, ya que los carbones activados que se obtienen con ellos llegan a valores de área superficial entre 406 y $3.362 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ y desarrollan una porosidad bastante amplia (**Dai, et al.**, 2018; **S. Li, et al.**, 2017; **Oliveira, et al.**, 2009). Así, la selección adecuada del agente o mezcla de agentes directores es fundamental en el comportamiento electroquímico de estos sistemas.

Estos procesos de activación pueden potenciar las características primarias del material de partida. El uso de biomasa como precursor para la obtención de un carbón activado implica en la mayoría de los casos tratamientos térmicos previos que maximizan el contenido de carbono fijo, introducen grupos funcionales y desarrollan propiedades primarias como el área superficial y la porosidad (Yakaboylu, *et al.*, 2021). Uno de los tratamientos previos más utilizados actualmente es la carbonización hidrotérmica.

La carbonización hidrotérmica (*hydrothermal carbonization*, HTC) es una conversión termoquímica que mediante reacciones como la deshidratación, la descarboxilación, la condensación, entre otras, convierte un precursor rico en material lignocelulósico en un material con una mayor cantidad de carbono (hidrochar) (Libra, *et al.*, 2011). Esta técnica utiliza temperaturas entre 180-350 °C y presiones autógenas, ya que emplea agua como solvente, la cual exhibe comportamientos propios de los solventes no polares y disminución de la constante dieléctrica (Kruse & Dinjus, 2007). Con esto, gran cantidad del componente volátil del material de partida se pierde, generando así características de porosidad y área superficial que pueden desarrollarse en procesos térmicos posteriores.

En la HTC se pueden emplear catalizadores, o no, y controlar parámetros como la temperatura, el tiempo de reacción, la relación agua-biomasa, el tamaño de partícula, el pH o la presión (Axelsson, *et al.*, 2012). En la literatura se encuentran reportes detallados que evalúan el efecto de estos parámetros en la síntesis de materiales carbonosos, aunque se basan en la obtención de diferentes propiedades texturales, entre ellas la morfología (partículas esféricas o esferas de carbono coloidales), o áreas superficiales por encima de los 600 m²g⁻¹ y el desarrollo de porosidad primaria (Donar, *et al.*, 2016; Chen, *et al.*, 2009; Antonietti, *et al.*, 2010). Sin embargo, hay pocos estudios sistemáticos sobre el efecto del tiempo y la temperatura en la cantidad de carbono fijo obtenido y el rendimiento de la reacción.

Por otro lado, las biomásas son precursores ampliamente utilizados en la obtención de materiales carbonosos utilizando la HTC dada su disponibilidad, volumen y composición lignocelulósica. La borra de café es un desecho en la industria del café. Se trata de un residuo sólido que se obtiene después de la extracción sólido-líquido, en la cual la fracción líquida se liofiliza para la obtención del café soluble (Laurio & Slater, 2020). La borra de café puede llegar a representar un 50 % del peso del residuo total de la producción del café (Campos-Vega, *et al.*, 2015). Según la Federación Colombiana de Cafeteros, en el 2020 se produjeron cerca de 833 mil toneladas de café, de las cuales 416 mil terminaron siendo borra de café. Este residuo se ha utilizado anteriormente como fuente para la extracción de carbohidratos y fenoles, así como en la producción de carbones activados para la remoción de metales pesados de fuentes hídricas, entre otras aplicaciones (Verhagen, 2018; Blinová, *et al.*, 2017), y constituye una opción promisoriosa para la síntesis de materiales carbonosos y su uso como electrodos de supercondensadores.

En el presente trabajo se abordó un análisis sistemático de la carbonización hidrotérmica de la borra de café para la obtención de un hidrochar rico en carbono fijo con altos rendimientos de reacción. Se evaluaron, asimismo, tres activaciones químicas para la obtención de un carbón activado con porosidad jerarquizada y desarrollo del área superficial y se analizó su aplicación como electrodos en supercondensadores.

Materiales y métodos

La borra de café se obtuvo de la fábrica de Nescafé de Rionegro, Antioquia, a partir del proceso de extracción para la producción de café soluble. Esta se secó a 60 °C durante 16 horas y se almacenó a 4 °C, aproximadamente. La muestra se maceró hasta obtener un tamaño de partícula menor a 300 micras. Los reactivos utilizados fueron el hidróxido de potasio (KOH) en escamas al 99 % (BioPharmChem), el oxalato de potasio monohidratado (K₂C₂O₄) al 99% (Sigma Aldrich), melamina al 99 % (Aldrich Chemistry), el fluoruro de polivinilideno (PVDF) al 99 % (Aldrich Chemistry) y negro de carbono conductor Super PTM (MTI Corporation).

Carbonización hidrotérmica

La carbonización hidrotérmica (HTC) se realizó en un reactor de acero inoxidable con vaso de teflón. En la reacción se mantuvo fija la relación de agua y biomasa en 10:1 con el fin de analizar el efecto del tiempo y la temperatura de reacción; se evaluaron temperaturas de reacción de 200, 230, 250 °C y tiempos de 6, 12 y 24 horas para cada caso. Una vez culminó el tiempo de reacción, se enfrió rápidamente el reactor en un baño de hielo, se filtró el sólido obtenido, se hicieron tres lavados con 15 mL de agua desionizada, y se secó en una estufa a 60 °C durante 16 horas. Las muestras se etiquetaron teniendo en cuenta la temperatura y el tiempo de reacción, por ejemplo, HTC-200-6 se refería a la muestra de carbonización hidrotérmica carbonizada a 200 °C durante 6 horas. Los rendimientos se calcularon considerando el peso de partida y el peso final recuperado como se muestra en la ecuación 1.

$$\text{Rendimiento HTC (\%)} = \frac{\text{Masa en seco del hidrochar}}{\text{Masa en seco de BC}} * 100\% \quad \text{Ecuación 1.}$$

Activación química

Una vez obtenido el material carbonizado, este se mezcló con el agente activante químico. Se evaluaron el KOH, el $K_2C_2O_4$ y una mezcla de $K_2C_2O_4$ + melamina. En los dos primeros agentes se utilizó una relación 1:3 del agente activante con la biomasa y en la mezcla se utilizó una proporción 1:1:1 (biomasa:oxalato:melamina). Las impregnaciones se dejaron en agitación con 15 mL de agua desionizada durante 12 horas.

Las activaciones se realizaron en un horno horizontal utilizando una cápsula de cuarzo en atmósfera de N_2 . El programa para los agentes KOH y $K_2C_2O_4$ fue de 5,5 °C/min hasta alcanzar los 650 °C e isoterma de 5 horas, y para la mezcla de $K_2C_2O_4$ + melamina fue de 3 °C/min hasta los 800 °C e isoterma de una hora. Una vez obtenido el carbón activado, se lavó con agua desionizada en caliente hasta obtener un pH neutro y luego se secó a 60 °C durante 24 horas. Estos materiales se etiquetaron teniendo en cuenta las condiciones de la carbonización hidrotérmica del hidrochar y el agente activante (para el KOH se utilizó K, para el $K_2C_2O_4$ se utilizó Ox y para la mezcla, Ox-N). Un ejemplo de esta nomenclatura es B-200-K o B-200-Ox-N. El proceso se hizo con base en reportes de la literatura (Sevilla, *et al.*, 2018).

Caracterizaciones

La borra de café y los hidrochar obtenidos de la carbonización hidrotérmica se caracterizaron mediante espectroscopia infrarroja empleando la celda de ATR entre 840 y 3.500 cm^{-1} en modo transmitancia en el equipo Nicolet 6700 marca Thermo Scientific. Tachar (Shimadzu) para así seguir los cambios en los grupos funcionales de los materiales. También se hizo un análisis termogravimétrico en un equipo SDT-Q600 (TA® Instruments) con el método de análisis próximo consistente en una rampa de 10 °C/min en atmósfera de N_2 hasta alcanzar los 800 °C e isoterma de 10 min, después de la cual se cambió el gas de N_2 a aire y se dejó una segunda isoterma de 10 min. Este análisis se hizo para obtener información de la cantidad de carbono fijo, material volátil y cenizas presentes en el material. También se hizo un análisis elemental para confirmar el contenido de carbono fijo presente en las muestras con el equipo TruSpec® Micro (LECO) para C, H y N a 1.050 °C, para oxígeno a 1.250 °C y para azufre a 1.300 °C, todos en una atmósfera de helio. Asimismo, se realizó un análisis composicional de la borra de café para determinar la cantidad de holocelulosa (hemicelulosa y celulosa) y lignina con la metodología de Van Soest aplicando las normas AOAC 962.09 y 978.10.

Con el fin de conocer la distribución de poros y el área superficial, los carbones activados (CA) se caracterizaron por medio de isotermas de adsorción de nitrógeno en el equipo ASAP 2020 PLUS (Micromeritics). La desgasificación se hizo a 200 °C durante 600 minutos y la adsorción y la desorción de nitrógeno a -197 °C (76 K); se utilizó, además, microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (MEB-EC) en un microscopio JSM-7100F (Jeol) para la caracterización morfológica del material obtenido.

La caracterización electroquímica se llevó a cabo en un potencióstato (AUTOLAB), en una celda de dos y tres electodos, utilizando las técnicas de voltametría cíclica y ciclos de carga y descarga e impedancia para medir el comportamiento electroquímico del material sintetizado. La voltametría cíclica y los ciclos de carga y descarga se midieron empleando una configuración de tres electodos, uno de platino (Pt) como contraelectrodo, uno de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) como referencia y para soportar el material activo, un electrodo de carbono vítreo. Todas las caracterizaciones se realizaron empleando KOH (6 M) como electrolito. El electrodo de trabajo se elaboró a partir de una mezcla con una proporción en peso de 80:10:10, así: 80 de material activo (carbón activado obtenido en los procesos anteriores), 10 de material conductor (negro de carbón) y 10 de aglutinante (específicamente PVDF). En este sistema el ensamble del supercondensador se hizo una vez depositado el material activo sobre el electrodo de trabajo para después conectar todos los electodos (trabajo, referencia y contraelectrodo) al potencióstato sumergidos en la solución del electrolito.

También se utilizó la técnica de impedancia en una celda de dos electodos con separador de fibra de vidrio. En este sistema el ensamble del supercondensador se hizo depositando el material activo en una lámina de acero inoxidable (previamente tratada con arenado) y utilizando dos electodos del material activo separados por una membrana de fibra de vidrio más el electrolito.

La capacitancia específica se determinó a partir de la voltametría cíclica utilizando la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\int_{v_1}^{v_2} i(V)dv}{\Delta V m v} \quad \text{Ecuación 2 (Ghosh, et al., 2014),}$$

donde ΔV es la diferencia de potencial o la ventana de potencial en la que se está realizando la medida, $\int_{v_1}^{v_2} i(V)dv$ representa el área del rectángulo o cuasi rectángulo que brinda el voltamograma, m representa la masa del electrodo, y v representa la velocidad de barrido a la cual se realiza la medición. En este caso la velocidad de barrido para el cálculo fue de 100 mVs⁻¹.

Resultados y discusión

La **tabla 1** presenta el análisis bromatológico de la borra de café. Se pueden observar los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina, es decir, los componentes que reaccionan en primera instancia en la carbonización hidrotérmica. Al comparar estos resultados con los reportados en la literatura se encontró que la lignina y la celulosa de la borra de café estaban en los rangos reportados para diferentes biomásas, que oscilan entre 16-37 % y 28-48 %, respectivamente (Kannan, et al., 2017).

Tabla 1. Resultados del análisis termogravimétrico y el bromatológico de la borra de café

Análisis	Valor (%)*
Próximo	
Volátiles	77,0
Carbono fijo	20,1
Cenizas	2,9
Bromatológico	
Celulosa	36,0
Hemicelulosa	6,7
Lignina	40,5
Otros	16,8

*Resultados en base seca

Este resultado muestra un porcentaje significativo de cenizas (**Tabla 1**) que, dependiendo de su composición, pueden interferir de forma catalítica en las reacciones que se dan dentro del reactor. Por ello, se hizo un análisis de fluorescencia de rayos X para conocer la composición de dichas cenizas. Los resultados mostraron un bajo contenido de minerales alcalinotérreos (Na_2O : 0,05 % y K_2O : 0,06 %), en tanto que el principal componente fue el *anhídrido sulfúrico* (SO_3), con un 1,04 %, compuesto este que no tiene interacción en el proceso (**Kambo & Dutta, 2015**), por lo que no se realizó su desmineralización.

Carbonización hidrotérmica

Los resultados del análisis termogravimétrico de los materiales obtenidos de la carbonización hidrotérmica se muestran en la **Tabla 2**. Se registran los porcentajes de material volátil, carbono fijo y cenizas, así como los rendimientos de cada una de las reacciones (cálculos realizados con la ecuación 1).

En la tabla puede verse cómo con la carbonización hidrotérmica a 200 °C hubo una tendencia a la disminución del material volátil y el aumento del carbono fijo a medida que aumentó el tiempo de reacción. Con una temperatura de 230 °C se observó que, al cabo de 24 h, la tendencia se invirtió tanto para el contenido de material volátil como para el carbono fijo. Solo a partir de ese momento se encontró esta diferencia, pues a las 6 y 12 h de tratamiento se observó el mismo patrón de comportamiento que con las temperaturas de 200 y 250 °C, lo cual implicaría que a partir de las 12 h con esta temperatura dejan de ser favorables las reacciones de condensación de la estructura y se observe una ruptura de la tendencia. En diversos estudios se ha reportado que hay condiciones de reacción en las cuales la condensación deja de ser favorable, por lo que puede presentarse un proceso de fragmentación de la estructura que lleva a la pérdida de carbono en forma de pequeñas cadenas alifáticas que son solubles en la fase acuosa (**Axelsson, et al., 2012**). Ese puede ser el caso de la temperatura de 230 °C con 12 h de reacción, por lo que, a esta temperatura, lo más conveniente sería utilizar un tiempo mucho más prolongado para lograr la tendencia que se observa con las otras dos temperaturas de reacción. Así también puede procederse con la temperatura de 250 °C, en la que se observa la misma situación al emplear el tratamiento hidrotérmico durante 12 h.

En la tabla también se observa el comportamiento del rendimiento a medida que aumentaron las condiciones de reacción. Fue clara la tendencia a la disminución del rendimiento a medida que las condiciones aumentaron, aunque la diferencia entre las más leves y las más fuertes no fue mayor al 16 %.

Tabla 2. Análisis termogravimétrico y rendimiento de los carbonizados

Muestra		Volátiles (%)	Carbono fijo (%)	Cenizas (%)	Rendimiento (%)
Temperatura (°C)	Tiempo (h)				
200	6	74,4	24,6	1,0	75
	12	76,9	23,1	0,0	74
	24	63,5	34,8	1,7	67
230	6	73,2	23,2	3,6	66
	12	72,8	27,2	0,0	62
	24	74,4	25,6	0,0	61
250	6	73,9	26,1	0,0	60
	12	71,9	28,1	0,0	59
	24	69,6	30,4	0,0	64

*Resultados en base seca

En la **figura 1** se puede observar el diagrama de Van Krevelen de la composición de hidrógeno, carbono y oxígeno presente en materiales ricos en carbono con las diferentes muestras preparadas y el blanco, es decir, la borra de café antes de ser sometida a ningún tratamiento hidrotérmico. Se puede evidenciar que, a medida que la muestra se acercó más al punto de origen del gráfico, es decir, disminuyó tanto la relación H/C como la O/C, por lo que el nivel de carbonización fue mayor (**Kambo & Dutta, 2015**). Así, puede observarse el cambio y la tendencia en el grado de carbonización de los hidrochar obtenidos y constatar que, con condiciones de reacción más extremas, el grado de carbonización tendió a aumentar, tendencia que se ha asociado principalmente a procesos de deshidratación (**Burnham, 2018**). Además, se evidenció que el carbonizado HTC-250-6 presentó un mayor grado de carbonización que los demás carbonizados obtenidos y que con mayores condiciones de reacción, específicamente con el aumento de la temperatura, se logró un mayor grado de carbonización, lo que coincide con reportes previos (**Kalderis, et al., 2014**). Pudo observarse, igualmente, que algunas muestras se salieron de la tendencia, comportamiento que ya se había observado previamente en el análisis termogravimétrico y que puede explicarse de la misma manera, es decir, con cada temperatura hubo un momento en el que la tendencia se rompió, indicando que en dichas condiciones de reacción (tiempo y temperatura) no eran favorables las reacciones de condensación y disminuía la formación de material carbonoso (**Ballesteros, et al., 2014**).

Se hizo, asimismo, el análisis infrarrojo de los carbonizados obtenidos con los diferentes tiempos de reacción y los espectros pueden observarse en la **figura 2**. En todos los espectros IR se observan señales asociadas con cadenas alifáticas en 2.920 cm^{-1} y 2.850 cm^{-1} , así como señales en 1.700 cm^{-1} y 1.600 cm^{-1} asociadas con ácidos clorogénicos, cafeína y anillos aromáticos por flexión de los grupos carbonilo C=O y N-H, respectivamente (**Mukaida, et al., 2015**); se diferenciaron también picos alrededor de 1.400 cm^{-1} asociados con flexiones del tipo C-H (**Vardon, et al., 2013**), así como señales alrededor de 1.180 cm^{-1} y 1.040 cm^{-1} correspondientes a vibraciones de extensión de C-O y C-O-H, flexión C-H y vibración de extensión C-O (**Ballesteros, et al., 2014**).

Los cambios más drásticos se observaron al variar el tiempo de reacción a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (**Figura 2a**); se observó que las señales de alifáticos, ácidos clorogénicos y cafeína aumentaron significativamente; un comportamiento similar pero menos drástico se evidenció a $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (**Figura 2b y c**), en contraste con la señal de C-O, que disminuyó casi hasta desaparecer a medida que aumentó el tiempo de reacción. Se observó también cómo disminuyó la señal asociada con las extensiones de los grupos hidroxilos, lo que se debería

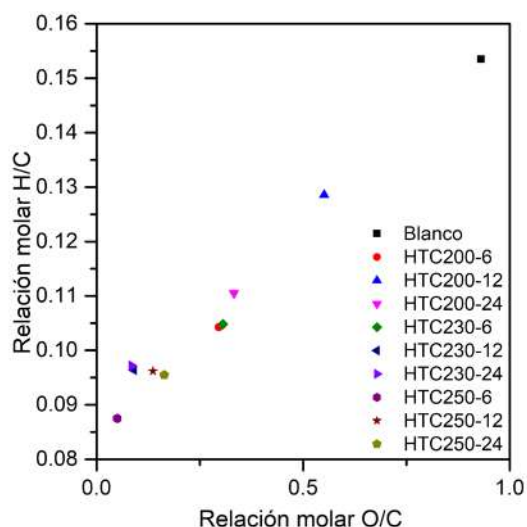


Figura 1. Diagrama de Van Krevelen para los diferentes carbonizados

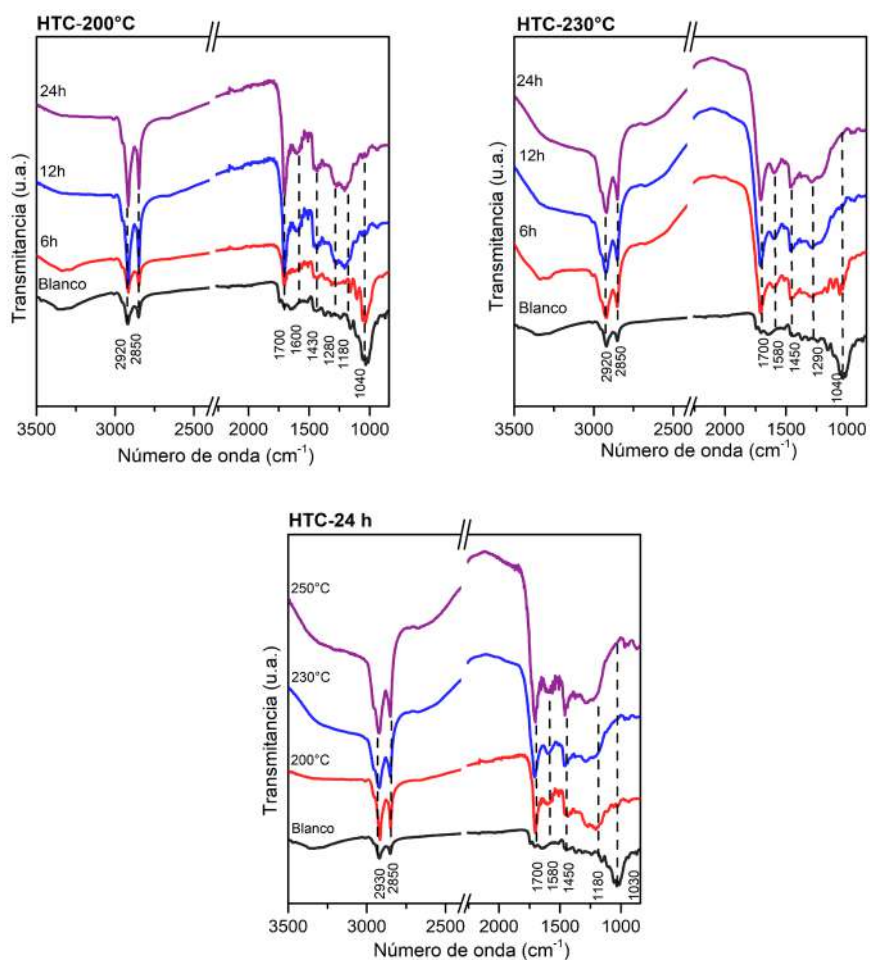


Figura 2. Espectros IR de los carbonizados **a)** HTC-200 °C, **b)** HTC-230 °C, **c)** HTC-250 °C y **d)** HTC-24h

a la deshidratación, dando como resultado grupos carboxílicos. Además, pudo darse una ruptura de los enlaces de tipo C-O, cuyas señales disminuyen a medida que aumenta el tiempo de reacción, ya que suelen ser grupos del tipo metoxilo o grupos éter que son lábiles bajo condiciones hidrotérmicas (Kang, *et al.*, 2012).

El efecto de la temperatura con un mismo tiempo de reacción puede observarse en la **figura 2d**, así como el mismo patrón en cuanto al efecto del tiempo con la misma temperatura. Estos resultados responderían a la descomposición de la celulosa y la hemicelulosa presentes en la borra de café. La deshidratación, fragmentación y posterior condensación de dichas estructuras explica el aumento de señales de cadenas alifáticas y anillos aromáticos y la disminución de las señales C-O, situación que se mantuvo al aumentar las condiciones de reacción. En otro estudio se reportaron resultados similares y se concluyó que la temperatura de reacción es uno de los factores que más aporta a la transformación de la celulosa en el tratamiento hidrotérmico (Sevilla & Fuertes, 2009).

Con base en los resultados obtenidos, se seleccionaron dos condiciones de síntesis de carbonización hidrotérmica. La reacción a 250 °C durante 6 horas produjo el material carbonoso con mayor porcentaje de carbono fijo (88 %), lo que es de gran interés para el proceso de activación posterior. Asimismo, la reacción a 200 °C durante 6 horas obtuvo un mayor rendimiento (75 %), lo que es conveniente para el proceso global desde la carbonización hasta la activación, siempre en busca del mayor aprovechamiento de la materia prima utilizada. Por ello se seleccionaron dichos carbonizados para el proceso de activación.

Activaciones químicas

En el proceso de la activación química se buscaron dos características: obtener una alta área superficial y una distribución jerárquica de porosidad, pues son algunos de los parámetros más importantes en el momento de seleccionar el material para una posterior caracterización electroquímica. Una elevada área superficial da como resultado una mayor área de interacción de los iones del electrolito con el electrodo. Los resultados de las áreas superficiales determinadas con el método BET en los carbones activados a partir de los dos carbonizados previamente seleccionados se muestran en la **tabla 3**.

En dicha tabla puede observarse que los carbones activados con el carbonizado HTC-200 presentaron mayores áreas superficiales, por lo tanto, se seleccionaron para su evaluación como electrodos en supercondensadores (EDLC). Para obtener un comportamiento adecuado de los EDLC se requiere una distribución jerárquica de los poros, la cual se analiza por medio de las isotermas de adsorción de N₂ (**Figura 3**).

Las isotermas tuvieron la forma característica de las isotermas de tipo IV, es decir, el codo característico de la presencia de microporos a presiones relativas cercanas a cero, así como la histéresis correspondiente a la condensación que se da en los mesoporos (**Rouquerol, et al., 1999**), lo que indica que en los tres materiales se obtuvieron microporos y mesoporos, con lo que se logró una distribución jerárquica de poros. La distribución de estos poros en el material determina la interacción con los iones del electrolito en aplicaciones como la de los supercondensadores. Los mesoporos constituyen los canales por los cuales los iones se desplazan por el material y los microporos retienen los iones en los procesos de carga y descarga (**Kar, 2020**).

Tabla 3. Área superficial BET de los carbones activados

Muestra	Área superficial (m ² g ⁻¹)
B200-K	718,7
B250-K	594,6
B200-Ox	430,1
B250-Ox	358,6
B200-Ox-N	1362,9
B250-Ox-N	1130,4

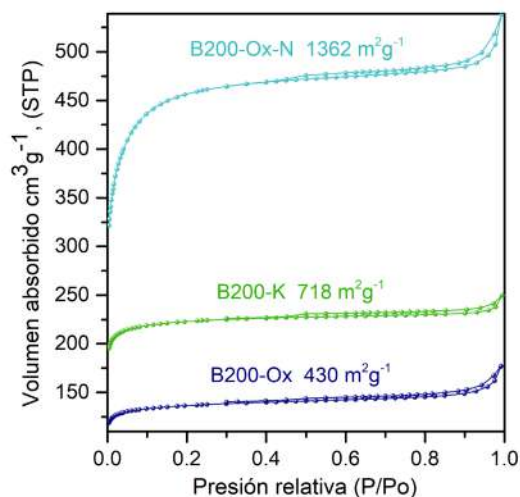


Figura 3. Isotermas de adsorción-desorción en N₂ para los carbones activados seleccionados

En la **figura 4** se observan las imágenes SEM de los carbones activados seleccionados. En estas micrografías puede verse que la superficie del carbón activado B200-K tuvo una morfología mucho más irregular, con cavidades en la superficie, lo que indicaría una porosidad mucho más desarrollada. Asimismo, puede verse que en el carbón B200-Ox-N registró una superficie irregular con orificios que podría asociarse con una gran cantidad de poros que contribuye a la movilidad de los iones, aunque en este caso en menor magnitud que en el carbón B200-K. Por último, el carbón B200-Ox mostró una superficie un poco más lisa y homogénea que la de los otros materiales y no se apreciaron cavidades superficiales que pudieran asociarse con un gran desarrollo del área superficial.

El desarrollo de la porosidad en las activaciones químicas depende de los agentes porogénicos utilizados. Los agentes activantes con potasio sufren una cadena de reacciones químicas, entre ellas, la transformación de la fuente de potasio en diferentes especies como K_2O y K_2CO_3 , que, posteriormente, se convierten en potasio metálico (Gao, *et al.*, 2020). Estas últimas reacciones se ven favorecidas cuando se utilizan temperaturas sobre los $700\text{ }^\circ\text{C}$, lo que puede explicar el aumento en el área superficial del B200-Ox-N, el cual fue activado a $800\text{ }^\circ\text{C}$. La diferencia entre el KOH y el $K_2C_2O_4$ radica en la formación del K_2CO_3 , ya que para que esta especie se forme con el KOH se requiere una formación previa de CO_2 y que este se mantenga lo suficiente en la matriz para poder reaccionar, en tanto que el $K_2C_2O_4$ solo se descompone en la especie K_2CO_3 de forma directa. Con la presencia del CO_2 en la matriz se presenta un ensanchamiento de los poros ya formados, lo que genera una cantidad significativa de mesoporos, en tanto que en su ausencia, este ensanchamiento no se da (Guerrera, *et al.*, 2020), lo que explicaría las diferencias observadas en las micrografías.

Una vez hecha la caracterización de los materiales, se prosiguió con el ensamble del supercondensador y su caracterización electroquímica. En la **figura 5a** se presenta la voltametría cíclica de los tres carbones activados y se observa que el voltamograma del carbón

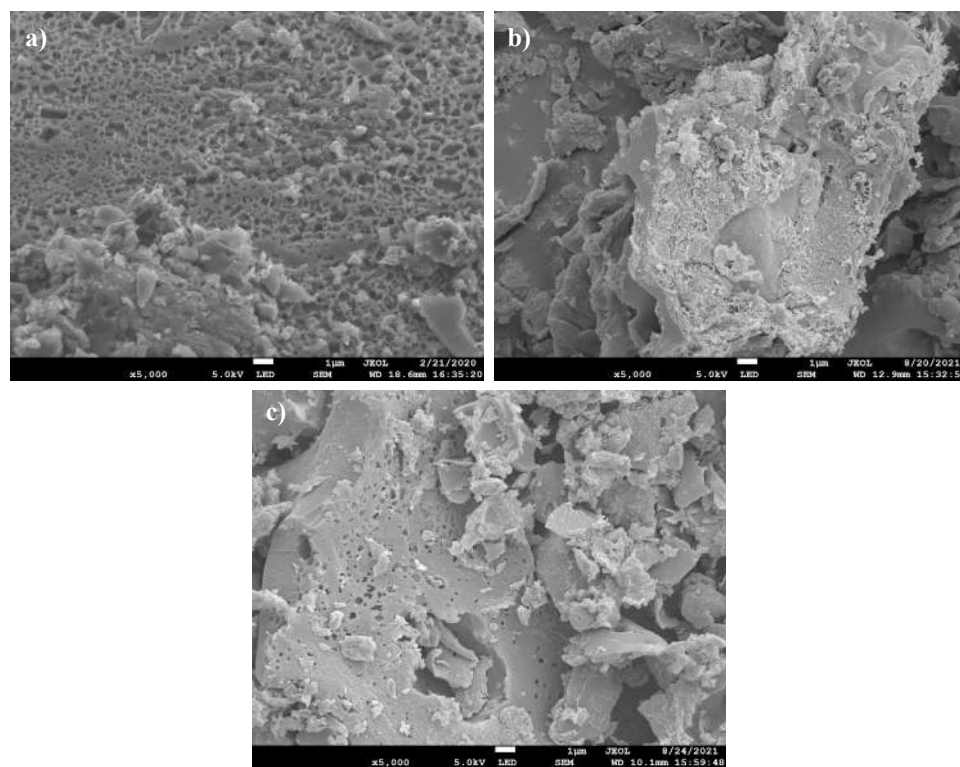


Figura 4. Micrografías SEM de los diferentes carbones activados. **a)** B200-K, **b)** B200-Ox, **c)** B200-Ox-N

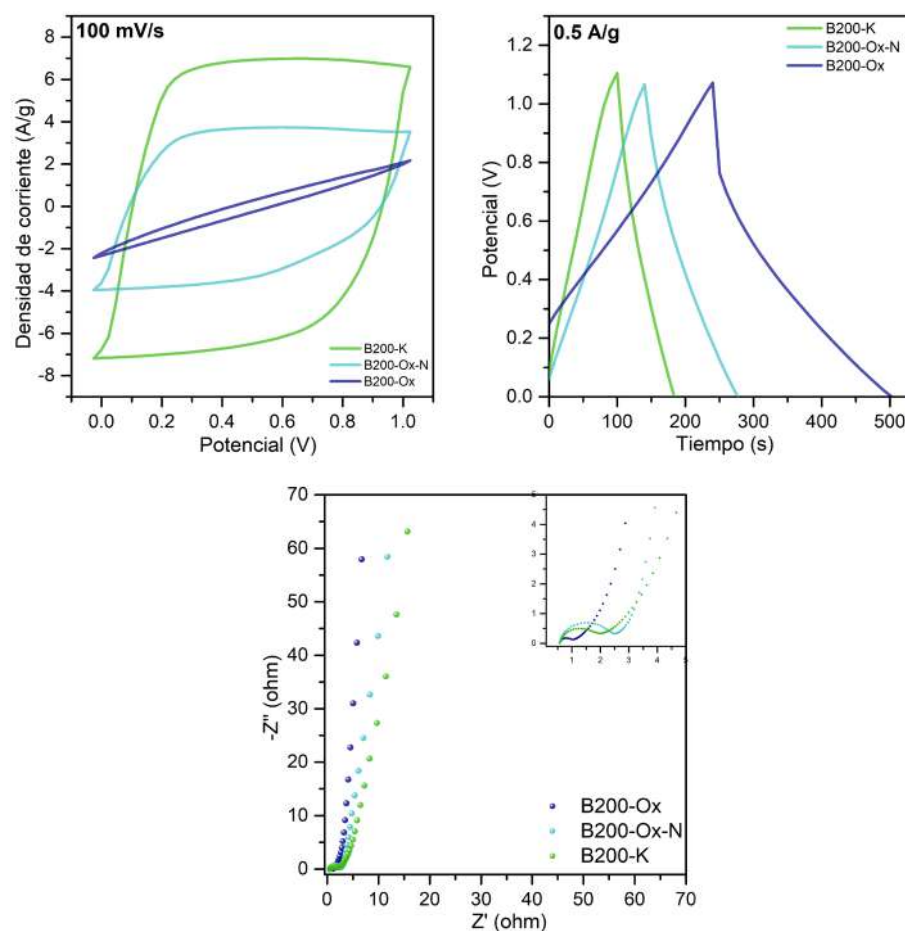


Figura 5. Caracterización electroquímica de los diferentes supercondensadores. **a)** voltametría cíclica, **b)** carga-descarga, **c)** impedancia

activado B200-K y del B200-Ox-N arrojó una forma casi rectangular coincidente con el comportamiento ideal de un supercondensador de doble capa eléctrica, en tanto que con el carbón B200-Ox sucedió lo contrario, ya que la forma ovalada se asocia con materiales de comportamiento resistivo (Simon & Gogotsi, 2017), lo que se confirmó con los ciclos de carga y descarga como se observa en la figura 5b, en la cual se observan ciclos simétricos y lineales para los carbones B200-K y B200-Ox mas no así para el B200-Ox, con el que se obtuvo un proceso de carga lineal y de descarga no lineal (Berrueta & Ursúa, 2019).

El comportamiento de los EDLC se relaciona directamente con la capacidad de formación de la doble capa eléctrica y el movimiento de los iones a través del material, los cuales son fundamentales para que toda el área pueda aprovecharse. Esto se ve afectado por la velocidad de barrido cuando se tiene una elevada presencia de microporos, por lo que, al aumentarla, hay una mayor influencia de los fenómenos de difusión que de los electrostáticos y se pierde área superficial activa (Liu, *et al.*, 2009; Li & Chen, 2008). Se puede asumir, entonces, que en los carbones B200-K y B200-Ox-N hay más poros disponibles para la movilidad de los iones que en el carbón B200-Ox, en el que la porosidad no contribuye a la capacitancia (Berrueta & Ursúa, 2019).

Estos resultados se confirmaron con los diagramas de Nyquist obtenidos a partir de los experimentos de espectroscopía de impedancia electroquímica (Figura 5c). Se observó que el carbón B200-Ox-N presentó una mayor resistencia a la transferencia de carga, la cual está relacionada con la movilidad de los iones en el material, con lo que

este tuvo mesoporos disponibles para la movilidad (pocos), pero también microporos en los que todavía era posible acceder al electrolito, aunque con mucha mayor dificultad, lo que explicaría este comportamiento. El B200-K tiene una resistencia a la transferencia de carga menor, por lo que la movilidad de estos iones en este material se da con mayor facilidad tanto en los microporos como en los mesoporos. Por último, el B200-Ox presentó una resistencia de transferencia de carga considerablemente menor, lo que permitiría concluir que los microporos no fueron accesibles para los iones del electrolito y solo se movilizaron por los pocos mesoporos disponibles. En otro estudio se reportaron resultados similares al comparar carbones microporosos con carbones con rangos de porosidades amplias que impiden el acceso a microporos y aumenta la resistencia (Mastragostino, *et al.*, 2002).

Las capacitancias específicas de los supercondensadores se calcularon utilizando el área de cada voltamograma realizado a 100 mVs^{-1} . Obteniendo como resultados $53,19 \text{ Fg}^{-1}$, $27,74 \text{ Fg}^{-1}$ y $2,09 \text{ Fg}^{-1}$ para los materiales B200-K, B200-Ox-N y B200-Ox respectivamente.

Se evidenció que el supercondensador con B200-K como electrodo tuvo la mayor capacitancia ($53,19 \text{ Fg}^{-1}$), lo que se esperaba debido a las propiedades texturales observadas en la micrografía MEB. Este valor es relativamente bajo para las capacitancias obtenidas con materiales carbonosos provenientes de otras biomásas, cuyos valores van desde los 100 Fg^{-1} en residuos de madera hasta más de 224 Fg^{-1} en brea de alquitrán de hulla (Wu, *et al.*, 2005; He, *et al.*, 2012). También se encuentran reportes de capacitancias más bajas, por ejemplo, se obtuvo una capacitancia de 38 Fg^{-1} por activación química con KOH a $700 \text{ }^\circ\text{C}$ durante tres horas, en tanto que con mayores temperaturas de activación se lograron mayores capacitancias (Zhang, *et al.* 2018). Esto permite plantear que con las temperaturas y relaciones de los agentes activantes usados en este trabajo se lograron materiales promisorios que dejan abierta la posibilidad de mejorar los resultados electroquímicos obtenidos al mejorar las condiciones de síntesis de activación.

Conclusiones

En este estudio de la carbonización hidrotérmica mediante análisis infrarrojo y elemental se obtuvieron dos condiciones de síntesis en la carbonización hidrotérmica que produjeron un material con alto contenido de carbono fijo y un alto rendimiento: $250 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 6 horas y $200 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 6 horas, respectivamente. Ello evidencia el cambio abrupto de reacciones de condensación a fragmentación cuando se modifica un solo parámetro, como lo es la temperatura de reacción, lo que quedó demostrado tanto por la disminución de señales C-O y de grupos hidroxilo como por la disminución en la relación H/C y O/C en el análisis elemental. Se logró observar también una clara tendencia a la disminución del rendimiento a medida que el tiempo y la temperatura aumentaban en la carbonización.

Los agentes porogénicos escogidos para las activaciones generaron áreas superficiales de medias a altas, entre $358\text{-}1.362 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, y una porosidad jerarquizada de microporos y mesoporos. El hidróxido de potasio logró un cambio significativo en la superficie del material y, aunque el área superficial desarrollada en la activación no fue la más alta, su superficie mostró una morfología mucho más irregular en la que se observó un desarrollo de porosidad mayor a los demás materiales según se comprobó mediante las micrografías de MEB.

Las caracterizaciones electroquímicas arrojaron resultados contundentes del efecto de la porosidad jerarquizada y la accesibilidad de los iones a la superficie del material. El supercondensador obtenido con el material B200-K evidenció un mejor comportamiento electroquímico (EDLC) comparado con el material B200-Ox-N que, si bien evidenció una mayor área superficial, presentó una superficie mucho más heterogénea, con zonas lisas que limitaron la accesibilidad de los iones.

En el estudio se obtuvieron al menos dos materiales a partir de la borra de café con resultados promisorios como electrodos en supercondensadores. Esto implica la posibilidad de generar un valor agregado para un residuo de alto impacto y volumen a nivel nacional y un posible aporte a la actual crisis de almacenamiento de energía.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia – UdeA, por la financiación del proyecto y al Laboratorio de microscopía electrónica del ITM.

Contribución de los autores

DL: coordinador del proyecto, asesoría sobre las condiciones experimentales de síntesis y revisión del documento; RBS: asesoría en el proceso de síntesis, caracterización y revisión del documento; EAF: experimentación, análisis y escritura del documento.

Conflicto de intereses

Los autores del artículo declaramos que no existe conflicto de intereses con relación a la publicación de este artículo.

Referencias

- Adan-mas, A., Alcaraz, L., Arévalo-cid, P., López-Gómez, F. A., Montemor, F.** (2021). Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications. *Waste Management*. **120**: 280-289. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.043>
- Antonietti, M., Wu, L., Yu, S.-H., Wang, K., Hu, B., Titirici, M.-M.** (2010). Engineering Carbon Materials from the Hydrothermal Carbonization Process of Biomass. *Advanced Materials*. **22** (7): 813-828. <https://doi.org/10.1002/adma.200902812>
- Axelsson, L., Franzén, M., Ostwald, M., Berndes, G., Lakshmi, G., Ravindranath, N. H.** (2012). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. **6** (3): 246-256. <https://doi.org/10.1002/bbb>
- Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., Mussatto, S. I.** (2014). Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food and Bioprocess Technology*. **7** (12): 3493-3503. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z>
- Bedia, J., Peñas-Garzón, M., Gómez-Avilés, A., Rodríguez, J. J., Belver, C.** (2020). Review on Activated Carbons by Chemical Activation with FeCl₃. *C — Journal of Carbon Research*. **6** (2): 21. <https://doi.org/10.3390/c6020021>
- Berrueta, A. & Ursúa, A.** (2019). Supercapacitors : Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends. *IEEE Access*. **7**: 50869-50896. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908558>
- Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., Soldán, M.** (2017). Review: tilization of waste from coffee production. *Faculty of Materials Science and Technology in Trnava*. **25** (40): 91-101. <https://doi.org/10.1515/rput-2017-0011>
- Burnham, A. K.** (2018). Van Krevelen Diagrams. In: Sorkhabi R. (eds) *Encyclopedia of Petroleum Geoscience*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02330-4_67-1
- Calvo, E. G., Menéndez, J. A., Arenillas, A.** (2013). Microporous and mesoporous materials microwave synthesis of micro-mesoporous activated carbon xerogels for high performance supercapacitors. *Microporous And Mesoporous Materials*. **168**: 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.10.008>
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H. A., Dave Oomah, B.** (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science and Technology*. **45** (1): 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.012>
- Chen, C., Sun, A. X., Jiang, A. X., Niu, D., Yu, A. A., Liu, A. Z., Guang, A. J.** (2009). A Two-Step Hydrothermal Synthesis Approach to Monodispersed Colloidal Carbon Spheres. *Nanoscales Res Lett*. **4**: 971-976. <https://doi.org/10.1007/s11671-009-9343-5>
- Dai, C., Wan, J., Yang, J., Qu, S., Jin, T., Ma, F., Shao, J.** (2018). H₃PO₄ solution hydrothermal carbonization combined with KOH activation to prepare argy wormwood-based porous carbon for high-performance supercapacitors. *Applied Surface Science*. **444**: 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.261>
- Donar, Y. O., Çağlar, E., Sinağ, A.** (2016). Preparation and characterization of agricultural waste biomass based hydrochars. *Fuel*. **183**: 366-372. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.108>

- Elaiyappillai, E., Srinivasan, R., Johnbosco, Y., Devakumar, P., Murugesan, K., Kesavan, K., Johnson, P. M.** (2019). Low cost activated carbon derived from *Cucumis melo* fruit peel for electrochemical supercapacitor application. *Applied Surface Science*. **486**: 527-538. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.004>
- Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G., Sing, K.** (1999). Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications. Academic Press, Inc., p. 646.
- Gao, Y., Yue, Q., Gao, B., Li, A.** (2020). Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review. *Science of the Total Environment*. **746**. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141094>
- Ghosh, D., Giri, S., Basu, T., Mandal, M., Das, C. K.** (2014). α MnMoO₄/graphene hybrid composite: high energy density supercapacitor electrode material. *Dalton Transactions*. **43**: 11067-11076. <https://doi.org/10.1039/c4dt00672k>
- Simon, P. & Gogotsi, Y.** (2017). Materials for electrochemical capacitors. *Nature materials*. **7**: 845-54. <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- Guerrera, J. V., Burrow, J. N., Eichler, J. E., Rahman, M. Z., Namireddy, M. V., Friedman, K. A., Coffman, S. S., Calabro, D. C., Mullins, C. B., Mullins, C. B.** (2020). Evaluation of Two Potassium-Based Activation Agents for the Production of Oxygen- And Nitrogen-Doped Porous Carbons. *Energy and Fuels*. **34** (5): 6101-6112. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00427>
- He, X., Li, R., Qiu, J., Xie, K., Ling, P.** (2012). Synthesis of mesoporous carbons for supercapacitors from coal tar pitch by coupling microwave-assisted KOH activation with a MgO template. *Carbon*. **50** (13): 4911-4921. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.06.020>
- International Energy Agency-IEA.** (2019). World Energy Outlook 2019. World Energy Outlook Series. www.iea.org/weo
- Kalderis, D., Kotti, M. S., Méndez, A., Gascó, G.** (2014). Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of rice husk. *Solid Earth*. **5** (1): 477-483. <https://doi.org/10.5194/se-5-477-2014>
- Kambo, H. S. & Dutta, A.** (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **45**: 359-378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>
- Kang, S., Li, X., Fan, J., Chang, J.** (2012). Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of lignin, cellulose, d-xylose, and wood meal. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. **51** (26): 9023-9031. <https://doi.org/10.1021/ie300565d>
- Kannan, S., Garipey, Y., Raghavan, G. S. V.** (2017). Optimization and Characterization of Hydrochar Derived from Shrimp Waste. *Energy and Fuels*. **31** (4): 4068-4077. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00093>
- Kar, K. K.** (2020). Handbook of nanocomposite supercapacitor materials I (K. K. Kar (ed.)). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43009-2>
- Kruse, A. & Dinjus, E.** (2007). Hot compressed water as reaction medium and reactant. 2. Degradation reactions. *Journal of Supercritical Fluids*. **41** (3): 361-379. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.12.006>
- Laurio, M. V. O. & Slater, C. S.** (2020). Process scale-up, economic, environmental assessment of vibratory nanofiltration of coffee extracts for soluble coffee production process intensification. *Clean Technologies and Environmental Policy*. **22** (9): 1891-1908. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01931-x>
- Li, S., Han, K., Li, J., Li, M., Lu, C.** (2017). Preparation and characterization of super activated carbon produced from gulfweed by KOH activation. *Microporous and Mesoporous Materials*. **243**: 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.02.052>
- Li, Z. & Chen, J.** (2008). An impedance-based approach to predict the state-of-charge for carbon-based supercapacitors. *Microelectronic Engineering*. **85** (7): 1549-1554. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2008.02.016>
- Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M. M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K. H.** (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*. **2** (1): 71-106. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
- Liu, H., Cui, W., Jin, L., Wang, C., Xia, Y.** (2009). Preparation of three-dimensional ordered mesoporous carbon sphere arrays by a two-step templating route and their application for supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry*. **19**: 3661-3667. <https://doi.org/10.1039/b819820a>

- Machnikowski, J. & Lorenc-Grabowska, E.** (2005). Effect of pore size distribution of coal-based activated carbons on double layer capacitance. *Electrochimica Acta*. **50**: 1197-1206. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.07.045>
- Mastragostino, M., Soavi, F., Arbizzani, C.** (2002). Electrochemical Supercapacitors. En: van Schalkwijk W.A., Scrosati B. (eds). *Advances in Lithium-Ion Batteries*. Springer, Boston, MA. p. 481-505. https://doi.org/10.1007/0-306-47508-1_17
- Mukaida, M., Watanabe, Y., Sugano, K., Terada, K.** (2015). Identification and physicochemical characterization of caffeine-citric acid co-crystal polymorphs. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. **79**: 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2015.09.002>
- Oliveira, L. C. A., Pereira, E., Guimaraes, I. R., Vallone, A., Pereira, M., Mesquita, J. P., Sapag, K.** (2009). Preparation of activated carbons from coffee husks utilizing FeCl₃ and ZnCl₂ as activating agents. *Journal of Hazardous Materials*. **165** (1-3): 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.064>
- Rincón, J. M., Rincón, S., Guevara, P., Ballén, D., Morales, J. C., Monroy, N.** (2015). Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **39** (51): 171. <https://doi.org/10.18257/raccefnyn.138>
- Sevilla, M. & Fuertes, A. B.** (2009). The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *Carbon*. **47** (9): 2281-2289. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.026>
- Sevilla, M., Al-Jumaily, A. S. M., Fuertes, A. B., Mokaya, R.** (2018). Optimization of the Pore Structure of Biomass-Based Carbons in Relation to Their Use for CO₂ Capture under Low- and High-Pressure Regimes. *ACS Applied Materials and Interfaces*. **10** (2): 1623-1633. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b10433>
- Subramanian, V., Luo, C., Stephan, A. M., Nahm, K. S., Thomas, S., Wei, B.** (2007). Supercapacitors from activated carbon derived from banana fibers. *Journal of Physical Chemistry C*. **111** (20): 7527-7531. <https://doi.org/10.1021/jp067009t>
- Vardon, D. R., Moser, B. R., Zheng, W., Witkin, K., Evangelista, R. L., Strathmann, T. J., Rajagopalan, K., Sharma, B. K.** (2013). Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. **1** (10): 1286-1294. <https://doi.org/10.1021/sc400145w>
- Verhagen, S.** (2018). Improving the Value of Spent Coffee Grounds by Converting Carbohydrates into Fermentable Sugars Improving the Value of Spent Coffee Grounds by Converting Carbohydrates into Fermentable Sugars. September 2017. <https://edepot.wur.nl/441154>
- Vinayagam, M., Suresh, R., Sivasamy, A., Lucia, A., Barros, F. De.** (2020). Biomass and Bioenergy Biomass-derived porous activated carbon from *Syzygium cumini* fruit shells and *Chrysopogon zizanioides* roots for high-energy density symmetric supercapacitors. *Biomass and Bioenergy*. **143**: 105838. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105838>
- Wu, F., Tseng, R., Hu, C., Wang, C.** (2005). Effects of pore structure and electrolyte on the capacitive characteristics of steam- and KOH-activated carbons for supercapacitors. *Journal of Power Sources*. **144**: 302-309. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.020>
- Yakaboylu, G. A., Jiang, C., Yumak, T., Zondlo, J. W., Wang, J., Sabolsky, E. M.** (2021). Engineered hierarchical porous carbons for supercapacitor applications through chemical pretreatment and activation of biomass precursors. *Renewable Energy*. **163**: 276-287. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.092>
- Yang, F., Wang, D., Zhao, Y., Tsui, K. L., Bae, S. J.** (2018). A study of the relationship between coulombic efficiency and capacity degradation of commercial lithium-ion batteries. *Energy*. **145**: 486-495. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.144>
- Yun, Y. S., Park, M. H., Hong, S. J., Lee, M. E., Park, Y. W., Jin, H. J.** (2015). Hierarchically porous carbon nanosheets from waste coffee grounds for supercapacitors. *ACS Applied Materials and Interfaces*. **7** (6): 3684-3690. <https://doi.org/10.1021/am5081919>
- Zhang, G., Chen, Y., Chen, Y., Guo, H.** (2018). Activated biomass carbon made from bamboo as electrode material for supercapacitors. *Materials Research Bulletin*, **102**: 391-398. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.03.006>
- Zhang, M., He, L., Shi, T., Zha, R.** (2018). Nanocasting and Direct Synthesis Strategies for Mesoporous Carbons as Supercapacitor Electrodes. In *Chemistry of Materials*. **30**: 7391-7412. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b03345>

Artículo original

Cambios en los patrones espaciales de área quemada en Colombia, ¿qué ha pasado en las dos primeras décadas del siglo XXI?

Changes in the spatial patterns of burned area in Colombia, what happened in the first two decades of the 21st century?

 Dolors Armenteras

Grupo de Investigación en Ecología del Paisaje y Modelación de Ecosistemas, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC, Colombia

Artículo de posesión para admisión como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Colombia ha venido avanzando en el monitoreo anual de los incendios forestales y el área quemada y su relación con las variaciones en un mismo año y de un año a otro de las condiciones climáticas que los propician, así como de las causas antrópicas que los generan. A nivel mundial se habla de cambios en el régimen de incendios, no obstante, en Colombia todavía no se ha determinado si la tendencia en el tiempo es de aumento en la extensión, tamaño y frecuencia de los incendios. En este estudio se presenta un análisis comparativo de las dos primeras décadas del siglo XXI en términos de los patrones espaciales y temporales de las áreas quemadas, con el objetivo de analizar cambios en algunos parámetros del régimen de incendios en el país (extensión total, tamaño, configuración espacial de los parches quemados y frecuencia). Se utilizó la información del producto de área quemada mensual Fire_cci v5.1 derivado del sensor MODIS a una resolución de 250 m para mapear mensualmente todos los parches detectados como quemados o las cicatrices de quemaduras desde enero del 2001 hasta marzo del 2020. El área quemada presentó una gran variabilidad anual y en el curso del año, siendo febrero y enero los meses más afectados por incendios. El área total quemada en un mes ha tendido a disminuir en la segunda década del siglo XXI, pero el tamaño promedio de los parches quemados ha aumentado de 188,75 ha en promedio en la primera década a 196,2 ha en la segunda década, durante la cual también se han detectado un mayor número de fragmentos. En términos de frecuencia, se encontró una gran variabilidad con zonas, especialmente las bajas, donde ha aumentado la frecuencia en la segunda década comparada con la primera. Se confirmó un cambio en algunas propiedades del régimen de incendios en Colombia, ya que, aunque el área total afectada disminuyó y los incendios menores se redujeron, el patrón encontrado indica una clara tendencia a más incendios de mayor tamaño y frecuencia.

Palabras clave: Área quemada; Incendios; Patrones; Régimen de fuego; MODIS.

Abstract

Colombia has been making progress in monitoring the annual occurrence of forest fires and burned areas, and their relationship with the interannual and intraannual variations of both the climatic conditions that facilitate them and their anthropic causes. At the global level, the changes in the fire regime are documented, but in Colombia, we have not yet established whether the trend over time has been toward an increase in the extension, size, and frequency of fires. The present study is a comparative analysis of the first two decades of the 21st century in terms of the spatial and temporal patterns of detected burned areas to analyze changes in some parameters of the fire regime in the country (total extension, size, spatial configuration of burned patches, and frequency). Information from the monthly burned area product Fire_cci v5.1 derived from MODIS at a resolution of 250 m was used to map monthly all the patches detected as burns (or burn scars) from January 2001 to

Citación: Armenteras D. Cambios en los patrones espaciales de área quemada en Colombia, ¿qué ha pasado en las dos primeras décadas del siglo XXI?. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):248-260, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1514>

Editor: Jhon Charles Donato

Correspondencia:

Dolores Armenteras;
darmenterasp@unal.edu.co

Recibido: 1 de julio de 2021

Aceptado: 2 de diciembre de 2021

Publicado en línea: 9 de febrero de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

March 2020. The results indicated that the burned area had high annual and intraannual variability, with February and January as the months most affected by fires. The total monthly area burned tended to decrease in the second decade of the 21st century, but the average size of the burned patches increased from 188.75 ha on average in the first decade to 196.2 ha on average in the second decade when also a greater number of fragments was detected. In terms of frequency, there was high variability, especially in lowland areas where the frequency has increased in the second decade compared to the first. Some properties of the fire regime in Colombia did change and despite a decrease in the total area, the results of the study indicated a clear trend towards more, larger, and more frequent fires.

Keywords: Burned area; Fires; Patterns; Fire regime; MODIS.

Introducción

Los incendios de la vegetación, especialmente los forestales, constituyen una perturbación que influye en los patrones y procesos de los ecosistemas: en algunos casos alteran la diversidad, influyen en la productividad y afectan el ciclo de nutrientes (**Bowman, et al., 2014**). Por otra parte, el uso del fuego ha sido una práctica extendida del hombre para el manejo del territorio, la limpieza de la tierra y los bosques o para mejorar el pastoreo (**Guido R van der Werf, et al., 2008**). Aunque el área quemada a nivel mundial disminuyó entre 1998 y 2015, los incendios que ocurren en regiones tropicales se han convertido en un problema importante dado el alto impacto que tienen en la estructura y función de estos ecosistemas tan amenazados por múltiples factores de estrés. Si bien la mencionada reducción en el área quemada se asocia principalmente con las sabanas y pastizales tropicales (**Andela, et al., 2016**), el área mundial quemada se ha desplazado a regiones con más cobertura boscosa, lo que indica un mayor uso del fuego para la tala y quema de bosques y para el manejo agrícola en los trópicos (**Andela, et al., 2016**). La interacción del cambio climático con la topografía natural y las condiciones del viento, así como con otras actividades antropogénicas, pueden resultar en incendios graves y prolongados que afectan grandes áreas forestales y reducen el almacenamiento de carbono forestal (**Brando, et al., 2019**), una degradación inducida por los incendios que en el trópico puede representar cerca del 69 % de la pérdida total de carbono (**Baccini, et al., 2015**). Además, los cambios en la frecuencia e intensidad de los incendios exigen el estudio de la variación en el tiempo del área quemada, pues es crucial para comprender la deforestación en países tropicales (**Curtis, et al., 2018**).

Las interacciones entre el clima, la vegetación y los incendios son complejas, siendo el clima uno de los factores naturales que influyen tanto en la distribución de la vegetación como en las características de los regímenes de incendios que la afectan (**van der Werf, et al., 2008**). Por otro lado, los bosques tropicales una vez perturbados son menos resistentes al cambio climático y a la actividad humana y más vulnerables a otras perturbaciones e incendios posteriores (**Aragão, et al., 2018; Buma, 2015**). En este sentido, la mayor propensión de los bosques tropicales a los incendios ha desembocado no solo en el aumento de las pérdidas en ellos sino también de la vulnerabilidad de los bosques restantes con condiciones más secas frente a los incendios (**Seymour & Harris, 2019**), contexto en que se prevé que los bosques de Suramérica tengan poca resiliencia, particularmente en áreas con un alto riesgo de futuras sequías (**Hirota, et al., 2011**).

Los estudios de incendios forestales a menudo se centran en la medición de la superficie forestal quemada (**Nogueira, et al., 2015**), o de su efecto sobre el ciclo del carbono y las emisiones atmosféricas (**van der Werf, et al., 2010**). Sin embargo, pocos estudios han analizado la vulnerabilidad de los bosques frente a una mayor frecuencia de incendios, y los disponibles se basan en gran medida en observaciones locales (**Alencar, et al., 2015**). Los análisis sistemáticos de la pérdida de bosques asociada con los incendios y el examen de las trayectorias de los bosques bajo su frecuencia cambiante pueden ayudar a desenredar los mecanismos que determinan la degradación forestal y examinar la capacidad de resiliencia de nuestros bosques (**Armenteras, et al., 2021**). Es por esto que el conocimiento

sobre los cambios en los regímenes de incendios es fundamental en el continente y en Colombia. Los regímenes de incendios hacen referencia a la descripción de cuándo, dónde y cuáles incendios ocurren utilizando diferentes parámetros, entre los cuales se encuentran: a) la estacionalidad, que describe la época del año durante la cual los eventos de fuego son más frecuentes; b) la frecuencia, definida como el intervalo de tiempo entre incendios en un determinado lugar, o la cantidad de tiempo en que se demora en quemarse por completo un área específica, y c) la extensión, es decir, el tamaño promedio de los incendios en los ecosistemas, lo que es esencial dado que los efectos ecológicos pueden ser muy diferentes dependiendo de esta magnitud (Cochrane, 2003).

Los datos derivados de los sensores remotos ofrecen la posibilidad de detectar cambios en la reflectancia de la superficie de la tierra que ocurren como resultado de la quema de la vegetación (Loepfe, *et al.*, 2012). Estas imágenes satelitales permiten una estimación objetiva de la extensión y el impacto de los incendios, y de su monitoreo en el tiempo. A diferencia de la detección de focos activos, que se basa en la emitancia en el infrarrojo medio debida a las temperaturas elevadas que ocurren en un incendio, la detección del área quemada permite discriminar parches completamente quemados, también denominados cicatrices de área quemada (Ressl, *et al.*, 2009).

En el norte de Suramérica, específicamente en Colombia y Venezuela, los incendios ocurren principalmente en la estación seca entre diciembre y principios de abril (Armenteras-Pascual, *et al.*, 2011). De hecho, los cambios climáticos han dado lugar a alteraciones que determinan un mayor número de temporadas de sequía extrema con una tendencia general al aumento del área quemada, la frecuencia e intensidad de los incendios, y la presencia de temporadas de incendios más prolongadas (van der Werf *et al.*, 2008). En Colombia existe una clara relación entre los patrones espaciales y la variabilidad interanual de los incendios con los factores climáticos (Armenteras-Pascual, *et al.*, 2011), en la cual la actividad del fuego aumenta durante la estación seca, en la que se presentan los valores más bajos de precipitación. En estudios previos se reportaba para la primera década del siglo actual un promedio anual de área quemada de alrededor de 400.000 ha, alcanzándose el millón de hectáreas quemadas en el 2003 (Armenteras-Pascual, *et al.*, 2011). No obstante, no está claro si la extensión y la frecuencia han aumentado con los años, ni si la tendencia en el tiempo sigue la de otros países como Brasil (Lizundia-Loiola, *et al.*, 2020). En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la tendencia de los incendios en el tiempo en términos de área y frecuencia, así como el patrón espacial de las cicatrices, y comparar las tendencias de las dos primeras décadas del siglo.

Materiales y métodos

Área de estudio

Colombia se ubica en el extremo noroccidental de Suramérica entre los 12°26'46 Norte, 4°13'30 Sur, 66°50'54 Este y 79°02'33 Oeste, y es el único país suramericano con costas en el Pacífico (1.350 km de longitud) y el Caribe (más de 1.600 km.). Es el cuarto país más grande de Suramérica después de Brasil, Argentina y Perú, y tiene una superficie de 1.141.748 km². Limita con el mar Caribe al norte, con Panamá (266 km) en el noroeste, con Venezuela (2.219 km de frontera) y Brasil (1.645 km) en el este, con Perú (1.629 km) en el sur, con Ecuador en el suroeste (568 km) y con el océano Pacífico en el oeste (Ideam, *et al.*, 2007).

Colombia es un país de grandes variaciones geográficas y su parte occidental es mayoritariamente montañosa (45 % del territorio). Sin embargo, una gran parte del país está constituida por llanuras situadas por debajo de los 500 m. Por su variedad topográfica, determinada por la presencia de sistemas montañosos, hay una gran diversidad de climas y de clases de suelos. El territorio se puede dividir en seis grandes regiones naturales: la región andina, que incluye las tres cordilleras andinas y los valles interandinos; dos regiones litorales, el Caribe (Atlántico) y el Pacífico; una región que abarca las llanuras de la cuenca del río Orinoco; la región amazónica, que comprende los bosques amazónicos,

y, por último, una región Insular que no se contempla en este estudio. Siguiendo la clasificación de Olson de los principales ecosistemas del mundo (**Olson & Dinerstein, 2002**), Colombia está dominada principalmente por la selva tropical (52,2 %), seguida de sabanas (13,9 %), cultivos, pastizales y matorrales (9 %).

Métodos

Se utilizó el producto Fire_cci v5.1, el cual contiene información del área quemada (AQ) y se basa en datos del instrumento *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) de la NASA a bordo del satélite TERRA, con una resolución de 0,00224573 grados (aproximadamente 250 m) para el período 2001 a 2019 (**Chuvieco, et al., 2018**). La información del área quemada (AQ) incluye la fecha de su detección, el nivel de confianza (NC, un valor de probabilidad que estima la confianza de que un pixel esté realmente quemado) y la información del tipo de cobertura terrestre (LC). La información está disponible públicamente (actualmente, de 2001 a septiembre de 2019) en el portal de datos del CCI de la *European Space Agency* (<http://cci.esa.int/data>) y el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu>). Se completaron seis meses de datos, de octubre del 2019 a marzo del 2020, con otra base de datos de área quemada derivada de MODIS, la del producto MCD64A1, que tiene una resolución de 500 m (**Giglio, et al., 2015**).

Se analizó un conjunto de propiedades del régimen de incendios de importancia crítica en Colombia (extensión del incendio, tamaño de la cicatriz y frecuencia del evento). Para caracterizar el patrón espacial de las cicatrices de área quemada, se calcularon mensualmente las siguientes métricas: 1) área total detectada mensualmente; 2) número de parches o cicatrices de área quemada ($NP \Rightarrow 1$); 3) tamaño medio de los parches quemados o cicatrices ($MPS \Rightarrow 0$, sin límite); 4) distancia media del vecino más cercano (MNND), que corresponde a la distancia promedio hasta el fragmento vecino más cercano del mismo tipo de ecosistema (>1), y 5) índice de agregación (AI) calculado mediante el *software* Fragstats (**McGarigal, et al., 2002**). Cada una de estas se eligió a por la información que brindan y el hecho de no ser métricas redundantes (es decir, que representen la misma información de forma alterna). Cada índice indica un aspecto de la configuración del área quemada.

Para el parámetro de frecuencia, a cada pixel se le cuantificó el número de meses detectados como área quemada, entendida como el intervalo promedio, o cada cuántos meses se detecta un pixel como área quemada. La frecuencia se calculó dividiendo el número máximo de meses estudiados, es decir, 231 meses (enero 2001 - marzo 2020), en 120 meses en la primera década (enero 2001 - diciembre 2010) y 111 meses en la segunda década del siglo (enero 2011 - marzo 2020). Para verificar si había un incremento en la frecuencia de incendios entre los dos periodos, a la frecuencia de la segunda década se le restó la de la primera que, de ser positiva indicaba que el periodo se alargaba, es decir, disminuía la frecuencia, y viceversa. Por ejemplo, si en la segunda década la frecuencia era cada 10 meses y en la primera cada 5 meses, el cambio positivo indicaba que se alargaba el periodo o intervalo en 5 meses, con la consecuente disminución de la frecuencia del evento para ese pixel.

Por último, para evaluar la frecuencia con que las diferentes coberturas de la tierra se veían afectadas por incendios, se utilizó la base de datos MCD12Q1, también derivada de MODIS, que contiene información sobre el tipo de cobertura terrestre anual (**Friedl & Sulla-Menashe, 2019**) con una resolución espacial de 500 m. Usando la información del área quemada calculada anteriormente, se construyeron diferentes colecciones de imágenes desde el 2001 y se calculó la frecuencia por tipo de cobertura para todos los pixeles detectados como quemados desde ese año. Se utilizó la banda *Cover Type 1* del producto MODIS MCD12Q1, la cual se refiere a una clasificación de tipos de cobertura terrestre usando la metodología del IGBP (Programa Internacional de Geosfera-Biosfera). Este producto ha sido ampliamente utilizado como referencia para obtener datos de cobertura del suelo (**Fornacca, et al., 2017**), para estudiar las relaciones entre

el área quemada, la pérdida de bosques y los cambios de cobertura (**Fanin & Van Der Werf, 2015**), o para analizar la relación entre el cambio climático, los incendios y los cambios en la vegetación (**Safronov, 2020**) o el área quemada en relación con los tipos de cobertura del Atlas Global de Incendios (**Andela, et al., 2018**). Se reclasificaron las categorías originales y el análisis se centró en las cinco categorías de cobertura del suelo más afectadas por los incendios (**Tabla 1**): a) bosques; b) sabanas leñosas; c) sabanas; d) pastizales, y e) tierras de cultivo.

Una limitación clave de esta clasificación es la incapacidad de discernir el uso humano de la vegetación dominada por pastos, ya que los pastizales naturales y los pastizales de uso antropogénico se fusionan bajo una sola cobertura de la tierra. Por último, este conjunto de datos de tipos de cobertura terrestre de MODIS tiene información anual, de la cual se extrajeron las cuadrículas anuales para Colombia. Se hizo un análisis por décadas para detectar en cuál había un incremento en la proporción de bosques y otras coberturas afectados con una mayor frecuencia.

Resultados

Variabilidad temporal del área quemada entre el 2001 y el 2020

El área quemada en Colombia tuvo una gran variabilidad entre años, con una tendencia negativa en el tiempo y con el máximo valor detectado de área quemada en febrero del 2007, con 2.521.762 ha, seguido de febrero del 2004, con 1.850.019 ha, y enero del 2003, con 1.586.056 ha (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1514/3191>). El área quemada detectada mensualmente en Colombia durante el período comprendido entre el 2001 y marzo del 2020 evidenció que en el mes de febrero hubo en promedio 777.300 ha quemadas (± 577.443 DE), seguido de enero, con 689.014 ha (± 402.317 DE). En la primera década del siglo (2000-2010) los promedios mensuales fueron más elevados (**Figura 1**) en febrero, con 999.294 ha ± 714.800 , y enero, con 822.549 ha ± 461.498 , y disminuyeron en febrero a 555.365 ha ± 288.972 y en enero a 555.479 ha ± 298.489 en la segunda década (2011-2020).

Tabla 1. Categorías de cobertura del suelo más afectadas por los incendios y correspondencia con categorías del producto MODIS MCD12Q1

Categoría	Categorías originales MCD12Q1 (número de categoría) y descripción
Bosques	<i>Evergreen Needleleaf</i> (Tipo 1) o bosques de hoja aguja de hoja perenne: dominados por coníferas de hoja perenne (dosel: >2 m). Cobertura arbórea: > 60 % <i>Evergreen Broadleaf</i> (Tipo 2) o bosques de hoja perenne de hoja ancha: dominados por árboles de hoja perenne de hoja ancha y palmeados (dosel >2 m). Cobertura arbórea: > 60 %. <i>Decidious Broadleaf</i> (Tipo 4) o bosques caducifolios de hoja ancha: dominados por árboles caducifolios de hoja ancha (dosel: > 2 m). Bosques mixtos (Tipo 5), definidos como bosques dominados por tipos de árboles que no son caducifolios ni perennes (40-60 % de cada uno) (dosel: >2m). Cobertura arbórea: > 60%.)
Sabanas leñosas	<i>Woodland Savannas</i> (Tipo 8), sabanas leñosas con cobertura de árboles de 30 a 60 % (dosel: > 2 m)
Sabanas	<i>Savannas</i> (Tipo 9) o sabanas definidas como áreas con cobertura de árboles de 10 a 30 % (dosel: > 2 m).
Pastizales	<i>Grasslands</i> (Tipo 10) o cobertura dominada por plantas anuales herbáceas (< 2 m)
Tierras de cultivo	<i>Croplands</i> (Tipo 12), áreas en que al menos el 60 % corresponde a tierras de cultivo cultivadas.

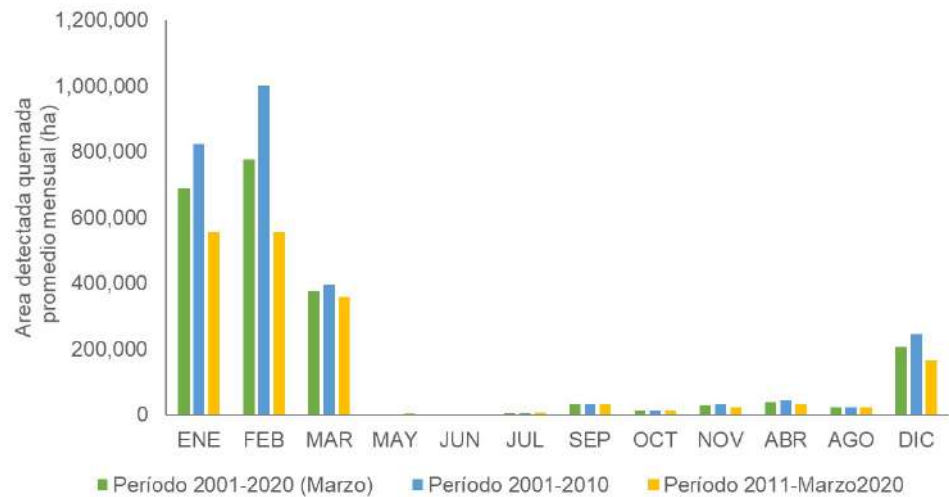


Figura 1. Promedio de área mensual quemada detectada para el período 2001-2020 y para las décadas 2001-2010 y 2011-2020

Configuración espacial de los fragmentos detectados como área quemada

Con respecto a la configuración espacial de las cicatrices o de los parches quemados detectados por el producto MODIS en términos del tamaño promedio de los fragmentos quemados o cicatrices de área quemada (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1514/3191>), para todo el periodo de 2000 a 2020 el tamaño fue de 192,3 ha ($\pm 98,9$ DE), aunque este promedio varió al considerarlo por décadas: la primera década con 188,75 ha ($\pm 95,9$ DE) Vs. 196,2 ha en promedio ($\pm 102,5$ DE) en las cicatrices de la segunda década del siglo, con una tendencia al aumento de tamaño de estas cicatrices desde el 2011 (**Figura 2a y b**). En términos del número de fragmentos (o parches), aunque anualmente se detectaron en promedio 770 fragmentos ($\pm 280,2$ DE), también se encontró variación entre la primera y la segunda décadas, con una tendencia a aumentar el número de fragmentos quemados que se detectaron en el segundo período de análisis (**Figura 3a y b**). Por último, en términos de configuración espacial, la distancia al vecino más cercano en promedio fue de 18,2 Km (± 12 Km DE), con una tendencia a disminuir para todo el período y para ambas décadas, lo que indica que los fragmentos quemados detectados están cada vez más cercanos entre ellos (**Figura 4**).

Frecuencia de detección de área quemada

La **figura 5** ilustra el patrón de la frecuencia de área quemada detectada en términos de cada cuántos meses se detectó un pixel quemado. Las frecuencias más altas correspondieron a una vez al año (11-12 meses) y cada dos años (13-24 meses), mayoritariamente en la región de la Orinoquia, pero también en la Sabanas de Yari y en la parte baja de la Sierra Nevada de Santa Marta. En términos de cómo ha cambiado la frecuencia entre las dos décadas del siglo XXI, la **figura 6** evidencia cómo para los valores positivos se alargó el periodo y, por lo tanto, la frecuencia de detección de área quemada bajó después del 2011. Para los valores negativos se acortó el periodo y, por lo tanto, aumentó la frecuencia de detección de áreas quemadas, es decir, hubo una tendencia a una mayor frecuencia en la detección de área quemada. En total, en el 51,5 % del área afectada aumentó la frecuencia después del 2011 y en el 48,5 % del área hubo una disminución en la frecuencia de incendios.

En términos generales, el 85,9 % del total de los pixeles de bosques afectados por incendios presentó una frecuencia de un incendio para el periodo, pero este porcentaje varió entre décadas, pues hasta el 2010 fue del 86,8 % y en la segunda década del siglo, en el 87,2 % de bosques quemados hubo una frecuencia de un incendio. En este mismo sentido, los bosques afectados más de dos veces aumentaron del 9,5 % al 9,9 % después

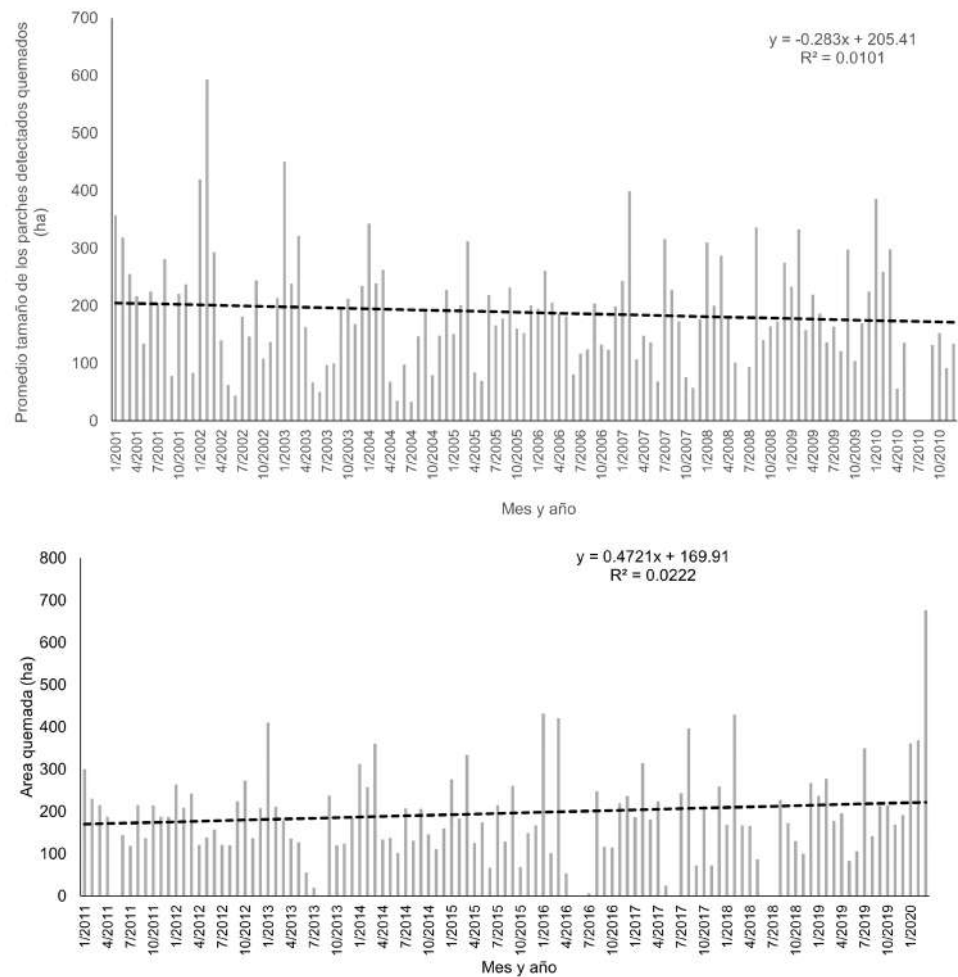


Figura 2. Promedio mensual del tamaño de los parches quemados detectados y tendencia en el tiempo para las décadas: **a)** 2001-2010 y **b)** 2011-2020

del 2010. Los bosques con más de tres incendios, en cambio, pasaron de un 3,7 % a un 2,9 %. En las dos coberturas de tipo sabana se evidenció un aumento en el porcentaje de píxeles afectados con una y dos quemaduras en sus respectivos periodos, patrón que también se detectó para los pastizales (**Figura 7**). La única cobertura en la que se apreció una disminución de la frecuencia de afectación de área quemada fue en la de cultivos, pues la frecuencia de un incendio pasó de 74,4 % antes del 2010 a 71,5 % del total después del 2010, aunque la frecuencia de dos sí tuvo un aumento sustancial del 12,6 % al 20,2 % del total del área afectada. Las sabanas y los pastizales fueron las coberturas con mayor frecuencia de incendios. El 21,6 % del área de sabanas se quemó dos veces en la primera década y un 37 %, tres veces o más, en tanto que después del 2010 el 23,6 % de los píxeles apareció quemado dos veces y un 29,2 % registró una frecuencia de tres o más. Para el caso de los pastizales, tanto en la primera como en la segunda décadas el mayor porcentaje de cobertura se quemó tres o más veces, el 44,3 % en la primera década y el 31,5 % después del 2010.

Discusión y conclusiones

El análisis espaciotemporal de los parámetros del régimen de incendios en Colombia confirmó la variabilidad en un mismo año asociada con la temporada seca y la presencia de incendios que ya se ha documentado. Los meses de enero y febrero fueron los de

mayor cantidad de área quemada detectada satelitalmente y los años 2003, 2004 y 2007, los de mayor incidencia en este sentido (Armenteras-Pascual, *et al.*, 2011). Uno de los parámetros que llama la atención en este estudio actualizado es la tendencia a una menor extensión detectada como área quemada en la segunda década del siglo, lo cual podría deberse a que en la primera década del siglo ocurrieron dos fuertes fenómenos de El Niño: 2002-2003 (estación seca del 2003) y 2006-2007 (estación seca del 2007), con muy pocos niveles de precipitación, lo que hizo que muchos bosques lluviosos tropicales experimentaran una mayor actividad de incendios (van der Werf, *et al.*, 2006).

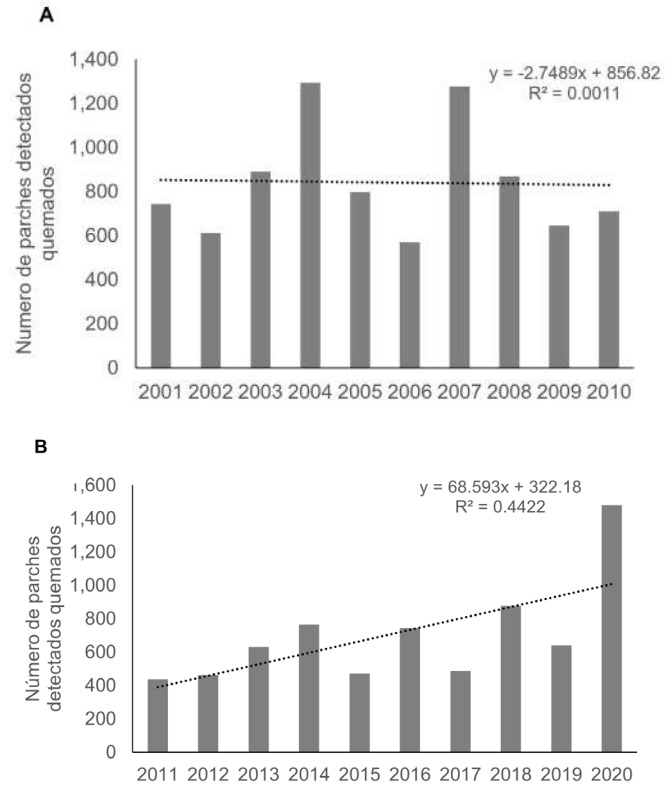


Figura 3. Promedio del número de parches quemados detectados por mes y tendencia en el tiempo para las décadas: **a)** 2001-2010 y **b)** 2011-2020

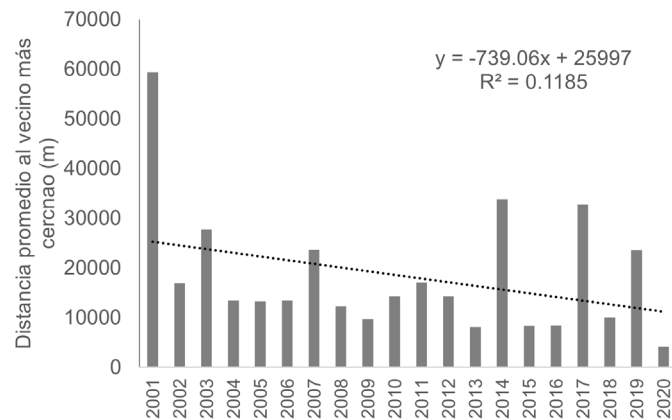


Figura 4. Distancia promedio al vecino más cercano entre los parches quemados detectados y tendencia en el tiempo para el período 2001-2020

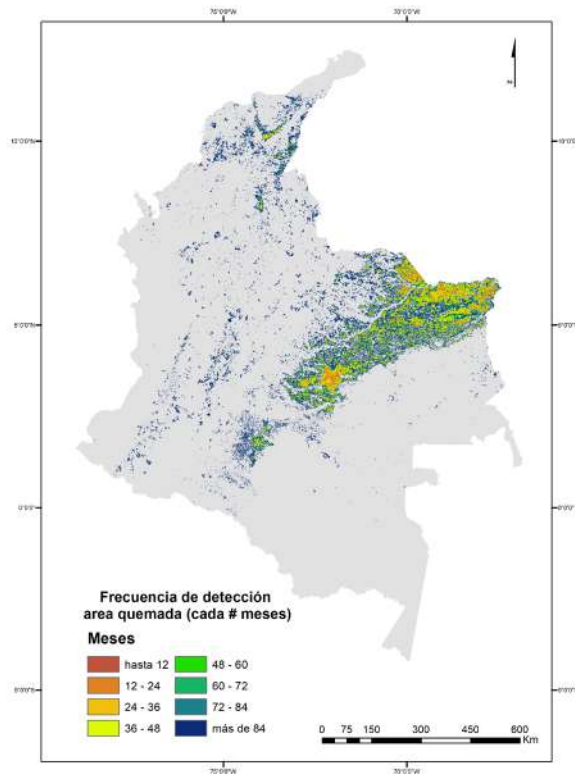


Figura 5. Mapa de frecuencia de detección de área quemada para el período 2001-2020

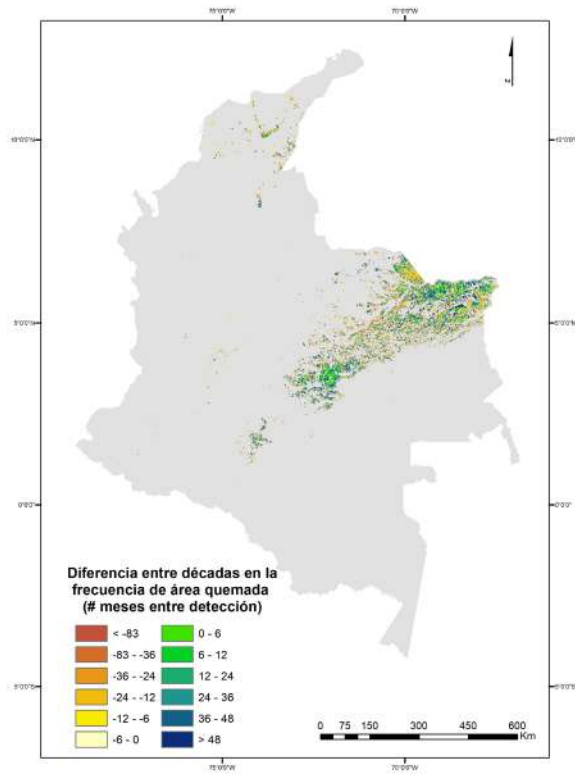


Figura 6. Mapa de cambio en la frecuencia de detección de área quemada entre las décadas 2001-2010 y 2011-2020

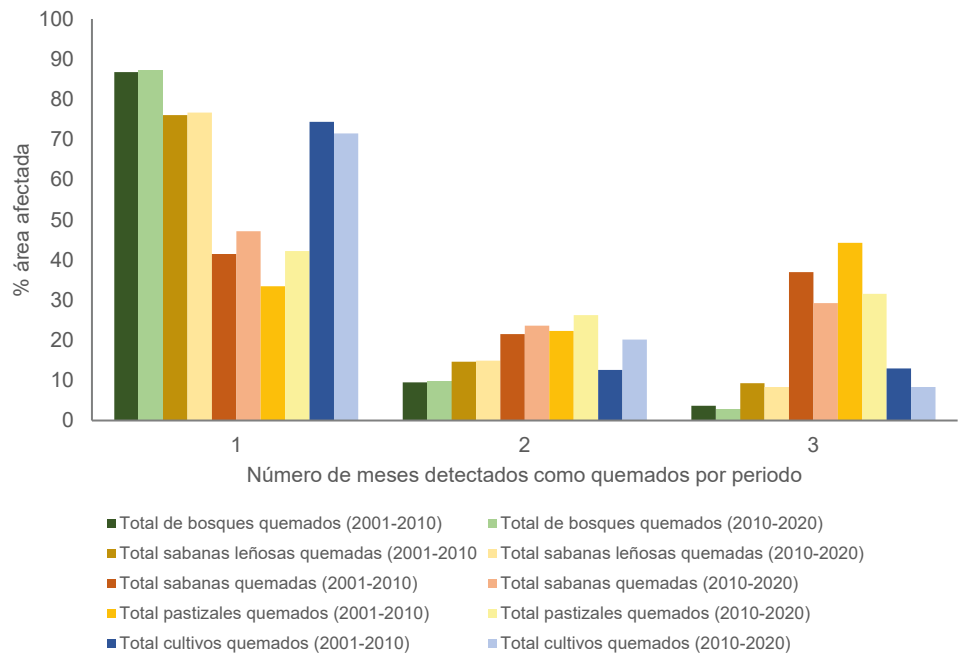


Figura 7. Porcentaje del total de píxeles por tipo de cobertura y por frecuencia de quema para el periodo correspondiente

Los resultados en términos de otros parámetros espaciales, como el tamaño y el número de incendios, indican, en cambio, una tendencia a que aumentaran los fragmentos detectados como quemados y a que fueran más grandes en la segunda década del siglo. Además, las cicatrices de área quemada estuvieron cada vez más cerca. No obstante, también se observó que han disminuido los incendios pequeños o que, a lo mejor, son mitigados más rápidamente. Generalmente esta tendencia es evidencia de que los paisajes se convierten en zonas con menos incendios, pero con mayores áreas afectadas que posiblemente se quemen de forma más intensa (Alencar, *et al.*, 2015).

En términos de frecuencia, la gran variabilidad que encontramos en el país demuestra que en la segunda década del siglo hubo zonas donde disminuyeron los incendios en comparación con la primera década del siglo, en tanto que en otras ha sucedido lo contrario. De nuevo esto indica un cambio en el patrón espacial y un aumento en la frecuencia de incendios focalizados en zonas de sabana, principalmente de la Orinoquia. Las primeras conclusiones de estos resultados preliminares es que los bosques, las sabanas leñosas y los cultivos son las coberturas con mayor proporción de una quema, en tanto que las sabanas abiertas, como los pastizales, tienden a una mayor frecuencia de quemados, independientemente de la década analizada. Se evidencia, asimismo, que un estudio detallado por región y ecosistema puede ayudar a dimensionar mejor el cambio en el régimen de fuego en cada caso. En este sentido, por ejemplo en Brasil los grandes incendios poco frecuentes son responsables de la mayoría del área quemada. Estos grandes incendios muestran tendencias positivas en muchas ecorregiones, mientras que los incendios más pequeños, aunque más frecuentes, han ido disminuyendo en número (Silva, *et al.*, 2021).

Se presenta aquí una serie de tiempo de 20 años de datos de cicatrices o parches quemados detectados a partir de datos satelitales y recolectados para verificar si se había producido un cambio en algunas propiedades del régimen de incendios en Colombia. Es necesario avanzar en la comprensión de este fenómeno, no solo en el largo plazo sino en cada ecosistema en particular. Los incendios más grandes y más frecuentes pueden ocasionar degradación de los ecosistemas e incrementar la tasa de emisión de carbono a nivel nacional, por lo que estos aspectos deben incorporarse en las comunicaciones nacionales sobre

cambio climático y, sin duda, sobre los efectos sinérgicos de un clima futuro más seco, con más fuentes de ignición, así como de la ausencia de prevención, lo que hace urgente una modificación en las prácticas de manejo del territorio que vaya más allá de la supresión de los incendios y contemple la preparación y prevención frente ellos.

Agradecimientos

A Joan Sebastián Barreto por su apoyo en la descarga de la información y la estructuración de la base de datos.

Información suplementaria

Figura 1S. Serie de tiempo de área detectada quemada mensual (ha) a partir del producto MODIS Fire_cci v5.1 (enero 2001 a marzo 2020). Ver figura 1S en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1514/3191>

Figura 2S. Promedio mensual del tamaño de los parches quemados detectados y tendencia en el tiempo para el período 2001-2020. Ver figura 2S en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1514/3191>

Conflicto de intereses

La autora declara que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Alencar, A. A., Brando, P. M., Asner, G. P. & Putz, F. E. (2015). Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. *Ecological Applications*. **25** (6): 1493-1505. <https://doi.org/10.1890/14-1528.1>
- Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Paugam, R., Chen, Y., Hantson, S., van der Werf, G. R., Randerson, J. T. (2018). The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed, and direction. *Earth System Science Data Discussions*. August 2018: 1-28. <https://doi.org/10.5194/essd-2018-89>
- Andela, N., Van Der Werf, G. R., Kaiser, J. W., Van Leeuwen, T. T., Wooster, M. J., Lehmann, C. E. R. (2016). Biomass burning fuel consumption dynamics in the tropics and subtropics assessed from satellite. *Biogeosciences*. **13** (12): 3717-3734. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3717-2016>
- Aragão, L. E. O. C. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V. J. J., Silva Junior, C. H. L. L., Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., Saatchi, S. (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*. **9** (1): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Armenteras-Pascual, D., Retana-Alumbreros, J., Molowny-Horas, R., Roman-Cuesta, R. M., González-Alonso, F., Morales-Rivas, M. (2011). Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*. **151** (3): 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.002>
- Armenteras, D., Dávalos, L. M., Barreto, J. S., Miranda, A., Hernández-Moreno, A., Zamorano-Elgueta, C., González-Delgado, T. M., Meza-Elizalde, M. C., Retana, J. (2021). Fire-induced loss of the world's most biodiverse forests in Latin America. *Science Advances*. **7** (33): 2-10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3357>
- Baccini A., W., Walker, L., Carvahlo, M., Farina, D., Sulla-Menashe, R., Houghton. (2017). Tropical forests are a net carbon source based on new measurements of gain and loss. *Science*. [10.1126/science.aam5962](https://doi.org/10.1126/science.aam5962)
- Bowman, D. M. J. S., Murphy, B. P., Williamson, G. J., Cochrane, M. A. (2014). Pyrogeographic models, feedbacks and the future of global fire regimes. *Global Ecology and Biogeography*. **23** (7): 821-824. <https://doi.org/10.1111/geb.12180>
- Brando, P. M., Silvério, D., Maracahipes-Santos, L., Oliveira-Santos, C., Levick, S. R., Coe, M. T., Migliavacca, M., Balch, J. K., Macedo, M. N., Nepstad, D. C., Maracahipes, L., Davidson, E., Asner, G., Kolle, O., Trumbore, S., Kolle, O., Brando, P. M., Maracahipes,


- L., Coe, M. T., Davidson, E. (2019). Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: Implications for CO₂ and H₂O fluxes. *Global Change Biology*. **25** (9): 2855-2868. <https://doi.org/10.1111/gcb.14659>
- Buma, B. (2015). Disturbance interactions: Characterization, prediction, and the potential for cascading effects. *Ecosphere*. **6** (4): 1-15. <https://doi.org/10.1890/ES15-00058.1>
- Chuvieco, E., Pettinari, M. L., Lizundia-Loiola, J., Storm, T., Padilla-Parellada, M. (2018). ESA Fire Climate Change Initiative (Fire_cci): MODIS Fire_cci Burned Area Pixel product, version 5.1. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5285/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537>
- Cochrane, M. A. (2003). Fire science for rainforests. *Nature*. **421**: 913-918.
- Curtis, P. G., Slay, C. M., Harris, N. L., Tyukavina, A., Hansen, M. C. (2018). Classifying drivers of global forest loss. *Science*. **361** (6407): 1108-1111. <https://doi.org/10.1126/science.aau3445>
- Fanin, T. & Van Der Werf, G. R. (2015). Relationships between burned area, forest cover loss, and land cover change in the Brazilian Amazon based on satellite data. *Biogeosciences*. **12** (20): 6033-6043. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6033-2015>
- Fornacca, D., Ren, G., Xiao, W. (2017). Performance of Three MODIS fire products (MCD45A1, MCD64A1, MCD14ML), and ESA Fire CCI in a mountainous area of Northwest Yunnan, China, characterized by frequent small fires. *Remote Sensing*. **9** (11): 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs9111131>
- Friedl, M. & Sulla-Menashe, D. (2019). MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>
- Giglio, L., Justice, C., Boschetti, L., Roy, D. (2015). MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>
- Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H., Scheffer, M., Nes, E. H. Van, Holmgren, M., Hirota, M., Scheffer, M., Ratajczak, Z., Nippert, J. B., Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H., Scheffer, M., Ratajczak, Z., Nippert, J. B., Nes, E. H. Van, Holmgren, M., Hirota, M., Scheffer, M. (2011). Global Resilience of Tropical Forest and Savanna to Critical Transitions. *Science*. **334** (6053): 232-235. <https://doi.org/10.1126/science.1210657>
- IDEAM, IGAC, IAvH, Invemar, Sinchi, IAP. (2007). Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi e Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico Jhon von Neumann. Bogotá, DC
- Lizundia-Loiola, J., Pettinari, M. L., Chuvieco, E. (2020). Temporal Anomalies in Burned Area Trends: Satellite Estimations of the Amazonian 2019 Fire Crisis. *Remote Sensing*. **12** (1): 151. <https://doi.org/10.3390/rs12010151>
- Loepfe, L., Lloret, F., Román-Cuesta, R. M. (2012). Comparison of burnt area estimates derived from satellite products and national statistics in Europe. *International Journal of Remote Sensing*. **33** (July): 3653-3671. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.631950>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., Ene, E. (2002). FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. University of Massachusetts. www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html
- Nogueira, E. M., Yanai, A. M., Fonseca, F. O. R., Fearnside, P. M. (2015). Carbon stock loss from deforestation through 2013 in Brazilian Amazonia. *Global Change Biology*. **21** (3): 1271-1292. <https://doi.org/10.1111/gcb.12798>
- Olson, D. M. & Dinerstein, E. (2002). The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. **89**: 199-224. <http://www.jstor.org/stable/10.2307/3298564>
- Ressl, R., López, G., Cruz, I., Colditz, R. R., Schmidt, M., Ressler, S., Jiménez, R. (2009). Operational active fire mapping and burnt area identification applicable to Mexican Nature Protection Areas using MODIS and NOAA-AVHRR direct readout data. *Remote Sensing of Environment*. **113** (6): 1113-1126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.016>
- Safronov, A. N. (2020). Effects of climatic warming and wildfires on recent vegetation changes in the Lake Baikal basin. *Climate*. **8** (4): 57. <https://doi.org/10.3390/cli8040057>

-
- Seymour, F. & Harris, N. L.** (2019). Reducing tropical deforestation. *Science*. **365** (6455): 756-757. <https://doi.org/10.1126/science.aax8546>
- Silva, P. S., Nogueira, J., Rodrigues, J. A., Santos, F. L. M., Pereira, J. M. C., DaCamara, C. C., Daldegan, G. A., Pereira, A. A., Peres, L. F., Schmidt, I. B., Libonati, R.** (2021). Putting fire on the map of Brazilian savanna ecoregions. *Journal of Environmental Management*. **296**: 113098. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113098>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S., Arellano, A. F.** (2006). Interannual variability of global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. **6** (2): 3175-3226. <https://doi.org/10.5194/acpd-6-3175-2006>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C., DeFries, R. S., Jin, Y., van Leeuwen, T. T.** (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. **10** (6): 16153-16230. <https://doi.org/10.5194/acpd-10-16153-2010>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N., Dolman, A. J.** (2008). Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*. **22** (3): 1-13. <https://doi.org/10.1029/2007GB003122>

Artículo original

Estimación espaciotemporal de la recarga potencial en un sistema pseudokárstico tropical

Spatio-temporal estimation of the potential recharge in a tropical pseudokarst system

Sandra M. Patiño-Rojas,  Marcela Jaramillo*

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Eafit, Medellín, Colombia

Resumen

La estimación de la recarga permite determinar la incidencia de los cambios climáticos en la oferta hídrica y definir las tasas de bombeo adecuadas para que no ocurra sobreexplotación en los acuíferos. En este sentido, se hizo la primera estimación espaciotemporal de la recarga potencial por precipitación en la Dunita de Medellín, un sistema pseudokárstico tropical considerado zona de recarga lejana de los acuíferos aluviales del Valle de Aburrá (Colombia). Actualmente, estos acuíferos son explotados para uso industrial, pero debido al acelerado crecimiento poblacional podrían ser una fuente para el consumo humano en un futuro. Se emplearon dos métodos de balance hídrico, el balance hídrico superficial (*surface water balance*, SWB) a escala diaria y el de Schosinsky a escala mensual. Además, se evaluaron tres escenarios climáticos diferentes: año seco-El Niño, año húmedo-La Niña y año normal. Se encontró que la recarga se veía fuertemente influenciada por la precipitación y por la textura del suelo. Así, los valores promedios máximos se reportaron para La Niña (1.597 mm/año) y los mínimos para El Niño (813,5 mm/año). Se encontró, además, que el método de Schosinsky subestimó la recarga en un 20 % debido a que esta es un proceso que se da a escala de eventos que solo pueden apreciarse en los registros diarios de precipitación. A pesar de las diferencias, los resultados evidenciaron no solo el potencial de la Dunita de Medellín como zona de recarga de los acuíferos aluviales, sino también la marcada dependencia de la recarga frente a los fenómenos climáticos como el ENOS.

Palabras clave: Balance de agua en el suelo; Schosinsky; Medio fracturado; Dunita de Medellín; Sistema acuífero del Valle de Aburrá; ENSO.

Abstract

Recharge estimation allows determining the incidence of climatic changes in the water supply and defining the appropriate pumping rates so that overexploitation in the aquifer does not occur. Here we made the first spatio-temporal estimation of the potential recharge due to precipitation in the so-called Medellín's Dunita, a tropical pseudo-karst system considered a distant recharge zone of the alluvial aquifers in the Aburrá Valley (Colombia). These aquifers are currently being exploited for industrial use, but due to the rapid population growth, they could be a future source for human consumption. We used two water balance methods, the SWB on a daily scale and the Schosinsky on a monthly scale. Besides, we evaluated three different climate scenarios: dry year-El Niño, wet year-La Niña, and average year. We found that recharge was strongly influenced by precipitation and soil texture. The maximum average values were reported for La Niña year (1597 mm/year) and the minimum for El Niño year (813.5 mm/year). We also found that the Schosinsky method underestimated the recharge by 20% because the process occurs at event scale which can only be observable in daily precipitation records. Despite the differences, the results showed the potential of the Medellín's Dunita as a recharge area for the alluvial aquifers and the marked dependence of recharge on climatic phenomena such as ENSO.

Keywords: Soil water balance; Schosinsky; Fractured media; Medellín's Dunita; Aburrá Valley aquifer system; ENSO.

Citación: Patiño-Rojas SM, Jaramillo M. Estimación espaciotemporal de la recarga potencial en un sistema pseudokárstico tropical. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):261-278, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1512>

Editor: Carlos Alberto Jaramillo Muñoz

***Correspondencia:**
Marcela Jaramillo;
majaram9@eafit.edu.co

Recibido: 1 de julio de 2021

Aceptado: 2 de diciembre de 2021

Publicado: 23 de marzo de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

A nivel global los recursos hídricos superficiales y subterráneos se encuentran bajo amenaza debido al aumento constante de la demanda, los malos usos, la contaminación y la alteración de los patrones hidrológicos asociada con el cambio climático y global. Por lo tanto, la implementación de planes de gestión y prácticas de buen manejo del agua se convierten en un desafío, así como la ejecución de estudios de aguas subterráneas que permitan determinar su cantidad y calidad (**World Water Assessment Programme - WWAP, 2019**).

La determinación de la recarga de los acuíferos es necesaria para estimar la cantidad de agua que se les puede extraer sin sobreexplotación. A nivel mundial, **Jasechko & Perrone (2021)** encontraron que millones de pozos están en riesgo de secarse debido a los descensos en los niveles piezométricos. La sobreexplotación y la reducción de la recarga debida al cambio climático son las principales causas de dichos descensos (**Gleeson, et al., 2012; Taylor, et al., 2013**).

En Colombia el agua subterránea corresponde al 72 % del total del recurso hídrico del territorio (**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2010**) y hasta ahora se han identificado 64 sistemas acuíferos (**IDEAM, 2015, 2019**); uno de ellos es el sistema acuífero del Valle de Aburrá, SAVA (código SAM6.3). El SAVA está conformado por tres unidades hidrogeológicas (**Universidad de Antioquia-UdeA & Área Metropolitana del Valle de Aburrá-AMVA, 2016**): acuífero libre (A1), acuífero semiconfinado (A2) y la Dunita de Medellín (A3), objeto de este estudio.

La Dunita de Medellín (A3) es una roca ígnea ultramáfica que presenta una gran porosidad secundaria debido a su alto grado de fracturamiento y a la disolución de brucita que ha dado origen a paisajes kársticos (**Herrera, 2003**). Datos del caudal reportados en afloramientos y obras de control geotécnico en el área indican un almacenamiento de volúmenes “significativos” de agua subterránea en la Dunita, que podrían emplearse para abastecer agua al área urbana o rural de los municipios de Bello, Medellín o Envigado (**Universidad Nacional de Colombia-UNAL & AMVA, 2008**). Por otra parte, **Camacho (2020)** ha presentado un modelo hidrogeológico conceptual de la Dunita basado exclusivamente en información secundaria en el que se enfatiza la necesidad de obtener información primaria que permita establecer de forma detallada su papel hidrogeológico en el SAVA.

Nuestra hipótesis de trabajo es que la Dunita de Medellín (A3) es una zona de recarga por flujos regionales para los acuíferos aluviales (A1 y A2) que albergan más de 700 pozos y aljibes (**UNAL & AMVA, 2008**). La hipótesis se basa en el hecho de que la impermeabilización del suelo en el valle, debida a la expansión urbana y a la canalización del río Medellín, limita cada vez más la recarga directa por precipitación y la indirecta proveniente del río y de sus afluentes. Para probar esta hipótesis se hizo un proyecto en el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT de Medellín (Colombia) en cuyo marco se desarrollaron varios estudios con información primaria; los resultados se han ido publicando a medida que los estudios culminan.

Un primer estudio para probar esta hipótesis consistió en una caracterización hidroestructural de la Dunita de Medellín (**Patiño-Rojas, et al., 2021**). Con base en más de mil datos estructurales medidos en campo, los autores lograron establecer dos direcciones preferenciales de flujo en la Dunita, una de ellas hacia el SAVA, lo que apoya la hipótesis del presente estudio, aunque se recomienda hacer estudios adicionales para establecer con mayor precisión los aportes desde la Dunita hacia los acuíferos aluviales.

El objetivo del presente estudio fue hacer la primera estimación de la recarga potencial por precipitación en la Dunita de Medellín para así obtener información sobre la magnitud de la recarga que se originaría en la Dunita y alcanzaría los acuíferos aluviales del SAVA.

Materiales y métodos

Se aplicaron dos métodos basados en el balance hídrico: el de balance hídrico en el suelo (SWB por sus siglas en inglés) y el modelo simplificado de **Scholsinsky (2006)**. Se utilizaron estos dos modelos diferentes debido a la incertidumbre asociada con su parametrización, los

datos de entrada y las escalas temporales, lo que incide en los resultados finales (Bogena, *et al.*, 2005; Anderson, *et al.*, 2015; Xie, *et al.*, 2017). Además, dada la influencia que tiene el ENSO en la climatología colombiana, no solo se determinó espacialmente la magnitud de la recarga, sino que se consideró su variación temporal según condiciones hidrológicas normales, húmedas (La Niña) y secas (El Niño).

Zona de estudio

Localización. La zona de estudio se encuentra entre las coordenadas -75,554 y -75,494 W y 6,233 y 6,149 N, y corresponde al miembro sur de la Dunita de Medellín donde está ubicado el altiplano de Santa Elena, zona suroriental de la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia (Figura 1). El área de interés se ubica entre las cotas de 2.200 y 2.830 m s.n.m. La zona comprende un área de 36 km² y está limitada al norte y el occidente por el escarpe centro-oriental del Valle de Aburrá, al este por la quebrada Santa Elena y al sur por la quebrada Las Palmas y el municipio de Rionegro.

Clima e hidrografía. La región de estudio presenta un régimen de precipitación bimodal con dos períodos mayores de lluvia entre abril y mayo y octubre y noviembre intercalados con dos períodos menos húmedos entre diciembre y marzo y junio y septiembre. La precipitación media anual varía entre 2.300 y 3.400 mm y la temperatura media diaria entre 12,9 °C y 22,3 °C. Las fuentes hídricas más importantes en la zona son las quebradas Santa Elena, Santa Bárbara, Espíritu Santo, Las Palmas, El Saladito, La Aguacatala, La Sanín, La Poblada, y La Presidenta (Figura 1c).

Geología. La zona de estudio está comprendida en un 90 % por el cuerpo sur de la Dunita de Medellín (Figura 1c), una faja de rocas ultramáficas con dirección NNW, de 35 km de extensión aproximada y área superficial de 60 km². La faja se divide en tres cuerpos desmembrados: los cuerpos norte y centro, al parecer conectados por debajo del río Medellín, y la parte sur (donde se encuentra el área de interés), de 10 km de longitud (Consorcio de Microzonificación & AMVA, 2007).

La Dunita tiene un espesor máximo aproximado de 600 m (Henao & Monsalve, 2018), es uniforme en composición (90 % olivino, 10 % cromo-espinel), altamente magnésica y con grados variables de serpentización. El paso de dunita a serpentinita puede darse por adición de agua, lo que forma la brucita ([OH]₂Mg), o por adición de agua y sílice. Según Álvarez (1982) es posible que durante la serpentización se haya presentado adición de agua y remoción de magnesio y, en consecuencia, la Dunita del cuerpo sur es susceptible a la disolución y a la formación de un sistema pseudokárstico (Herrera, 2003). Además de esta unidad, en la zona se observan depósitos de vertiente, tanto flujo de lodos como de escombros, que cubren el otro 10 % de la región de interés.

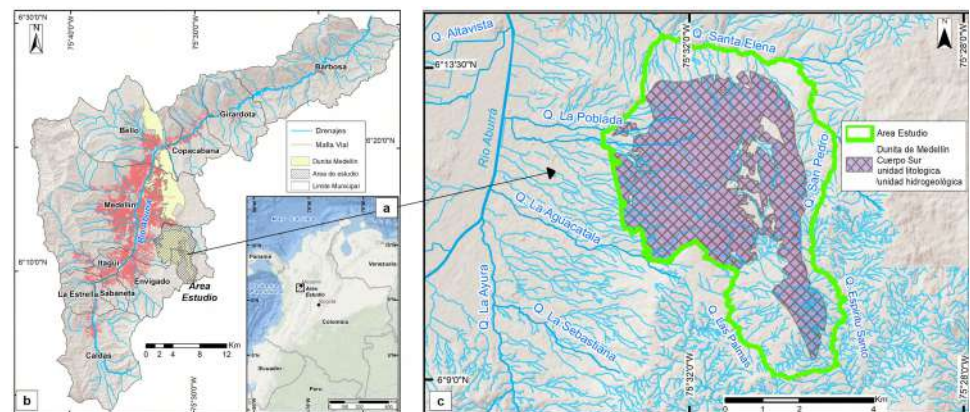


Figura 1. Locación del área de estudio. (a) Mapa de Colombia con la ubicación de la zona de estudio. (b) Subregión del Valle de Aburrá con la unidad litológica Dunita de Medellín (en amarillo). (c) Cuerpo sur de la Dunita de Medellín tanto como unidad litológica como unidad hidrogeológica-A3. Fuente: modificado de UdeA & AMVA, 2016.

Hidrogeología. El sistema acuífero del Valle de Aburrá (SAVA) cubre el 80 % del Valle, con un área cercana a 240 km². Está conformado por tres unidades hidrogeológicas (**Figura 2**): A1-acuífero libre, A2-acuífero semiconfinado y A3-Dunita de Medellín (UdeA & AMVA, 2016). El acuífero libre (A1) está conformado por los depósitos aluviales del río Aburrá - Medellín y sus afluentes, y por los depósitos de vertiente, categorizados como flujos de lodo y escombros con edades en el Neógeno o el Cuaternario. El acuífero semiconfinado (A2) está constituido por depósitos de origen aluvial separados del acuífero libre, que lo suprayace por una capa arcillosa de unos 12 m de espesor. La Dunita de Medellín (A3), por su parte, es una roca ultramáfica que presenta un comportamiento pseudokárstico en su miembro sur y que es considerada zona de recarga lejana de los acuíferos aluviales (**Patiño-Rojas, et al., 2021**).

Marco conceptual y métodos de estimación de recarga

Los métodos para estimación de recarga se clasifican en medidas directas (empleando lisímetros o medidores de infiltración), balance hídrico (entradas, salidas y cambios de almacenamiento de agua), técnicas de trazadores (seguimiento de sustancias en el agua desde un punto a otro), ley de Darcy (niveles hidráulicos) y métodos empíricos (relación de recarga con otras variables hidrológicas) (**Vélez, 2011; De Vires & Simmers, 2002; Lerner, et al., 1990**). Muchas de estas técnicas no cuantifican el valor real, sino que estiman la recarga potencial que se infiltra, la cual puede alcanzar el nivel freático o no (**Scanlon, et al., 2002; Rushton, 1979**).

El método más empleado es el que se basa en los balances hídricos de humedad en el suelo (**Xie, et al., 2017**), ya que permite estimar la recarga distribuida por precipitación y una aproximación de la respuesta del medio a los cambios en superficie (coberturas

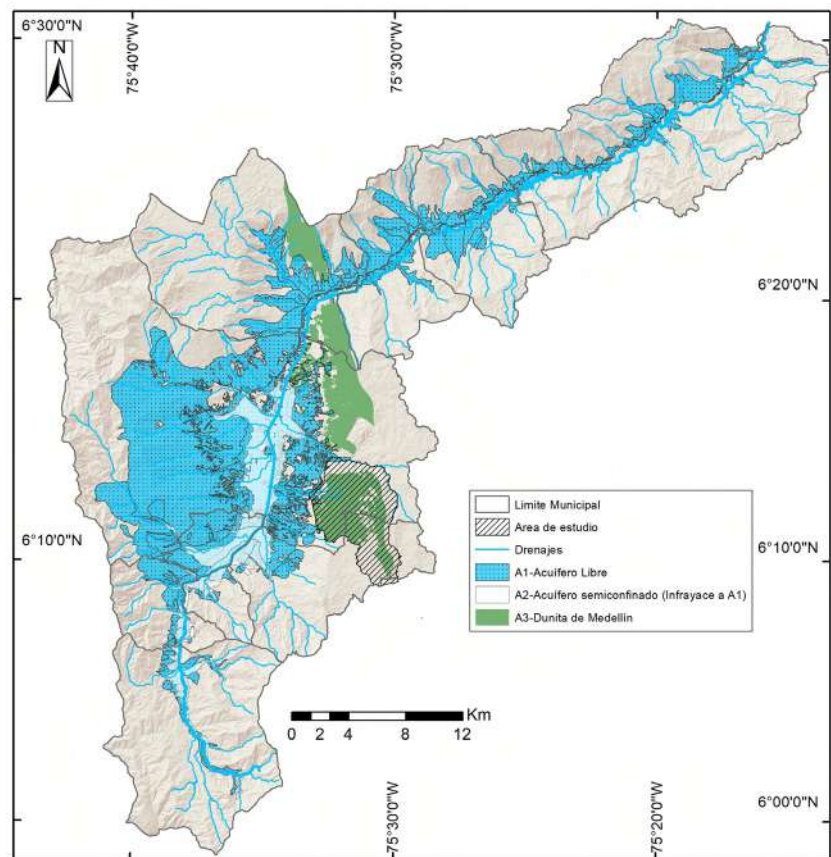


Figura 2. Mapa hidrogeológico del Valle de Aburrá. Fuente: modificado de UdeA & AMVA, 2016.

terrestres, usos del suelo, precipitación, evapotranspiración). Los modelos de balance de humedad en el suelo se dividen en modelos de aproximación matemática de tipo tanques y modelos de base física (Xie, *et al.*, 2017). Los primeros simplifican el medio en celdas verticales donde se almacena o se descarga agua por flujos de entrada (precipitación), salida (evapotranspiración) y exceso en la capacidad de almacenamiento (recarga). Los segundos representan el proceso de evapotranspiración como un submodelo (mayor refinamiento) y transitan la infiltración por la zona no saturada (Ruiz, *et al.*, 2010; Turkeltaub, *et al.*, 2015; Bastidas, 2019).

Como ya se mencionó, aquí se emplearon los métodos de SWB y el de Schosinsky. Ambos se basan en el balance de la humedad en el suelo pero difieren en sus desarrollos operacionales y en la relevancia de los datos de entrada, lo cual incide notablemente en los resultados finales (Bogena, *et al.*, 2005; Xie, *et al.*, 2017).

Método de balance de humedad en el suelo (SWB)

El SWB, versión 1.0 del 2010, es un modelo de tipo tanques desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Es un código de uso libre escrito en Fortran 95, el cual se utiliza ampliamente, especialmente en Estados Unidos (Bradbury & Dripps, 2010; Westenbroek, *et al.*, 2010; Mair, *et al.*, 2013; Engott, *et al.*, 2017; Westenbroek, *et al.*, 2018; Johnson, *et al.*, 2018). El modelo es determinístico, espacialmente distribuido y se aplica en pasos de tiempo diario. Estima la recarga potencial de aguas subterráneas como el remanente del balance en un volumen de control definido en el cual la zona vadosa se conceptualiza como un conjunto de tanques con espesor variable. Utiliza una versión modificada del método de Thornthwaite & Mather (1957) para determinar la humedad en el suelo y la evapotranspiración en cada paso de tiempo y en cada celda del dominio del modelo. Las bases teóricas detalladas de este modelo se encuentran en Dripps (2003) y Dripps & Bradbury (2007).

La representación digital del área de estudio usa celdas de tamaño arbitrario que contienen información sobre las características del terreno y las variables hidrometeorológicas. Una vez dividida el área en celdas, el modelo aplica la ecuación de balance de humedad en el suelo en cada celda (Ecuación 1; Bastidas, 2019):

$$RPP = (P + FE) - (Inp + FS + ETP) - \Delta H \quad \text{Ecuación 1,}$$

donde RPP es la recarga potencial por precipitación, P es la precipitación, FE son los flujos de entrada de otra celda, Inp es la interceptación en el follaje, FS son los flujos de salida (escorrentía), ETP es la evapotranspiración potencial y ΔH son los cambios en el almacenamiento. Todas las variables están en milímetros por día (mm/d).

La escorrentía superficial que ingresa a una celda proviene de las celdas vecinas (FE) y depende de las direcciones de flujo que son las que definen el recorrido que sigue la escorrentía durante su tránsito por el área de estudio. Los valores de recarga potencial diaria se agregan para obtener el valor de recarga potencial media multianual.

En el modelo SWB uno de los parámetros más sensibles corresponde al cálculo de la escorrentía superficial estimado por el número de curvas. Este parámetro representa un factor de incertidumbre del método porque depende de características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de las coberturas, así como del grupo hidrológico del suelo, variables que son difíciles de cuantificar detalladamente en muchos casos (Cronshey, *et al.*, 1986).

Método de Schosinsky

Se trata de un modelo agregado a escala mensual desarrollado en el 2006 por G. Schosinsky y aplicado en Costa Rica, país similar a Colombia por su ubicación en el trópico. Esta metodología es oficial para el cálculo de la recarga en Costa Rica según el Reglamento de Metodologías Hidrogeológicas para la Evaluación del Recurso Hídrico y está programada en una hoja de cálculo en Excel de libre acceso.

El modelo se fundamenta en la ecuación de balance la masa al interior de una cuenca, es agregado, y tiene la ventaja de requerir pocos parámetros. Para capturar la distribución espacial de la recarga, se determinan las zonas con características homogéneas tras realizar

la superposición de las variables del terreno (pendiente, texturas del suelo, profundidad de raíces y cobertura). Para cada una de las posibles combinaciones de las variables mencionadas por zona se aplica el modelo, logrando así una variabilidad espacial en los valores de recarga.

Para el balance del suelo, en primera instancia se requiere la infiltración mensual generada por la lluvia. Posteriormente, es necesario conocer la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez (PM) del suelo, además de la evapotranspiración potencial promedio de la cuenca y la capacidad de infiltración de los suelos. La siguiente es la ecuación que se resuelve en este modelo.

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR \quad \text{Ecuación 2,}$$

donde R_p es la recarga potencial, P_i es la precipitación que infiltra, H_{Si} y H_{Sf} son la humedad del suelo al inicio y final del mes, respectivamente, y ETR es la evapotranspiración real. Todas las variables están en milímetros por mes (mm/mes). Los valores de recarga potencial mensual se agregan para obtener el valor de recarga potencial media multianual.

El modelo funciona ingresando los valores de precipitación en la zona y determinando la cantidad de agua que se infiltra y se acumula en los poros del suelo para llevarlo a capacidad de campo, es decir, la máxima capacidad de agua que puede retener un suelo no saturado. Posteriormente, se cuantifica el proceso de evapotranspiración y, si la cantidad de infiltración es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y satisfacer la necesidad de evapotranspiración, el excedente del agua que infiltra se percolará para recargar el acuífero (Schosinsky, 2006).

El principal parámetro del modelo es la retención en el follaje, es decir, agua que se precipita pero que nunca se infiltra debido a su retención en la vegetación. El modelo considera un valor del 12 % (Butler, 1957) de la precipitación para todas las coberturas, excepto para bosques densos donde la retención del follaje se considera del 20 % (Lynsley, *et al.*, 1958). Por su parte, la infiltración se estima a partir del coeficiente de infiltración desarrollado por Schosinsky & Losilla (2000) en función de la cobertura, de la pendiente y de la permeabilidad del suelo saturado. La escorrentía se calcula como el excedente de la precipitación luego de extraer la retención en el follaje y la infiltración. La evapotranspiración se define como la evaporación del suelo más la transpiración de las plantas, y será mayor cuanto mayor sea la humedad en el suelo. Por lo anterior, en este modelo se asume que la evapotranspiración real es proporcional a la humedad del suelo calculada como la diferencia de humedad entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez (PM).

Por último, la humedad del suelo (HS) se calcula como la diferencia entre la infiltración y la evapotranspiración. Un valor de HS mayor que cero indica almacenamiento en la masa de suelo y la posibilidad de que haya recarga, pero si este es negativo se concluye que la evapotranspiración es mayor que la infiltración, por lo cual hay disminución de la humedad del suelo y no habría recarga. En este modelo el parámetro más sensible corresponde al coeficiente de infiltración o de separación de flujos, el cual depende de los suelos, las coberturas terrestres o el estado de humedad en el suelo.

Dominio de modelación

El cálculo de recarga potencial parte de la delimitación del dominio de modelación (Figura S1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>). Se utilizaron las subcuencas hidrográficas como fronteras hidrogeológicas del volumen de control para la cuantificación de los flujos de entrada y salida. Las fronteras correspondieron a las subcuencas hidrográficas de las quebradas Santa Elena (al norte), Espíritu Santo (al este), Saladito (al Sur), Las Palmas (al suroeste) y a la barrera geológica (al suroeste) dada por el contacto fallado impermeable entre la unidad geológica Dunita de Medellín, el Stock de San Diego y los Metagabros del Picacho (contacto geológico reportado por Consorcio de Microzonificación & AMVA, 2007).

Información hidrometeorológica

Se obtuvieron datos diarios de precipitación de seis (6) estaciones disponibles en la zona operadas, una (1) de ellas por el IDEAM y cinco (5) por las Empresas Públicas de Medellín

(EPM). Además, se recogieron datos diarios de temperatura de una (1) estación operada por el IDEAM que se encuentra por fuera de la zona de influencia (Aeropuerto J. M. Córdoba), pero tiene condiciones de elevación similares a la zona de estudio. En la **tabla S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>; se presentan las características generales de las estaciones hidrometeorológicas (PG: pluviográfica, CO: climatológica ordinaria, SP: sinóptica principal). La ubicación geográfica de las estaciones se presenta en la **figura S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>.

Después del análisis de los registros de precipitación diaria en el periodo de 1979 al 2019 en las seis estaciones, se establecieron tres periodos de acuerdo con el índice oceánico de El Niño (ONI) que representan condiciones hidrológicas diferentes: condición normal (2013 – 2014), año seco-El Niño (2015 – 2016) y año húmedo-La Niña (2010 – 2011).

En los modelos de recarga se ingresaron los datos de precipitación de la estación Santa Elena, pues es la única estación de precipitación dentro del área de estudio (de apenas 32 km²) y, según los polígonos de Thiessen, cubre más del 85 % de la zona (**Figura S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (*ETP*) se empleó la ecuación de **Thornthwaite & Mather** (1957) (Ecuación 3), ya que solo requiere como dato de entrada la temperatura de manera puntual y se obtienen valores mensuales que luego son agregados a escala anual para análisis posteriores.

$$ETP = 1,6 (10^T)^a \quad \text{Ecuación 3,}$$

donde *ETP* es la evaporación potencial en cm/mes, *T* es la temperatura media mensual en °C, *I* es el índice calórico anual dado por la Ecuación 4:

$$I = 12 \left(\left(\frac{T_{\text{anual}}}{5} \right)^{1,514} \right) \quad \text{Ecuación 4,}$$

y el exponente *a* esta dado en función de *I* mediante la Ecuación 5:

$$a = (675 * 10^{-9})I^3 - (771 * 10^{-7})I^2 + (179 * 10^{-4})I + 0,492 \quad \text{Ecuación 5,}$$

Dado que dentro del área no se cuenta con estaciones de medición de temperatura, se utilizaron los datos de la estación Aeropuerto J.M. Córdoba debido a su cercanía al área de estudio y la similitud en las elevaciones.

Información geomorfológica

Los datos geomorfológicos empleados corresponden al modelo de elevación digital (*digital elevation model*, DEM) y la red de drenaje detallada para la zona de estudio. Se obtuvo el DEM del satélite ALOS, sensor PALSAR (*Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar*) (**Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center - ASF DAAC**, 2015), con una resolución espacial de 12,5 x 12,5 m por tamaño de pixel. Dicho DEM ha sido corregido para Antioquia por la Gobernación de Antioquia. La red de drenaje utilizada corresponde a la de las planchas de área urbana 236, 242, 252, 262 a escala de 1:2.000 y del área rural 147IIIb1w, 147IIIb1x, 147IIIb1y y 147IIIb1z a escala de 1:5.000 del proyecto Sistema de Información Geográfica de Medellín y sus Alrededores -SIGMA. El DEM de la zona con la red de drenajes existente se presenta en la **figura S3**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>.

A partir del DEM y la red de drenaje se obtuvieron las direcciones de flujo superficial y el trazado de cuencas hidrográficas (**Figura 3a**). Para corregir posibles sumideros en el DEM y establecer direcciones de flujo y trazado de cuencas se emplearon herramientas SIG programadas en ARCGIS, versión 10.5.

Información de suelos y coberturas

Se utilizó la información a escala de 1:25.000 contenida en el estudio de microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (**Consorcio Microzonificación & AMVA**, 2007), el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica -POMCA del río Aburrá (**CPA Ingeniería, et al.**, 2018) y el POMCA del río Negro (**Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, et al.**, 2018). Los mapas de suelos y de coberturas vegetales se presentan

en la **figura 3b y c**, respectivamente. En la **tabla S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>; se presenta la descripción de las coberturas definidas según la metodología *Corine Land Cover* adaptada para Colombia, a nivel de detalle 3, escala de 1:25.000 (**IDEAM, 2010**).

A partir de la información recopilada de los perfiles de suelo (información granulométrica y de clasificación de su textura a diferentes profundidades), se cuantificó la capacidad de campo (*CC*) y se definieron las texturas mediante el *software* SWC (*Soil Water Characteristics*) de **Saxton & Rawls (2006)**. Los mapas de distribución de *CC* y de las texturas se presentan en la **figura 3d y e**, respectivamente.

A partir del mapa de textura de suelos se clasificaron los suelos en los grupos hidrológicos que propone el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos (*Natural Resources Conservation Service-NRCS*) (**Westenbroek, et al., 2010**). El NRCS propone cuatro grupos hidrológicos: A, B, C y D, siendo el grupo A el de mayor capacidad de infiltración, lo que se relaciona con las texturas más gruesas, y el grupo D el de menor capacidad de infiltración, lo que se relaciona con las texturas más finas. En la **figura 3f** se observa la distribución de los grupos hidrológicos; en la zona de estudio no se encontraron texturas finas que pudieran clasificarse en el grupo D.

A partir del cruce de la información de suelos y coberturas se definió el parámetro de profundidad de las raíces (*PR*) siguiendo las pautas de **Bradbury, et al. (2000)** (**Tabla S3**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>).

Aplicación de los métodos

La presencia conjunta de un tipo de suelo específico y de un tipo de cobertura específica define diversos parámetros del modelo SWB, como el número de curva (*CN*), la tasa máxima de recarga (R_{max}), la profundidad de las raíces (*PR*), la capacidad de campo (*CC*)

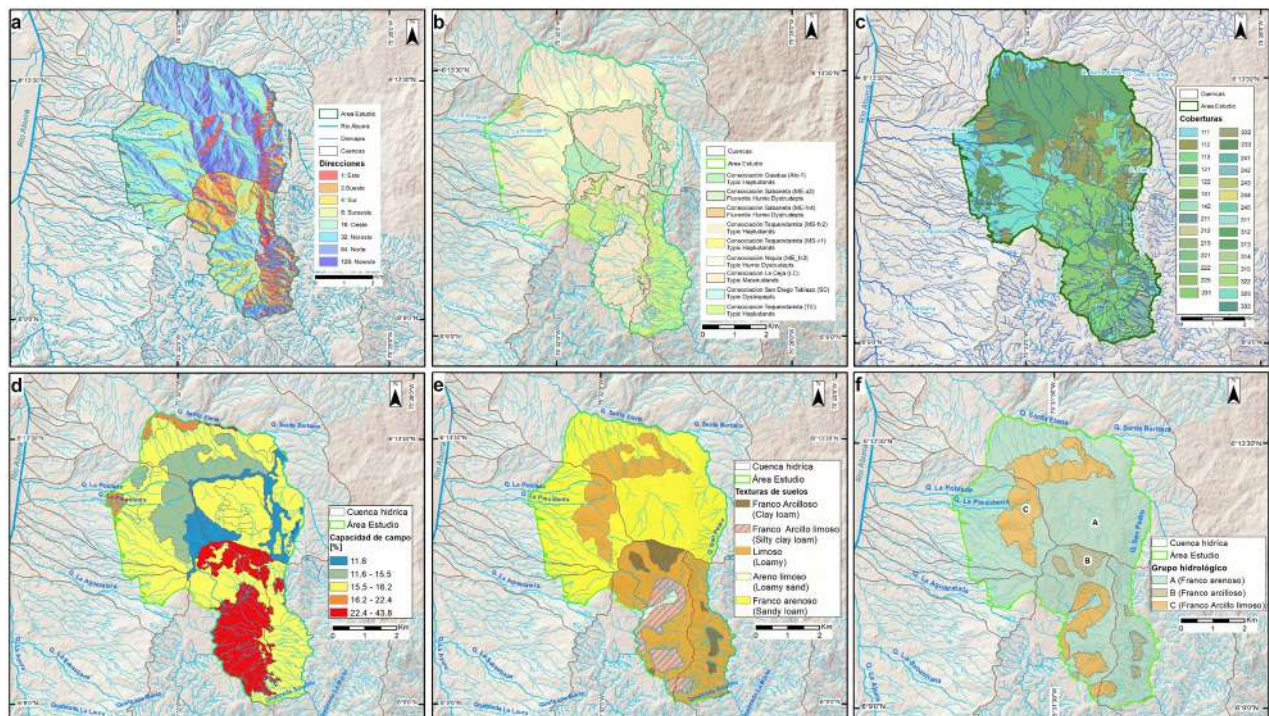


Figura 3. Mapas temáticos de insumo para los modelos de recarga: **a)** Direcciones de flujo del área de estudio¹. **b)** Unidades cartográficas de suelo². **c)** Coberturas vegetales de la zona de estudio³. **d)** Capacidad de campo de los suelos en el nivel más superficial¹. **e)** Texturas del suelo en la zona de estudio¹. **f)** Grupo hidrológico del suelo¹.

¹: elaboración propia; ²: modificado de **Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, et al., 2018** y **CPA Ingeniería, et al., 2018**; ³: modificado de **CPA Ingeniería, et al. (2018)** y **Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, et al. (2018)**.

(que solo depende de las propiedades del suelo) y el umbral de intercepción en el follaje (αI) (**Bastidas**, 2019). En las **tablas S4**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182> y **S5**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>; se presenta la configuración general de los modelos SWB y Schosinsky, respectivamente.

El periodo de inicialización del modelo SWB correspondió al 2009, de forma que la influencia de las condiciones iniciales supuestas de humedad pudiera reducirse en los resultados definitivos del periodo de análisis (enero de 2010 a diciembre de 2017). Dicho periodo se definió con el objetivo de cubrir las tres temporalidades contrastantes: año húmedo, seco y normal.

Periodo de análisis y humedad inicial

Como ya se indicó, los años escogidos con condiciones contrastantes correspondieron a año húmedo-La Niña (Nov 2010-Oct 2011), año seco-El Niño (Nov 2015-Oct 2016), y año normal (Nov 2013-Oct 2014). Los periodos de análisis se iniciaron en el mes de noviembre dado que, según el ciclo anual de lluvias, en el mes anterior (octubre) se presenta la máxima precipitación, lo que permite suponer que el suelo en noviembre está completamente saturado (capacidad máxima de almacenamiento).

En el modelo SWB, dado que se inicia con un periodo largo de un año previo, no se necesita suponer que el suelo está saturado, ya que el modelo se corre de forma continua y ya ha perdido sensibilidad a la humedad inicial; la humedad que se tomaría para iniciar sería la estimada el día anterior. Sin embargo, los análisis se acotaron de noviembre a octubre porque el modelo de **Schosinsky** (2006) sí necesita ese supuesto. Se delimitaron así los periodos de análisis con el objetivo de hacer viable la comparación entre los modelos.

Resultados

Precipitación

A partir de las series de precipitación de las seis estaciones se construyó el ciclo promedio multianual de lluvias para la región. Se observó un comportamiento bimodal, con dos periodos de pocas lluvias entre diciembre y enero (107,34 mm en promedio), y julio y agosto (153,05 mm en promedio) y dos periodos de lluvias copiosas en mayo (248,4 mm en promedio) y octubre (271,4 mm en promedio), con periodos de transición en febrero y septiembre. En la **figura S4**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>; se observan las anomalías estandarizadas de la precipitación mensual, las cuales permiten corroborar el ciclo bimodal de la zona, en el que los meses más lluviosos presentan una anomalía positiva y los meses de menor precipitación presentan valores negativos.

Temperatura

A partir de la serie de temperatura de la estación Aeropuerto J.M. Córdova se construyó el ciclo promedio multianual de temperatura para la región (**Figura S5**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>). Aunque esta estación está por fuera de la zona de estudio, presenta condiciones topográficas similares al área de interés y está cerca de ella. La temperatura promedio multianual es de 17,2 °C.

Evapotranspiración

Como se indicó en la metodología, para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) se empleó la ecuación de **Thornthwaite & Mather** (1957), ya que solo requiere como variable de entrada la temperatura. Dado que los datos de temperatura que se tenían eran puntuales, la información de ETP generada también fue puntual (**Tabla S6**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>).

En la **figura 4a** y **b** se presentan los mapas de distribución espacial de la evapotranspiración real (ETR) obtenidos por los métodos SWB y Schosinsky, respectivamente, para cada condición hidrológica evaluada. Por otra parte, en la **tabla 1** se presentan los resultados de ETR para los tres periodos de análisis y su relación (en %) con la precipitación promedio (P) para cada periodo de tiempo analizado.

El método SWB arrojó valores de ETR mayores que el de Schosinsky. Así, los hallados con el SWB variaron entre 650 mm/año (como límite inferior para un año seco) y 830 mm/año (como límite superior para año húmedo), en tanto que con el método Schosinsky se encontraron valores entre los 470 y 775 mm/año, como límite inferior y superior para año seco y húmedo, respectivamente. Estas magnitudes, además, concordaron con la estimación de ETP presentada (Tabla S6, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>).

En cuanto al porcentaje de precipitación que se convierte en ETR, con el SWB se estimó que para las condiciones normales dicho valor fue, en promedio, cercano al 29 %; para las del año El Niño estuvo en alrededor del 34 % y para el año La Niña fue aproximadamente del 21 %. Este último porcentaje es prácticamente el mismo obtenido con el Schosinsky (20,5 %), aunque con este método los porcentajes para el año normal fueron subestimados casi en un 4 % y para el año El Niño, en 6 %.

La ETR presentó poca variabilidad espacial entre los diferentes años evaluados, independientemente del método utilizado para su estimación, con un rango predominante de tasas promedio de 755 mm/año y 671 mm/año según el SWB y Schosinsky, respectivamente.

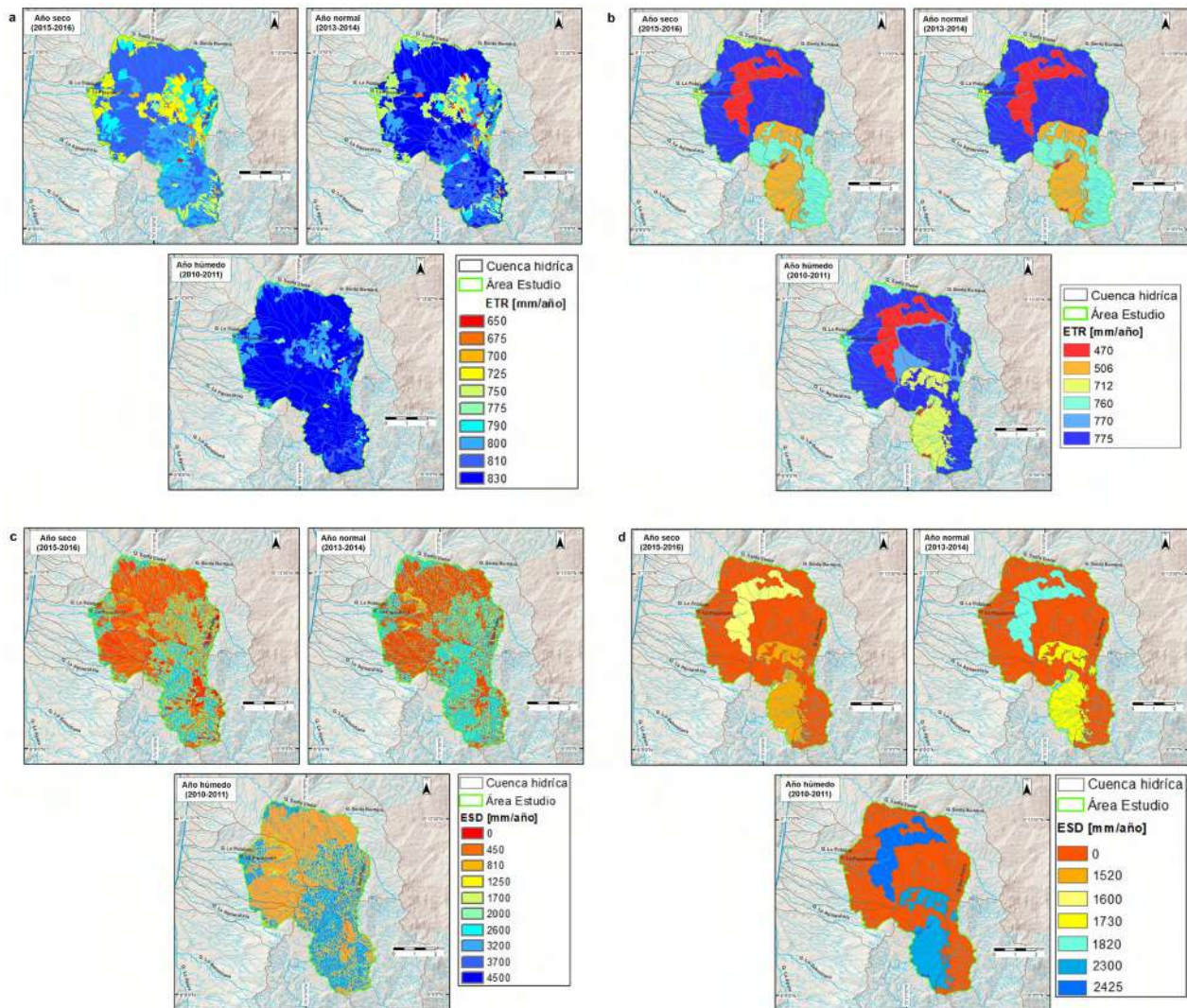


Figura 4. Mapas de distribución de la evapotranspiración real (ETR) y escorrentía superficial directa en mm/año: **a)** ETR estimada por el SWB. **b)** ETR estimada por el método de Schosinsky. **c)** ESD estimada por SWB. **d)** ESD estimada por Schosinsky. Elaboración propia

Tabla 1. Promedio de la evapotranspiración real (ETR) y de la escorrentía superficial directa (ESD) para cada periodo de tiempo analizado y su relación (en %) con la precipitación promedio (P)

Condición	Periodo	P (mm/año)	SWB*		Schosinsky*	
			ETR	ETR/P	ETR	ETR/P
Seco (El Niño)	Nov 2015 - Oct 2016	2306	ETR	ETR/P	ETR	ETR/P
			779	33,8	638	27,7
			ESD	ESD/P	ESD	ESD/P
			844	36,6	703	30,5
Normal	Nov 2013 - Oct 2014	2620	ETR	ETR/P	ETR	ETR/P
			750	28,6	658	25,1
			ESD	ESD/P	ESD	ESD/P
			819	31%	799	30,5
Húmedo (La Niña)	Nov 2010 - Oct 2011	3490	ETR	ETR/P	ETR	ETR/P
			737	21,1	717	20,5
			ESD	ESD/P	ESD	ESD/P
			1217	35%	1065	30,5
Promedio		2805	ETR	ETR/P	ETR	ETR/P
			755	26,9	671	23,9
			ESD	ESD/P	ESD	ESD/P
			960	34	456	30,5

* ETR y ESD en mm/año y relación con la precipitación (ETR/P, ESD/P) en %

Sin embargo, los mapas obtenidos con el método Schosinsky (**Figura 4b**) evidenciaron las menores tasas de ETR hacia la parte norte, donde el suelo es limo-arcilloso, en tanto que con el SWB estas zonas se presentaron hacia la parte central de la zona de estudio donde el suelo es franco arenoso.

Por último, la variación anual mostró tasas de ETR ligeramente mayores en el periodo 2010-2011, caracterizado como un año húmedo, y ligeramente menores en 2015-2016, caracterizado como un año seco. El hecho de que la ETR sea mayor en un año húmedo que en un año seco se puede atribuir a que la mayoría de las coberturas vegetales son de bosque y, por lo tanto, hay mayor disponibilidad de agua para que las plantas transpiren. Sin embargo, puede ocurrir también que en época de lluvia haya más nubosidad y menos radiación y, por lo tanto, la ETR sería menor que en una época seca.

Escorrentía superficial directa

Los métodos empleados también permiten generar mapas de escorrentía superficial directa (ESD). En la **figura 4c** y **d** se presentan los mapas anuales de ESD obtenidos mediante los métodos SWB y de Schosinsky, respectivamente. La **tabla 1** muestra los resultados de ESD para los tres periodos de análisis y su relación (en %) con la precipitación promedio (P) para cada periodo de tiempo analizado.

En términos generales, con los dos métodos se observó que el comportamiento espacial de la ESD está controlado por la textura de los suelos: los mayores valores se registraron predominantemente en suelos limosos, en tanto que las menores tasas se presentaron en los suelos predominantemente arenosos (**Figura 3e**). Sin embargo, los valores máximos de ESD estimados con el método SWB (4.500 mm/año) fueron casi el doble que los estimados con el método de Schosinsky (2.450 mm/año).

La variabilidad interanual se vio controlada por la lluvia, con menor escorrentía directa en el año seco entre el 2015 y el 2016 (con una ESD promedio de 844 mm según el método SWB y de 703 mm según el de Schosinsky) y mayor en el año húmedo entre el

2010 y 2011 (con una ESD promedio de 1.217 mm según el método SWB y de 1.065 mm según el de Schosinsky). Los dos métodos evidenciaron que aproximadamente el 31 % de la precipitación promedio durante un año normal se convierte en ESD. Para los años El Niño y La Niña estos porcentajes variaron según el método empleado, registrándose aumentos con el SWB cercanos al 6 % en el año El Niño y del 4 % en el de La Niña comparados con los obtenidos con el método Schosinsky.

Recarga

En la **figura 5a** y **b** se presentan los mapas de distribución de la magnitud de la recarga potencial en la zona de estudio empleando el método SWB y el de Schosinsky, respectivamente. En la **tabla 2** se muestran los valores promedio de la recarga para los tres periodos de análisis y su relación con la precipitación media con ambos métodos.

Los resultados evidenciaron que los menores valores de recarga en la zona fueron de 0 y 200 mm/año según el método SWB y el Schosinsky, respectivamente. Estas magnitudes se asociaron a aquellas zonas donde la cobertura del suelo limitaba la infiltración de agua o donde las condiciones de la disponibilidad de lluvia fueron las más bajas en la zona de estudio. Los máximos valores de recarga (aquellos durante el año La Niña) estimados mediante el método de Schosinsky fueron de 2.315 mm/año, en tanto que con el método SWB dichos valores ascendieron hasta 3.490 mm/año. En este último caso, la recarga igualó a la precipitación máxima reportada en la estación Santa Elena, es decir, se trata de un caso extremo en el que se infiltra toda la lluvia y no existe escorrentía superficial.

Al comparar los valores promedio de recarga con los valores promedio de precipitación en cada condición hidrológica analizada, se encontró que, según los resultados con el método de Schosinsky, el porcentaje de lluvia que se convirtió en recarga durante el año normal correspondió al 30 %, durante el año El Niño fue del 27 % y durante el año La Niña, del 35 %. El método SWB, por su parte, sobrevaloró todos estos porcentajes en un 20 % para el año normal, en un 17 % para el año El Niño y un 22 % para el año La Niña.

En cuanto a la variabilidad espacial, las zonas donde la recarga potencial tuvo valores altos se concentraron en la parte central correspondiente al altiplano de Santa Elena y parte de la zona suroeste, donde las unidades de suelo presentan una textura predominantemente franco-arenosa con una cobertura dominada por bosques y baja intervención antrópica. Las áreas que registraron los valores más bajos en los tres periodos de análisis

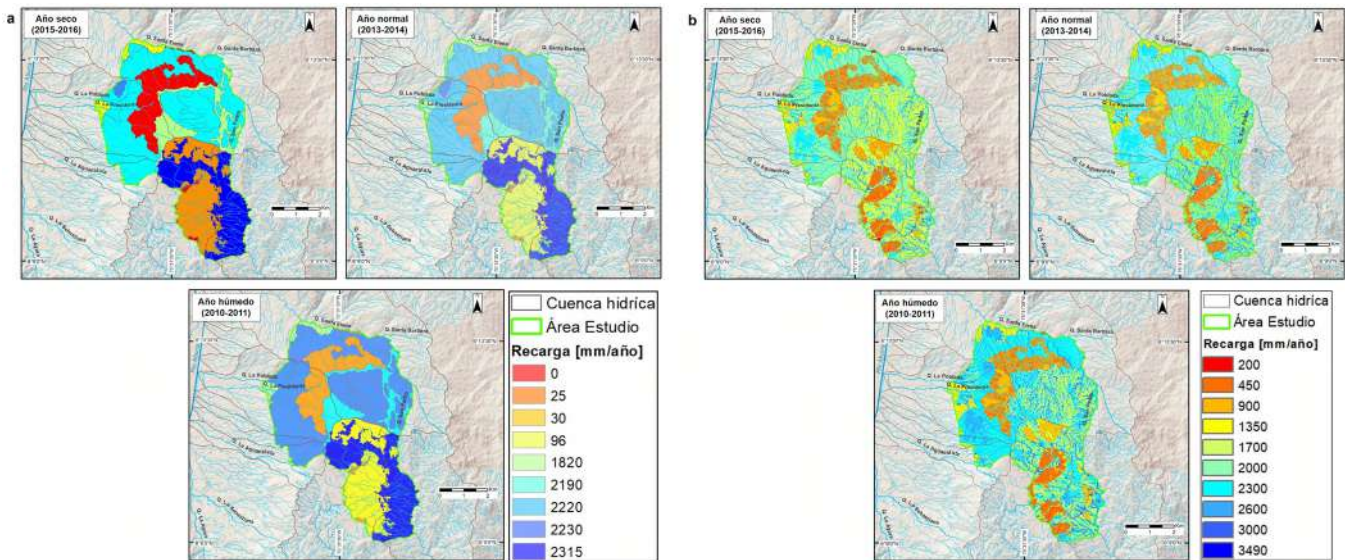


Figura 5. Recarga potencial por precipitación en mm/año estimada por: a) el método SWB y b) el método de Schosinsky. Elaboración propia

Tabla 2. Promedio de la recarga potencial por precipitación (R) y su relación con la precipitación promedio (P) para cada periodo de tiempo analizado

Condición hidrológica	Periodo de simulación	P (mm/año)	SWB		Schosinsky	
			R (mm/año)	R/P (%)	R (mm/año)	R/P (%)
Seca (El Niño)	Nov 2015 - Oct 2016	2306	1014	44,1	613	26,6
Normal	Nov 2013 - Oct 2014	2620	1295	49,4	777	29,7
Húmeda (La Niña)	Nov 2010 - Oct 2011	3490	1977	56,6	1217	34,9
Promedio		2805	1429	50,9	869	31,0

corresponden a zonas aisladas en la parte norte y sur, donde los suelos son limosos a arcillosos, o aquellas con coberturas urbanas donde la pendiente del terreno es alta (>45°), condiciones que no favorecen la infiltración.

Discusión

Las metodologías empleadas en esta investigación para la obtención de la recarga potencial por precipitación para la zona sur de la Dunita de Medellín (unidad hidrogeológica A3 del sistema acuífero del Valle de Aburrá), permitieron tener una aproximación al comportamiento espaciotemporal de la recarga de aguas subterráneas.

A partir de la distribución espacial de recarga potencial fue posible determinar que las zonas de mayor acumulación se ubicaron en texturas de suelo franco arenosas presentes en la región de estudio. Además, se constató que en las regiones con coberturas urbanas la recarga se redujo considerablemente, ya que son zonas que limitan la infiltración para efecto de la recarga. Estas zonas están concentradas en la parte noroeste del polígono de estudio.

Al comparar los resultados de magnitud de recarga por precipitación obtenidos con el modelo SWB y los obtenidos con la metodología de Schosinsky, se encontró que esta última subestimó los campos de recarga en un 20 % en promedio en las condiciones climáticas evaluadas, lo que puede explicarse por la escala mensual de análisis de este método. Ello ratifica el hecho de que la recarga es un proceso que se presenta principalmente a escala temporal de eventos que no se ven reflejados en los registros mensuales (Healy & Cook, 2002; Scanlon, *et al.*, 2002; Wittenberg, *et al.*, 2019). Sin embargo, los resultados promedio obtenidos con ambas metodologías se consideran similares y válidos como línea de base mientras no exista información primaria que permita corroborar los valores de recarga y verificar cuál de los métodos representa mejor las condiciones de la zona.

La magnitud y distribución de la precipitación refleja una disponibilidad de lluvia que propicia los procesos hidrológicos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, tales como la escorrentía directa, la infiltración y la recarga de aguas subterráneas. La variabilidad espaciotemporal de la recarga potencial de aguas subterráneas estimada con ambos métodos visibilizó la fuerte relación con la disponibilidad de la lluvia, la textura de los suelos y el tipo de coberturas.

La unidad A3-Dunita de Medellín mostró una tasa de renovación del recurso que puede estar oscilando entre el 48 y el 60 % de la precipitación, dado que, según Custodio (1997) y la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea-FCIHS (2009), la recarga total de aguas subterráneas (en escala anual) es igual a los recursos anuales renovables (RAR) de un acuífero. Esto ratifica la importancia de esta unidad como zona de recarga del sistema acuífero del Valle de Aburrá (SAVA).

La incertidumbre en la estimación de la recarga potencial mediante las metodologías aquí planteadas está asociada principalmente a la escorrentía superficial directa. En este estudio la escorrentía superficial no fue calibrada, dado que no se contaba con registros

históricos de medición del caudal dentro de las cuencas que delimitan el área de interés. Dada la importancia de esta variable en el balance, diversos enfoques de calibración de los modelos de balance de humedad en el suelo se basan en su ajuste para representar los valores observados de esta variable (**Ruiz, et al., 2010; Mair, et al., 2013; Yenehun, et al., 2017; Bastidas, 2019**).

Se resalta que la recarga potencial se refiere al agua que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático (**Scanlon, et al., 2002; Rushton & Ward, 1979**). Por lo tanto, esta estimación no cuantifica el valor real de recarga, el cual se obtiene únicamente con mediciones directas de niveles piezométricos (**Vélez, 2011**).

Los altos porcentajes de recarga con relación a la precipitación (entre el 44 % y el 57 % según el SWB) pueden explicarse por la presencia del paisaje pseudokárstico que se presenta en la zona, donde se evidencia pérdida parcial o total del drenaje superficial a través de sitios con geoformas de colapso (dolinas, ponores) y puntos con surgencia de agua, así como por la presencia de cenizas volcánicas que cubren la Dunita.

Esta capa de ceniza permite la infiltración y acumulación de la lluvia, actuando como una 'esponja', cuya posterior liberación lenta a los drenajes del altiplano, así como su paso lento hacia el suelo que la subyace, conduce a su liberación hacia las fracturas presentes en la roca (**Solingral & Alcaldía de Medellín, 2011**). Estas características dificultan que el agua lluvia escurra de manera superficial y favorecen que la precipitación se infiltre rápidamente en el terreno, facilitando con ello la recarga en el medio subterráneo. Sin embargo, este planteamiento no está considerado en las modelaciones empleadas.

El estudio permitió evidenciar la importancia de la unidad A3-Dunita de Medellín como zona de recarga potencial para el sistema acuífero del Valle de Aburrá (SAVA). Los resultados de la cuantificación de la recarga permiten establecer que en el altiplano de Santa Elena se recargan potencialmente importantes volúmenes de agua subterránea (en promedio 44 a 57 % de la precipitación se convierte en recarga potencial) que podrían alimentar los acuíferos del fondo del Valle, flujo propuesto en otros estudios como el de **Herrera (2003), Solingral (2011), Camacho (2020) y Patiño-Rojas, et al. (2021)**.

Los aportes de este estudio al conocimiento hidrogeológico de la Dunita de Medellín permiten visibilizar la importancia de esta unidad para la reglamentación de las medidas de manejo y protección de zonas de recarga del SAVA por parte de la autoridad ambiental.

Conclusiones

La magnitud y distribución espacio-temporal de la recarga potencial por precipitación en la unidad A3-Dunita de Medellín se midieron adoptando un enfoque de balance de humedad del suelo con dos metodologías: la de SWB a escala diaria y la de Schosinsky a escala mensual. Se encontró que el método de Schosinsky subestimó la recarga promedio en un 20 % en comparación con el SWB, lo que podría explicarse por el hecho de que la recarga es un proceso que se da a escala de eventos que se enmascaran en los registros mensuales que usa el método de Schosinsky.

Ambas metodologías permitieron ver la relación existente entre la recarga y variables como las coberturas terrestres, las texturas del suelo y las pendientes. Específicamente en la zona de estudio se observó, además, la relación directa entre la recarga potencial y la presencia de geoformas kársticas. Los resultados evidenciaron la gran influencia que tienen los eventos climáticos como el ENOS en los procesos de recarga por precipitación. Por lo tanto, es necesario considerar escenarios futuros de cambio climático para evaluar cómo los cambios en los patrones de precipitación y en las temperaturas pueden afectar estos procesos de recarga.

En futuros trabajos en la zona de estudio se deben obtener datos de escorrentía superficial medidos puntualmente en las cuencas que delimitan la región de interés para calibrar la estimación que aquí se presenta. Además, se requiere de la construcción de pozos de observación para las mediciones directas de niveles piezométricos que permitan determinar la recarga real de aguas subterráneas.

A pesar de que los valores encontrados deben considerarse como magnitudes de referencia, estos permiten entender la importancia de la Dunita de Medellín como zona de recarga del sistema acuífero del Valle de Aburrá (SAVA). Por lo tanto, deben implementarse medidas de manejo especial en pro de la protección del recurso hídrico subterráneo, especialmente teniendo en cuenta que los acuíferos aluviales del SAVA podrían convertirse en una futura fuente de abastecimiento para la población del Valle de Aburrá.

Agradecimientos

A la Universidad EAFIT, que financió durante dos años el trabajo de maestría en Ciencias de la Tierra cuyo resultado se presenta en este artículo. Un agradecimiento especial al ingeniero Breiner Bastidas por sus recomendaciones y a los revisores por tomarse el tiempo de leer detenidamente el manuscrito y proponer cambios específicos.

Información suplementaria

Figura S1. Fronteras del dominio de modelación. Ver figura S1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Figura S2. Distribución espacial de las estaciones de precipitación y temperatura disponibles. Ver figura S2 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Figura S3. DEM 12.5 m x12.5 m empleado en el estudio y red de drenajes del proyecto SIGMA. Ver figura S3 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Figura S4. Ciclo promedio multianual y anomalías de precipitación para las estaciones en la zona de estudio. Ver figura S4 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Figura S5. Ciclo promedio multianual de temperatura. Ver figura S5 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Tabla S1. Estaciones hidrometeorológicas con información empleada en la determinación de la recarga. Ver tabla S1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Tabla S2. Descripción de las coberturas del área en estudio definidas según la metodología *Corine Land Cover* adaptada para Colombia. Ver tabla S2 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Tabla S3. Profundidad de las raíces (cm) para las combinaciones Textura-Cobertura. Ver tabla S3 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Tabla S4. Configuración general del modelo SWB. Ver tabla S4 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Tabla S5. Configuración general del modelo Schosinsky. Ver tabla S5 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Tabla S6. Evapotranspiración potencial (mm/año) para los años de simulación. Ver tabla S6 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1512/3182>

Contribución de los autores

SP: autora principal, encargada de la estimación de la recarga y de la escritura inicial del manuscrito; MJ: asesora de la maestría, revisión de los resultados, revisión permanente del contenido de la publicación y de la corrección del manuscrito.

Conflicto de intereses

Las autoras declaran que no tienen ningún conflicto de intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación.

Referencias

Álvarez, J. (1982). Tectonitas Dunita de Medellín, Departamento de Antioquia, Colombia. INGEOMINAS, Medellín, Informe 1896.

- Anderson, M., Woessner, W.W., Hunt, R.** (2015). *Applied Groundwater Modeling* (Second Ed.). Academic Press. 630 pp. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21563-7>
- Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center - ASF DAAC.** (2015). PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res; Includes Material © JAXA/METI 2007. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- Bastidas, B.D.** (2019). Modelo conceptual de la recarga de aguas subterráneas en el nivel somero del sistema hidrogeológico golfo de Urabá, evaluando su magnitud y variabilidad espacio – temporal. Tesis de maestría Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental. Medellín, Colombia, 205 p.
- Bogena, H., Kunkel, R., Montzka, C., Wendland, F.** (2005). Uncertainties in the simulation of groundwater recharge at different scales. *Advances in Geosciences*. **5**: 25-30. <https://doaj.org/article/042f3e6d2d19461f8e0fe0dc3bc438a1>
- Bradbury, K.R. & Dripps, W.R.** (2010). The spatial and temporal variability of groundwater recharge in a forested basin in northern Wisconsin. *Hydrological Processes*. **24** (4): 383-392.
- Bradbury, K.R., Dripps, W.R., Hankley, C., Anderson, M.P., Potter, K.W.** (2000). Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates. Final project report. 89 p.
- Butler, S.** (1957). *Engineering Hydrology*. - Prentice Hall Inc., Estados Unidos, 356 p.
- Camacho, C.** (2020). Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de la dunita de Medellín, a partir de información secundaria. Tesis de pregrado, Universidad EIA. Medellín, Colombia. 119 p. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2580>
- Consortio de Microzonificación Sísmica & Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA.** (2007). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado (Valle de Aburrá). Medellín. Colombia.
- Consortio POMCAS Oriente Antioqueño, CORNARE, CORANTIOQUIA.** (2018). Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Río Negro. Medellín. 1200 p.
- CPA Ingeniería, CORANTIOQUIA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), CORNARE.** (2018). Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá. Medellín. 1500 p.
- Cronshey, R., McCuen, R., Miller, N., Rawls, W., Robbins, S., Woodward, D.** (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds - TR-55* (Second Ed). U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington. Available in: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- Custodio, E.** (1997). Explotación Racional de las Aguas Subterráneas. *Acta Geológica Hispánica*. **30**: 21-48.
- De Vries, J. & Simmers, I.** (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*. **10**: 5-17.
- Dripps, W.R.** (2003). The spatial and temporal variability of groundwater recharge within the Trout Lake basin of northern Wisconsin. University of Wisconsin.
- Dripps, W.R. & Bradbury, K.R.** (2007). A simple daily soil-water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in temperate humid areas. *Hydrogeology Journal*. **15** (3): 433-444. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0160-6>
- Engott, J.A., Johnson, A.G., Bassiouni, M., Izuka, S.K., Rotzoll, K.** (2017). Spatially distributed groundwater recharge for 2010 land cover estimated using a water-budget model for the Island of O’ahu, Hawai’i. Scientific Investigations Report (Version 1.). <https://doi.org/10.3133/sir20155010>
- Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea - FCIHS.** (2009). Balance Hídrico. Recursos y Reservas. Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M., van Beek, L. P. H.** (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*. **488**: 197-200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Healy, R.W. & Cook, P.G.** (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*. **10** (1): 91-109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Henao, J.D. & Monsalve, G.** (2018). Geological inferences about the upper crustal configuration of the Medellín – Aburra Valley (Colombia) using strong motion seismic records. *Geodesy and Geodynamics*. **9** (1): 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.06.005>
- Herrera, J.** (2003). Carso de alta montaña en Santa Elena; implicaciones hidrológicas e hidrogeológicas en el Valle de Aburrá. Medellín. Tesis de maestría. Facultad de Minas. Sede Medellín. Universidad Nacional de Colombia.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.** (2010). Estudio nacional del agua 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá. Colombia. 421 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.** (2015). Estudio nacional del agua 2014. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá. 496 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.** (2019). Estudio nacional del agua 2018. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá. 493 p.
- Jasechko, S. & Perrone, D.** (2021). Global groundwater wells at risk of running dry. *Science*. **372**: 418-421.
- Johnson, A.G., Engott, J.A., Bassiouni, M., Rotzoll, K.** (2018). Spatially distributed groundwater recharge estimated using a water-budget model for the Island of Maui, Hawai'i, 1978-2007. Scientific Investigations Report (Version 1). <https://doi.org/10.3133/sir20145168>
- Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I.** (1990). Groundwater Recharge: A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. IAH International Contributions to Hydrogeology, 8, Taylor and Francis, Balkema, Rotterdam.
- Linsley, R., Kohler, M., Paulus, L.** (1958). Hydrology for engineers. McGraw Hill. New York. 340 p.
- Mair, A., Hagedorn, B., Tillery, S., El-Kadi, A.I., Westenbroek, S., Ha, K., Koh, G.W.** (2013). Temporal and spatial variability of groundwater recharge on Jeju Island, Korea. *Journal of Hydrology*. **501**: 213-226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.015>
- Patiño-Rojas, S.M., Jaramillo, M., Espinosa-Espinosa, C.A., Arias-Lopez, M.F.** (2021). Preferential groundwater flow directions in a pseudokarst system in Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, volume 112, part 1 (103572). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103572>
- Ruiz, L., Varma, M.R.R., Kumar, M.S.M., Sekhar, M., Maréchal, J.C., Descloitres, M., Braun, J.J.** (2010). Water balance modelling in a tropical watershed under deciduous forest (Mule Hole, India): Regolith matrix storage buffers the groundwater recharge process. *Journal of Hydrology*. **380** (3-4): 460-472. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.020>
- Rushton, K.R. & Ward, C.** (1979). The estimation of groundwater recharge. *Journal of Hydrology*. **41**: 345-361.
- Saxton, K.E. & Rawls, W.J.** (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*. **70** (5): 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G.** (2002). Choosing appropriate technique for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. **10**: 18-39. <https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2>
- Schosinsky, G.** (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*. **34-35**: 13-30. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i34-35.4223>
- Schosinsky, G. & Losilla, M.** (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*. **23**: 43-55.
- Solingral S.A. & Alcaldía de Medellín.** (2011). Modelo hidrogeológico de la ladera suroriental de Medellín. Cuencas altas de las quebradas la presidenta y La Sanín. Medellín.
- Taylor, R., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Treidel, H.** (2013). Ground water and climate change. *Nature Clim Change*. **3**: 322-329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R.** (1957). Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. *Climatology*. **10**: 185-311.
- Turkeltaub, T., Kurtzman, D., Bel, G., Dahan, O.** (2015). Examination of groundwater recharge with a calibrated/validated flow model of the deep vadose zone. *Journal of Hydrology*. **522**: 618-627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.026>
- Universidad de Antioquia (UdeA) & Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA).** (2016). Plan de manejo ambiental del acuífero de la cuenca del río Aburrá. Medellín. 630 p.
- Universidad Nacional de Colombia (UNAL) & Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA).** (2008). Actualización del inventario de captaciones de agua subterránea. Medellín.
- Vélez, M.V.** (2011). Hidráulica de aguas subterráneas. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional. 414 p.
- Westenbroek, S.M., Engott, J.A., Kelson, V.A., Hunt, R.J.** (2018). SWB Version 2.0 — A Soil-Water-Balance Code for Estimating Net Infiltration and Other Water-Budget Components. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chap. A59, 118p.

-
- Westenbroek, S.M., Kelson, V.A., Dripps, W.R., Hunt, R.J., Bradbury, K.R.** (2010). SWB — A Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water- Balance Code for Estimating Groundwater Recharge. U.S. Geological Survey, Techniques and Methods, 6-A31, 52 p. <https://doi.org/10.3133/tm6A31>
- Wittenberg, H., Aksoy, H., Miegel, K.** (2019). Fast response of groundwater to heavy rainfall. *Journal of Hydrology*. **571**: 837-842. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.037>
- Woodward, D.E., Hawkins, R.H., Jiang, R., Hjelmfelt, A.T., Van Mullem, J.A., Quan, Q.** (2003). Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. American Society of Civil Engineers (Ed.), World Water and Environmental Resources Congress, Philadelphia, pp. 1-16.
- World Water Assessment Programme –WWAP.** (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París.
- Xie, Y., Cook, P.G., Simmons, C.T., Partington, D., Crosbie, R., Batelaan, O.** (2017). Uncertainty of groundwater recharge estimated from a water and energy balance model. *Journal of Hydrology*. **561**: 1081-1093. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.08.010>.
- Yenehun, A., Walraevens, K., Batelaan, O.** (2017). Spatial and temporal variability of groundwater recharge in Geba basin, Northern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*. **134**: 198-212. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.006>

Comentario bibliográfico



¿Por qué dependemos de la biodiversidad?

Autor: Juan Armando Sánchez Muñoz

ISBN: 978-958-504-022-9

Editorial: Intermedio Editores/ Ediciones Uniandes

Fecha de publicación: Noviembre del 2021

198 pp.

Comentario al libro

¿Por qué dependemos de la biodiversidad?

La biodiversidad es probablemente una de las palabras más usadas en el vocabulario actual y se expande impulsada por las noticias rápidas y las redes sociales. Aunque pueda haber algún interés sobre el tema, es uno de esos vocablos y conceptos que se vuelven moda, especialmente ahora, con la amenaza del cambio climático y para un país como Colombia, catalogado entre los ambientes más biodiversos del mundo. Aquí la biodiversidad es el elefante en la sala, nuestra identidad natural, tan ignorada por los colombianos como mucho de lo autóctono del territorio. Hasta ahora nos damos cuenta de que la biodiversidad puede ser el hilo conductor del bienestar y el desarrollo humanos, incluso la fuente de inspiración para un nuevo modelo económico: “la oportunidad que no podemos dejar pasar” (Sánchez, 2021a).

Hace pocos años, ya en plena adultez, volví a recorrer senderos y arroyos de una vereda en donde acostumbraba hacer caminatas con mi compañera de aventuras durante la juventud. Empecé a notar en esas ocasiones la ausencia de los arbustos, flores y frutas que veíamos frecuentemente en los paisajes durante nuestros recorridos en el campo y, con un método muy empírico, inventariamos la pérdida de más de 100 entidades que eran comunes en esa región. Este es un ejemplo claro de cómo en poco tiempo se pierde la diversidad biológica de forma drástica, todo frente a nuestros ojos, sin que, por lo general, la comunidad se dé cuenta de lo sucedido y sin que quede registro. Sobreviene entonces la pregunta: ¿cómo podemos inculcar y enseñar nuestra dependencia de la diversidad biológica en este frágil mundo en que vivimos?

La experiencia en el trabajo de campo y la enseñanza de la biología de la tierra y de los mares del profesor y académico Juan Armando Sánchez está plasmada en su libro *¿Por qué dependemos de la biodiversidad? La oportunidad que no podemos dejar pasar*, un documento de 198 páginas y 11 secciones, ilustrado con diagramas y fotos, en su mayoría del autor, que muestran la riqueza animal y vegetal del país. Como todo libro vigente, cuenta con 390 referencias bibliográficas, especialmente de la literatura científica actual, y no se queda en la opinión divulgativa de un experto, sino que presenta las fuentes primarias, los datos precisos y los resultados científicos de vanguardia. Entre las referencias se destaca la de Zimmermann, *et al.* (2019), pues en su estudio los autores constatan “el reciente descubrimiento de que cientos de fármacos tienen interacciones poco conocidas –con potenciales efectos secundarios– con las bacterias de la microbiota intestinal humana”, lo que constituye toda una invitación a cambiar paradigmas médicos y comenzar a ver al hombre como un ecosistema biodiverso. Asimismo, la aplicación del principio microbiológico de Ana Karenina (Zanebeld, *et al.*, 2017), la heroína de León Tolstoi, según el cual “todas las familias felices se parecen unas a otras, pero cada familia infeliz lo es a su manera”, constituye una analogía de la disbiosis. La disbiosis, es decir, la ruptura de la estructura normal de las comunidades bacterianas en los organismos, puede llevar al desarrollo de enfermedades en humanos y animales y constituye un desafío para el diagnóstico médico, al que hoy se exige mayor precisión y la incorporación de nuevas variantes como la microbiota, pues los pacientes enfermos nunca tendrán un “perfil microbiano común”.

En este sentido, pocas veces se mira la biodiversidad, pero ese es el ámbito desde el que se puede responder a la pregunta que plantea el autor en el título de su libro. Lo que ingresa a nuestro organismo y entra en contacto con fármacos y contaminantes puede producir disbiosis, así como dietas pobres en fibras y en prebióticos pero ricas en carbohidratos no complejos, que limitan el bienestar humano en muchos aspectos. Mas allá

de buscar nuevos fármacos para la salud del microbioma humano, debemos percatarnos de que todo depende de la relación que tenemos con los ecosistemas y de cómo podemos conjugar nuestra seguridad hídrica, alimentaria y energética con la biodiversidad.

En el mundo en que vivimos se piensa que los problemas se pueden solucionar con nuevas políticas y estrategias, pero vivimos una gran crisis de gobernabilidad y el manejo de la biodiversidad no es la excepción. Este libro nos invita a que seamos parte de la solución e, incluso, a que nos concibamos como miembros de la biodiversidad, es decir, ecosistemas en los que nuestros propios microorganismos interactúan con los lugares lejanos de dónde provienen, en muchas ocasiones, nuestros alimentos y el agua que ingerimos, en una relación íntima, estrechamente ligada con nuestra salud y la del planeta. Pese a la crisis por la que atraviesa la biodiversidad, el autor nos deja un mensaje esperanzador y enfatiza que un desarrollo armonizado con la biodiversidad no va en contravía del desarrollo humano, todo lo contrario, debe convertirse en su fuente esencial.

Como miembro de la Misión de Sabios experto en el tema del océano y los recursos hidrobiológicos, una de las iniciativas del autor ha sido la exploración de medios para mejorar la comunicación y la enseñanza de la biología en los diversos grados escolares (Franco, *et al.*, 2020). El libro sobre biodiversidad fue la excusa perfecta del autor para recoger su pensamiento con un lenguaje claro y entendible y abundar sobre temas que van desde la formación de los océanos, la riqueza de los corales y la importancia de los ríos y las selvas hasta la microbiota y su influencia en el bienestar de un ecosistema que incluye la salud humana. Nada más pertinente en estos momentos de pandemia causada por un coronavirus que demostrar de forma fehaciente la amenaza que representa la alteración de los ecosistemas y el salto de agentes patógenos de animales a humanos (Sánchez, 2021b).

La amenaza creciente a la biodiversidad bosqueja un panorama complejo y algo apocalíptico, no obstante, a través de la información y la educación se puede contribuir a mitigar algunos de los efectos negativos. “El futuro de la humanidad, y de hecho toda la vida en la tierra, depende de nosotros”, esta frase del científico y naturalista británico Sir David Attenborough es definitiva. Efectivamente depende de nosotros, y qué mejor ejemplo que la visión panorámica y optimista, por qué no decirlo, que nos ofrece este libro sobre la biodiversidad.

John M. González MD, PhD

Facultad de Medicina

Universidad de Los Andes

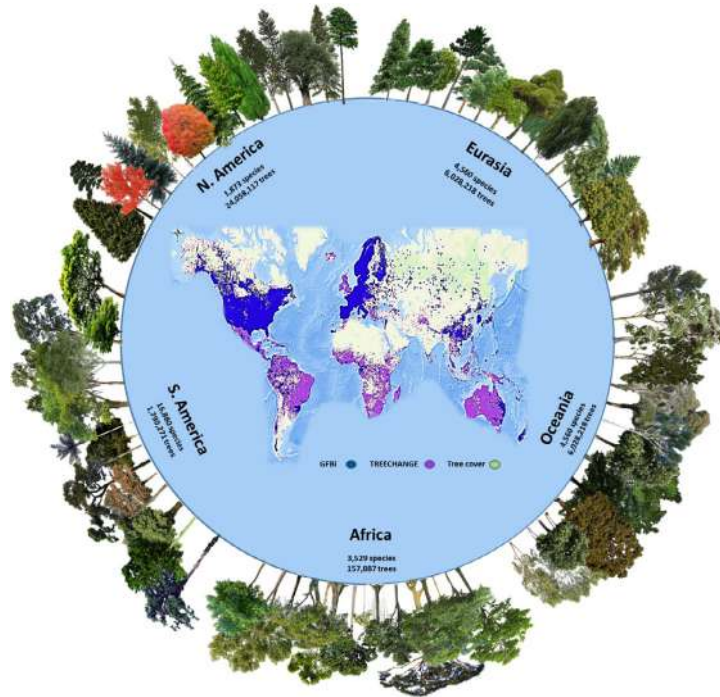
Referencias

- Franco A, Sánchez J.A., Guerra W., Reynolds J., Speich S., Cantera-Kintz J., Gutiérrez F.D.P., Peña E.J.** (2020). Colombia, la oportunidad del agua: dos océanos y un mar de ríos y aguas subterráneas. Propuestas del foco de Océanos y recursos hidrobiológicos. Colección: Misión Internacional de Sabios, 2019 (Volumen 7), Bogotá: Vicepresidencia de la República de Colombia; Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2020. 460 pp. ISBN impreso: 978-958-5135-08-6, ISBN digital: 978-958-5135-09-3.
- Sánchez J.A.** (2021a). ¿Por qué dependemos de la biodiversidad? La oportunidad que no podemos dejar pasar. Intermedio Editores/Ediciones Uniandes, Bogotá, 198 pp. ISBN impreso: 9789585040229, ISBN electrónico: 9789585040236
- Sánchez J.A.** (2021b). Influencia de los cambios ambientales en el riesgo y el aumento de nuevas pandemias. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias exactas, Físicas y Naturales (ISSN 0370-3908). **45** (176): 634-637.
- Zaneveld, J. R., McMinds, R., Vega Thurber, R.** (2017). Stress and stability: applying the Anna Karenina principle to animal microbiomes. *Nature Microbiology*, **2** (9): 1-8.
- Zimmermann, M., Zimmermann-Kogadeeva, M., Wegmann, R., Goodman, A. L.** (2019). Mapping human microbiome drug metabolism by gut bacteria and their genes. *Nature*. **570**: 462-467.

Club de revistas

**Roberto Cazzolla Gatti,
Peter B. Reich, Javier G. P.
Gamarra, Jingjing Liang, et
al.** (2022) The number of tree
species on Earth. PNAS 2022
Vol. 119 No. 6 e2115329119

[https://doi.org/10.1073/
pnas.2115329119](https://doi.org/10.1073/pnas.2115329119)



El lunes 31 de enero de 2022 se publicó *The number of tree species on Earth* en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 119(6) (<https://doi.org/10.1073/pnas.2115329119>). En la publicación se propone una nueva valoración global de la diversidad de árboles en el planeta, con estimaciones de 73.300 especies, de las cuales 9.200 esperan por ser descubiertas. La investigación se basó en los esfuerzos de 148 profesionales de la ecología y la botánica que contribuyeron con la información de campo recolectada en 105.749 parcelas y transectos distribuidos en los cinco continentes y en las cuales se midieron 38 millones de individuos pertenecientes a 28.192 especies de árboles. La información se catalogó en dos conjuntos de datos: el primero, la llamada Iniciativa Mundial para la Biodiversidad Forestal, registra todas las especies que se encuentran en las parcelas y transectos, y la segunda, el *Treechange*, es una herramienta que recopila la presencia, o la ausencia, de especies individualmente por región. Estas bases de datos se encuentran compiladas en la página web del *Global Forest Biodiversity Initiative* (GFBI) o Iniciativa Mundial para la Biodiversidad Forestal (<https://gfbinitiative.net/>). Con la información recabada se procedió a dividir el mundo en cuadrados de 100 kilómetros de ancho y mediante el uso de estimativos paramétricos de riqueza de especies se calculó que existen 64.100 especies de árboles en el planeta. Este valor superó los valores anteriores que predijeron la existencia de cerca de 60.000 especies. Suramérica tiene la mayor biodiversidad de árboles, con 27.186, cifra que representa el 43 % de las especies, seguida de Eurasia, con el 22 %, África, con el 16 %, América del Norte, con el 15 %, y Oceanía, con el 11 %.

Para llegar al estimativo de 9.200 especies de árboles aún desconocidas, se extrapoló el número total de especies raras en las bases de datos. Se utilizó esta estrategia porque la gran mayoría de los árboles desconocidos en la tierra corresponde a especies raras, es decir, aquellas con muy pocos individuos en áreas geográficas pequeñas. La presencia

de especies de árboles raros es muy común en varias regiones de los trópicos. La cuenca amazónica es una de ellas, especialmente en sus regiones inexploradas, las cuales podrían albergar numerosas especies desconocidas para la ciencia. Se podrían hacer estimaciones aún más precisas y, para lograrlo, debe destinarse los recursos necesarios y recurrir a la experiencia adquirida en las últimas décadas en los inventarios forestales de los bosques del Amazonas y el sureste asiático. ¿Cuántos de estos árboles desconocidos se extinguirán antes de que los describan, o cuántos ya tienen muestras preservadas en herbarios mundialmente reconocidos? Tal es el caso de *Neea gustaviaefolia* Aymard, una nueva especie de la familia Nyctaginaceae recientemente descrita de la Serranía de La Macarena. Para la descripción de este árbol se utilizó un exsiccata que había estado depositado durante 71 años en el Herbario Nacional de Colombia (COL). La descripción de nuevas especies, tal como el ejemplo expuesto (de una muestra botánica depositada en COL por más de siete décadas) evidencia cada día más el imprescindible e indiscutible valor de los herbarios. Unos de los resultados más estimulantes de estos estudios es que todavía hay tantas especies de árboles por descubrir, que tenemos que documentarlas porque son raras y vulnerables a la extinción.

Otro hallazgo importante es el hecho de que Suramérica alberga muchas de las especies no descubiertas, lo que no es una sorpresa *per se*. En este continente se encuentra la cuenca amazónica, región extremadamente biodiversa, en la que todavía se necesita mucho trabajo de campo para documentar su biodiversidad. Sin embargo, esta región está muy amenazada por la deforestación y los incendios, con tasas que aumentaron el año pasado al nivel más alto en una década.

El estimativo de 73.300 especies de árboles a nivel mundial podría ser un valor relativamente bajo, en virtud de que hay muchas partes del mundo donde casi no hay datos confiables, incluso a una escala de 100 kilómetros cuadrados. Sin embargo, el principal factor que limita el recuento global de árboles proviene de la falta de estudios de campo en los trópicos. Conocer en detalle la diversidad de los bosques es fundamental para dimensionar su capacidad para continuar proporcionando recursos y otros servicios: constituir grandes reservorios de carbono, mitigar las inundaciones, ser una fuente renovable de madera y productos no maderables y albergar la mayor biodiversidad del planeta.

Estas nuevas cifras nos indican que también vale la pena preguntarse qué significa una mayor diversidad de árboles para abordar el tema del cambio climático. Lo más importante de mantener y conservar la diversidad de los árboles radica en evitar que los bosques sean transformados en otros tipos de ecosistemas que contienen menos carbono. Un claro ejemplo es que los diferentes tipos de árboles poseen sus propias estrategias para resistir las sequías, lo que permite un efectivo recambio de especies y ayuda a mantener el bosque en términos de su estructura y composición florística.

Este nuevo estudio evidencia lo poco que conocemos sobre la flora arbórea del mundo, y a la vez nos hace recapacitar lo mucho que necesitamos aprender sobre los bosques y su biodiversidad, solo así tendremos la posibilidad de conservar los recursos naturales para las generaciones futuras.

Gerardo A. Aymard C.

UNELLEZ-Guanare, Programa de Ciencias del Agro y el Mar, Herbario Universitario (PORT), Mesa de Cavacas, estado Portuguesa 3350, Venezuela; Compensation International Progress S.A. Ciprogress–Greenlife, Bogotá, D.C., Colombia.

Club de revistas

Comentario sobre el artículo EBP-Colombia and the bioeconomy: Genomics in the service of biodiversity conservation and sustainable development de Joseph E. A. Huddart, Andrew J. Crawford, Arturo L. Luna-Tapia, Silvia Restrepo y Federica Di Palma

PNAS 2022. Vol. **119** (4) e2115641119.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2115641119>

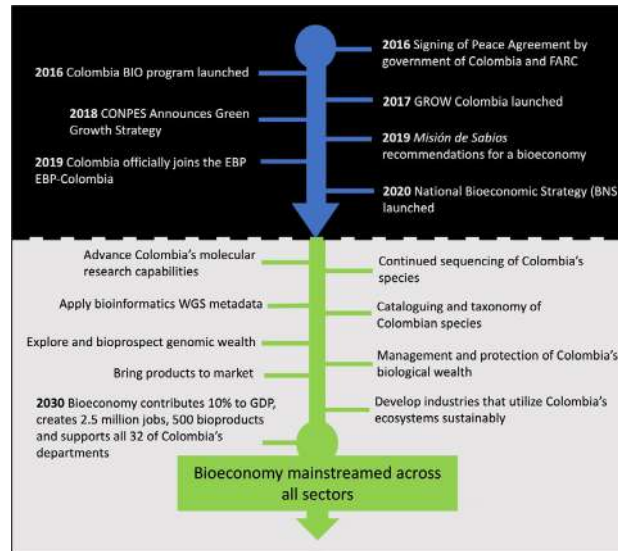


Figura 1. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2115641119#fig01>

A medida que las economías del siglo XXI enfrentan las limitaciones de un planeta finito, como el pico del petróleo y el pico del fósforo, las naciones deben ver por el bienestar de sus ciudadanos y sus sistemas de manera sostenible y renovable. La mayor riqueza de Colombia se encuentra en su gente y en su biodiversidad. Los colombianos de todos los ámbitos de la vida son reconocidos por ser ingeniosos e innovadores, en tanto que nuestra biodiversidad es una de las mayores de la Tierra. Por lo tanto, una solución a los desafíos económicos que enfrenta el país puede encontrarse en su rica biodiversidad.

En el 2020, el gobierno colombiano anunció la Estrategia Nacional de Bioeconomía (ENB) centrada en el concepto de bioeconomía, es decir, el crecimiento generado a partir de actividades económicas innovadoras que utilicen los vastos recursos biológicos del país de manera sostenible. La ENB tiene tres iniciativas sinérgicas que interactúan para promover actividades bioeconómicas, entre ellas, la necesidad de completar tanto como sea posible el inventario de su biodiversidad, objetivo este de las expediciones “Colombia BIO” lanzadas en el 2016 con el auspicio del Ministerio de Ciencias y la utilización de regalías. Los objetivos nacionales establecidos por el gobierno deben estar respaldados por el conocimiento científico para identificar prioridades y desarrollar estrategias orientadas a objetivos y basadas en la biodiversidad del país. Este es uno de los papeles que se le encomendó a la Misión de Sabios, cuya recomendación es que en los próximos ocho años la naciente bioeconomía aporte al menos el 10% del producto interno bruto (PIB) de Colombia. Por último, el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), adscrito al Departamento Nacional de Planeación, adoptó en el 2018 la iniciativa Misión de Crecimiento Verde para orientar la planificación y el desarrollo económico basado en el uso eficiente de los recursos y la promoción de la bioeconomía, e intensificar el papel de la mano de obra en el crecimiento verde. En este sentido, el país representa un caso especial de alineación y propósito común del gobierno, la academia y la industria hacia el crecimiento de la bioeconomía. Por ello, Colombia fue la única nación a la que se le dedicó un artículo específico de los 12 incluidos en la sección especial de la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS) dedicada al Proyecto BioGenoma de la Tierra (*Earth BioGenome Project-EBP*).

La ENB contempla el fomento de la bioeconomía de cinco maneras, entre ellas, propender por una Colombia ‘biointeligente’ que combine los avances tecnológicos con el conocimiento de la biodiversidad y su uso sostenible. Las áreas de interés incluyen los productos farmacéuticos, la ciencia de datos y los campos ‘-ómicos’ como la genómica, la proteómica y la metabolómica. La genómica es la caracterización de la vida en la tierra en su nivel más básico, es decir, la secuencia completa de ADN. La EBP es un consorcio internacional de científicos e instituciones que buscan promover y completar un inventario global de genomas eucariotas. Por lo tanto, los objetivos de la ENB y la EBP encajan muy bien. EBP-Colombia se estableció en el 2019 como un consorcio de múltiples instituciones para promover estos intereses y objetivos compartidos y ya lo está haciendo directa e indirectamente. En primer lugar, se busca que los datos genómicos, el tipo más fundamental de caracterización de la biodiversidad, ayuden a resolver la taxonomía y revelar las adaptaciones evolutivas de las especies a sus entornos, metas que se ha propuesto la iniciativa Colombia BIO. Uno de los primeros proyectos de EBP-Colombia se enfoca en el molusco bivalvo ‘piangua’: se recogerán los datos genómicos del animal y sus simbioses con miras al uso sostenible de esta importante fuente de alimento artesanal. Por otra parte, los datos genómicos tienen beneficios prácticos en los esfuerzos de conservación, pues revelan la demografía histórica y la salud genética actual de las poblaciones silvestres y cautivas con un nivel de detalle sin precedentes. En estos momentos un proyecto de EBP-Colombia está utilizando la genómica para caracterizar la diversidad genética y la historia demográfica del icónico y amenazado oso andino en el territorio nacional. Además, la inversión en tecnologías genómicas, la generación de datos y recursos computacionales y la capacitación pueden brindar claros beneficios económicos. En este sentido, EBP-Colombia está comprometida con el desarrollo de capacidades de formación y conocimiento, pero también con el acceso a recursos tecnológicos computacionales e *in vitro* orientados a la obtención de beneficios bioeconómicos sostenibles. Una iniciativa actual del EBP-Colombia es la aplicación de la genómica a la caracterización y mejoramiento del cacao colombiano mediante el uso de herramientas genéticas moleculares y bioinformáticas para reducir la absorción de cadmio. De esta manera, EBP-Colombia desempeñará un papel importante en el cumplimiento de la meta de la NBS de una Colombia biointeligente.

Andrew J Crawford

Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Silvia Restrepo

Oficina del Vice-presidente para investigación y creación, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Referencias

Huddart, J. E. A., Crawford, A.J., Luna-Tapia, A.L., Restrepo, S., Di Palma, F. (2022). EBP-Colombia and the bioeconomy: Genomics in the service of biodiversity conservation and sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Science USA*. **119** (4): e2115641119 <https://doi.org/10.1073/pnas.2115641119>

Journal Club

Comment on the article
 “EBP-Colombia and the bioeconomy: Genomics in the service of biodiversity conservation and sustainable development” by Joseph E. A. Huddart, Andrew J. Crawford, Arturo L. Luna-Tapia, Silvia Restrepo, and Federica Di Palma

PNAS 2022. Vol. 119 (4) e2115641119.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2115641119>

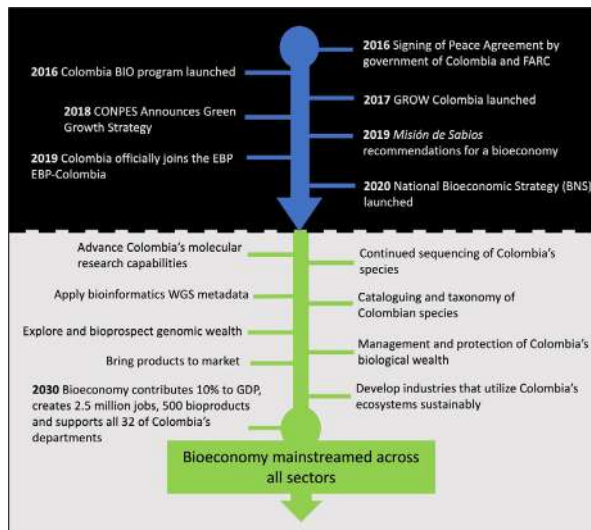


Figure 1. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2115641119#fig01>

As the 21st Century economies face the limitations of a finite planet such as peak oil and peak phosphorus, nations need to care for their citizens and their systems in sustainable and renewable ways. The greatest wealth of Colombia is found in its people and in its biodiversity. Colombian people from all walks of life are renowned for being resourceful and innovative and Colombian biodiversity ranks among the greatest on Earth. One solution to the economic challenges facing the country, therefore, may reside in its rich biodiversity.

In 2020, the Colombian government announced the National Bioeconomic Strategy (NBS) focused on the recent concept of bioeconomy where growth is generated through innovative new economic activities that sustainably utilize the vast biological resources of the country. The NBS has three synergistic initiatives that interact to promote bioeconomic activities for which the completion of the inventory of its biodiversity is very much needed, a target assigned to the “Colombia BIO” expeditions launched in 2016 and sponsored by the Ministry of Sciences with funds from oil royalties. The national goals established by the government need to be informed by scientists to identify priorities and develop goal-oriented strategies based on the country’s biodiversity. This role has been filled by the *Misión de Sabios*, the scholars committee who recommended that over the next eight years the nascent bioeconomy should contribute at least 10% of the gross domestic product (GDP) of Colombia. Finally, the national planning department and the national social and economic policies board adopted in 2018 the initiative *Misión de Crecimiento Verde* (mission for green growth) to guide economic planning and development based on the efficient use of resources, promote the bioeconomy and expand the role of labor in green growth. Colombia, therefore, represents a special case of alignment and common purpose of the government, the academy, and the industry for the sake of bioeconomy. For this reason, Colombia was the subject of the only nation-specific article in the *PNAS* special feature issue of ten articles on the Earth BioGenome Project (EBP).

The NBS will accelerate bioeconomy in five ways, one of which is promoting a ‘bio-intelligent’ country that combines technological advances based on the knowledge of our biodiversity and its sustainable use. Areas of interest include pharmaceuticals, data science,

and ‘-omics’ fields such as genomics, proteomics, and metabolomics. Genomics is the characterization of life on earth at its most basic level: the complete DNA sequence. The EBP is an international consortium of scientists and institutions seeking to promote and complete a global inventory of eukaryotic genomes. Thus, the goals of the NBS and the EBP dovetail nicely and in such a framework, EBP-Colombia was established in 2019 as a multi-institution consortium to promote these shared interests and goals. EBP-Colombia is already supporting, directly and indirectly, three NBS goals: the collection of genomic data aimed at providing the most fundamental type of biodiversity characterization which will greatly help in resolving taxonomy and revealing adaptations of species to their environments, both activities targeted by the Colombian BIO initiative. One of the first EBP-Colombia projects focuses on the bivalve *piangua* genomic data to inform sustainable use of this important artisanal food source. The genomic data has other practical benefits for optimizing conservation efforts by revealing the historical demography and current genetic health of wild and captive populations at an unprecedented level of detail. Currently, an EBP-Colombia project is using genomics to characterize the genetic diversity and demographic history of the iconic and endangered Andean bear across Colombia. Finally, investing in genomic technologies, data generation, computational resources, and training will likely provide tremendous economic returns. EBP-Colombia is, therefore, committed to capacity building in the sense of training and knowledge, but also in the sense of access to *in vitro* and *in silico* technological resources with the goal of developing sustainable bioeconomic benefits. An ongoing example of this endeavor is using genomics to characterize and improve Colombian cocoa by using bioinformatics and molecular genetics tools to reduce cadmium uptake. Consequently, EBP-Colombia will serve an important role in fulfilling the NBS’s goal of a biointelligent Colombia.

Andrew J Crawford

Department of Biological Sciences, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Silvia Restrepo

Office of the Vice-President for Research and Creation, Universidad de los Andes, Bogotá 111711, Colombia

References

Huddart, J. E. A., Crawford, A.J., Luna-Tapia, A.L., Restrepo, S., Di Palma, F. (2022). EBP-Colombia and the bioeconomy: Genomics in the service of biodiversity conservation and sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Science USA*. **119** (4): e2115641119 <https://doi.org/10.1073/pnas.2115641119>

Cartas al editor

Nuevos reportes en los humedales de la costa central del Perú: comentarios sobre el trabajo de Castillo-Velásquez, *et al.*, 2021

New reports in the wetlands of the central coast of Perú: Comments on the study by Castillo-Velásquez, *et al.*, 2021

✉ Héctor Aponte

Coastal Ecosystems of Peru Research Group, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú
haponte@cientifica.edu.pe

Estimada editora:

He leído con especial interés el trabajo de **Castillo-Velásquez, *et al.*** (2021) sobre la diversidad de dípteros acuáticos en dos humedales de la costa central de Perú. Al respecto quisiera hacer algunos comentarios que pueden complementar el formidable trabajo realizado por los autores.

Comenzaré refiriéndome al interesante reporte de *Ephydra gracilis* en las salinas de Chilca. Aunque pareciera un reporte aislado, este hallazgo complementa recientes registros en aves (**Cotillo, *et al.***, 2019), crustáceos (**Mogollón, *et al.***, 2021) y plantas (**González, *et al.***, 2019), los cuales representan novedades para la región (costa central del Perú) y en algunos casos también para todo el país. En estos últimos trabajos se discute la procedencia de los nuevos taxones y se sugiere que algunas actividades humanas (como la acuariofilia, el cultivo *ex situ* o la ganadería) son las potenciales causas de la nueva distribución de estas especies. Es interesante que el reporte de *E. gracilis* en países como Puerto Rico parece estar relacionado con actividades humanas (**Wolcott & Martorell**, 1937), lo que sugeriría un proceso similar en esta especie en la localidad peruana estudiada. Todo ello nos lleva a resaltar la importancia del estudio de las actividades humanas como vehículo de las especies hacia los humedales en esta región del Neotrópico, investigaciones que, hasta la fecha, no se han realizado.

Asimismo, quisiera manifestar que concuerdo con los autores en cuanto a la necesidad de seguir haciendo inventarios en los humedales de esta región del Neotrópico. En trabajos previos se ha proyectado la diversidad de taxones de las plantas vasculares, sugiriendo que su estudio en aquellas localidades menos conocidas de la costa central del Perú permitiría conocer la diversidad completa de especies en esa región (**Aponte & Apeño**, 2019). **Castillo-Velásquez, *et al.*** brindan un valioso listado de dípteros del humedal de Carquín-Hualmay, lo que se complementa con estudios previos sobre plantas vasculares en el mismo humedal, los cuales reflejan la gran riqueza de esta localidad (la mayor por unidad de área de la costa central del Perú según **Aponte & Cano** (2018)), riqueza que podría estar en peligro debido a algunas actividades humanas y cambios en el uso del suelo. Es crucial que los responsables de las decisiones y los gobiernos locales accedan a esta información para así salvaguardar la diversidad de especies que alberga esta localidad costera, la cual ha demostrado ser un hábitat eficiente para diferentes especies a pesar de sus limitaciones de extensión (con solo 11 hectáreas, esta localidad es una de las más pequeñas de dicha región). En los últimos dos años se han sustentado por lo menos tres tesis de licenciatura sobre dicho ecosistema (**Carmen-Alberca**, 2020; **Paredes-Mejía**,

2021; **Hoyos-Gonzales**, 2021), en las que se resalta la gran diversidad y riqueza que alberga este humedal, y demuestran, conjuntamente con el trabajo de **Castillo-Velásquez, et al.**, el interés de la comunidad científica por conocer y estudiar las comunidades en estos humedales que, a pesar de su pequeña extensión, funcionan como laboratorios naturales, tal como lo evidencian publicaciones como esta.

Quisiera culminar felicitando la decisión de la revista de publicar investigaciones como la de **Castillo-Velásquez, et al.** En algunas revistas se rechazan los reportes de ecosistemas pequeños o la información que se considera de carácter local porque se estima que son de poco interés para los lectores, o porque se asume que tienen un impacto reducido. Con la publicación de trabajos como este se le brinda el valor necesario a la labor de los taxónomos por seguir identificando y listando especies. A nivel de las revistas en Scopus, no son muchas las que acogen publicaciones de este tipo. Por ello, animo a los editores a que continúen considerando trabajos de este estilo, pues permiten documentar y hacer pública la diversidad de organismos de nuestro planeta.

Referencias

- Aponte, H. & Apeño, A.** (2019). Riqueza de flora vascular de los humedales costeros de Lima: Una aproximación utilizando estimadores no paramétricos. *Arnaldoa*. **26** (1): 131-138. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26107>
- Aponte, H. & Cano, A.** (2018). Flora vascular del Humedal de Carquín—Hualmay, Huaura (Lima, Perú). *Ecología Aplicada*. **17** (1): 69-76. <https://doi.org/10.21704/rea.v17i1.1175>
- Carmen-Alberca, L. M.** (2020). Diversidad y recambio espacial de las plantas vasculares del humedal marino costero de Carquín-Hualmay (Lima, Perú). Tesis para optar por el título de bióloga marina. Universidad Científica del Sur. <https://doi.org/10.21142/tl.2020.1353>
- Castillo-Velásquez, R. M., Alvarado-García, E. W., Laurent-Rios, A. R., Huamantínco-Araujo, A. A.** (2021). Dípteros acuáticos de dos humedales de la costa central de Perú y obtención de adultos a partir de pupas en el laboratorio. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **45** (176): 795-805. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1350>
- Cotillo, A., Apeño, A., Aponte, H.** (2019). Primer registro documentado del Pato Tarro Blanco, *Tadorna Tadorna* (Linnaeus, 1758), en el Perú. *Ecología Aplicada*. **18** (2): 185-188. <https://doi.org/10.21704/rea.v18i2.1336>
- Gonzales, S., Aponte, H., Cano, A.** (2019). Actualización de la flora vascular del humedal Santa Rosa—Chancay (Lima, Perú). *Arnaldoa*. **26** (3): 867-882. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26303>
- Mogollón, V., Espinoza, V., Lopez, O., Cotillo, A., Torres-Zevallos, U.** (2021). Primer registro del carangrejo rojo de los patanos, *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) (Crustacea, Decapoda, Cambaridae) en el Perú: Su hallazgo en Los Pantanos de Villa, Lima, Perú. *The Biologist (Lima)*. **19** (2): 229-239. <https://doi.org/10.24039/rtb20211921141>
- Paredes-Mejía, M. A.** (2021). Diversidad de aves en el humedal costero Huacho-Hualmay-Carquín, Huaura (Lima, Perú) durante el periodo 2019-2021. Tesis para optar por el título de bióloga marina. Universidad Científica del Sur. Repositorio Institucional – UCS. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/2010>
- Wolcott, G. N. & Martorell, L. F.** (1937). Two insects new to Puerto Rico: The lycid beetle *Thonalmus chevrolati* Bourgeois and the ephydrid fly *Ephydra gracilis* Packard. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*. **21** (4): 535-538. <https://doi.org/10.46429/jaupr.v21i4.14318>

In Memoriam



Ángela Restrepo Moreno

El 3 de febrero de 2022 falleció en Medellín la Académica Honoraria doctora Ángela Restrepo Moreno. La importancia de la obra científica, académica y pedagógica de la doctora Restrepo la hace una de las principales figuras de la historia de la ciencia en Colombia. La doctora Restrepo nació en Medellín en 1931, se graduó como Técnica de Laboratorio del Colegio Mayor de Antioquia y ese mismo año se vinculó al Departamento de Microbiología y Parasitología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Antioquia. Obtuvo su Master (1960) y su doctorado (1965) en la Tulane University de Nueva Orleans (Estados Unidos), y a su regreso a la Universidad de Antioquia estableció el Laboratorio de Micología Médica, con el cual se inició esta disciplina en el país. En este laboratorio implementó las técnicas para el diagnóstico de las infecciones micóticas superficiales y profundas más prevalentes en Colombia y capacitó a un gran número de profesionales para realizarlo. Durante su permanencia en la Universidad de Antioquia estableció la línea de investigación sobre la paracoccidioidomycosis, también conocida como blastomycosis suramericana, causada por la infección con el hongo *Paracoccidioides brasiliensis*. Sus investigaciones en colaboración con un grupo importante de profesores del área clínica, incluyeron la descripción, en 1961, de los primeros casos en Colombia, la detección y caracterización clínica de un número cada vez mayor de pacientes con esta micosis, el desarrollo de métodos diagnósticos micológicos e inmunológicos, la búsqueda del hábitat natural del hongo y estudios *in vitro* sobre la fagocitosis de las levaduras por neutrófilos humanos. Otra de las grandes contribuciones de la doctora Restrepo en la Universidad de Antioquia fue la creación, en asocio con los otros profesores del departamento de Microbiología y Parasitología, de la Maestría en Microbiología Médica, donde tuvo la oportunidad de formar la primera generación de micólogos-investigadores profesionales del país y contribuir a la formación de investigadores en otras áreas de la Microbiología mediante la coordinación del programa *Latin American Professorship* de la *American Society for Microbiology* (ASM), en cuyo marco vinieron a Colombia destacados microbiólogos estadounidenses a dictar cursos avanzados en diferentes tópicos. Estos cursos permitieron que muchos de quienes participamos en ellos pudiéramos posteriormente completar nuestro entrenamiento en prestigiosas universidades de Estados Unidos.

La doctora Restrepo hizo parte del cuerpo profesoral de la Universidad de Antioquia hasta 1976, cuando se retiró siendo profesora titular. Después de dos años como subdirectora del Laboratorio Departamental de Antioquia, se estableció definitivamente en la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB), de la que fue su Directora científica entre 1978 y 2015. Durante esos años, la doctora Restrepo, en colaboración principalmente con el doctor William Rojas Montoya, logró hacer de la CIB uno de los principales centros de investigación biológica no solo de Colombia, sino de Latinoamérica. Rodeada de un grupo de jóvenes talentosos con gran pasión por la investigación, la doctora Restrepo continuó sus estudios sobre *P. brasiliensis* y la paracoccidioidomycosis utilizando modelos en animales de experimentación, las más modernas técnicas de la biología molecular y ensayos clínicos con diferentes medicamentos antimicóticos. La investigación sistemática y continuada sobre esta enfermedad y su agente causal a nivel clínico, epidemiológico, diagnóstico y terapéutico, la búsqueda sistemática del hábitat

natural del hongo, las indagaciones sobre su biología, estructura molecular y respuesta inmunitaria en humanos y en animales de experimentación, hicieron que la doctora Restrepo fuera reconocida como la gran experta internacional en esta enfermedad y que una variedad del hongo haya recibido recientemente el nombre de *restripiensis*.

La doctora Restrepo se posesionó como miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en 1995, en el 2006 como Miembro de Número y en el 2013 como Académica Honoraria. En compañía del fallecido académico Michel Hermelin, fue fundadora en el 2003 del Capítulo de Antioquia del cual fue directora hasta el 2018. Bajo su dirección, el Capítulo de Antioquia se consolidó como el más activo del país, vinculando a la Academia a un número creciente de destacados investigadores locales y estableciendo una activa colaboración con el Parque Explora en una serie de actividades de difusión científica para la población general, pero, especialmente, para niños y jóvenes escolares.

La doctora Restrepo fue la única mujer que participó en la Misión de Ciencia, Educación y Desarrollo creada por el gobierno nacional entre 1992 y 1994. Como aporte a la comisión realizó unos de sus grandes sueños, el descubrimiento y promoción de jóvenes con talento para la investigación. En colaboración con un grupo de investigadores diseñó una encuesta para detectar las características de personalidad de investigadores exitosos, que luego fue aplicada entre los jóvenes de secundaria y primeros años universitarios. Un estudio de validación realizado 20 años después de aplicarse la primera de estas encuestas, permitió demostrar el valor predictivo positivo de ese proceso, pues muchos de ellos ya eran investigadores destacados en instituciones nacionales y extranjeras.

Ángela Restrepo fue, además, una mujer dotada de una gran sensibilidad para todas las manifestaciones de la cultura. Sus conocimientos de arte, literatura y música, y sobre la naturaleza en general, hacían de ella una interlocutora bien informada, amena, profunda y, además, con un gran sentido del humor. Su sensibilidad le permitía ser una compañía inigualable en todos los momentos, buenos o malos, para todos los que de una forma u otra teníamos comunicación con ella. Siempre tuvo un mensaje de estímulo, de apoyo y solidaridad para cada persona y en cada momento.

La obra científica de la doctora Restrepo incluye más de 400 publicaciones nacionales e internacionales de artículos originales, revisiones, capítulos de libros y ensayos. En el 2021 se logró que su obra científica se incorporara a la Biblioteca Digital de Científicos Antioqueños, una iniciativa de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, la Universidad EAFIT y la Universidad Nacional, sede Medellín, la cual puede consultarse en <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/761>. Aunque a lo largo de sus más de 50 años de vida científica fue objeto de numerosos reconocimientos por parte de universidades, sociedades científicas, instituciones públicas y privadas, quiero mencionar aquí solamente el homenaje que le brindó la Academia al cumplir 90 años en octubre del 2021. En él, las intervenciones de sus antiguos estudiantes, incluidos algunos que participaron en el estudio de jóvenes con potencial científico, de sus colegas y de los directivos de la Academia, hicieron evidente el cariño y la admiración por esa gran mujer y científica que fue Ángela Restrepo Moreno.

Luis F García

Miembro de Número, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Profesor Emérito, Grupo de Innunología Celular e Inmunogenética, Sede de Investigación
Universitaria y Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

A nuestros lectores y autores

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, psicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research*), *Current Mathematical Publications*, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik*, *Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

Proceso de evaluación por pares

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará como un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Ética de la publicación

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN), acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Ver documento pdf (anexo)

Política de acceso abierto

La página web de la Revista (www.raccefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

Directrices para autores

Tipología de los artículos publicados en la Revista

Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

Artículos cortos: documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

Artículos de posesión o artículos de revisión de tema: documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

Cartas al editor: posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

Comentarios bibliográficos: son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

Corrección de los autores

Fe de erratas

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).
3. La participación de los autores en el trabajo deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.
5. La terminología debe regirse por el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. La terminología física, química o bioquímica, deberá seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deberán usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos deberán ser escritos en la forma recomendada por el *Internacional Code of Botanical Nomenclature* y por el *International Committee on Systematics of Prokaryotes* o ICSP.

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deberán ser enviados a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito incluirá además de la página correspondiente al título, el resumen, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de las figuras, todos los cuales deberán estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No debe olvidarse el usar la numeración en todo el manuscrito. Extensión máxima de 30 páginas, entre 5.000 a 8.000 palabras.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una hoja de presentación, página en Word con los nombres y apellidos (si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos. Agregar aquí un párrafo en el que los autores declaren su aporte personal al manuscrito bajo consideración.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés (máximo 30 palabras, 165 caracteres)
3. Título corto (máximo 10 palabras, 50 caracteres)
4. Resumen en español e inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis, separadas por punto y coma.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico, dirección electrónica y código ORCID. *Open Researcher and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Researcher and Contributor ID*.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo en conjunto con las leyendas de las figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales y con una resolución mayor a 300 dpi (*dots per inch*).
9. El número máximo de tablas y figuras es de 7. Para enviar información adicional se puede emplear la sección de *Información suplementaria* debidamente referenciada en el texto: tabla 1S, 2S, etc.; figura 1S, 2S, etc.

Estructura del manuscrito

Introducción: se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio indicando, además, la delimitación de la pregunta problema.

Materiales y métodos: se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y metodologías empleadas en el estudio. La descripción de la metodología debe tener referencias de los métodos usados.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y la manera de analizar los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y las figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

Discusión: debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada, en cuyo caso la sección se denominará *Resultados y Discusión*.

Conclusiones: deberán responder al objetivo de la investigación reportada e incluir el planteamiento de objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Referencias: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre entre paréntesis el apellido del primer autor y el año de publicación. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si no forma parte de la estructura formal del texto, por ejemplo: ... como indica Barbudo (2003). Si son solo dos autores se pondrán los dos apellidos, si son más de dos sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo “*et al.*”

La Revista ACCEFYN utiliza las normas del Manual APA, estas emplean un sistema de citación de autor-fecha.

Lista de referencias. Se organizan alfabéticamente y se citan de la siguiente manera:

Artículo de revista

Apellido, A. A., Apellido, B. B., Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen: pp-pp.

Ejemplo

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, 7: 33-40.

Libro

Apellido, A. A. (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Ejemplo

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Capítulo de libro

Apellido, A. A., Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplo

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

Revista en línea

Apellido, A. A. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen** (número): pp-pp. Disponible en: <http://www...>

Ejemplo

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Disponible en: <http://www.jstor.org/pss/2388013>.

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

Citas páginas web

Anotar la fecha de la consulta

Ejemplo

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en <http://www.algaebase.org>., accedida entre enero y junio de 2015.

Tablas y figuras: las tablas y cuadros se denominarán tablas y llevarán numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilizar las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan todos como Figuras, las cuales se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se describen en hoja separada. Si se trata de micro-fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías pero se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

Agradecimientos: podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado en la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoyó económicamente.

Consideraciones

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Corrección de estilo y publicación del manuscrito

Una vez aceptados los artículos, éstos se enviarán a corrección orto-tipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará el registro de cada una de las sugerencias llevadas a cabo y los comentarios o dudas para que el autor o los autores aprueben y contesten apropiadamente.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha aproximada y el número del volumen en el que el trabajo será publicado.

Rectificaciones y correcciones de errores

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores orto-tipográficos, de manejo visual de la información o de imprecisiones involuntarias, el o los autores podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan efectuarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificación de artículos

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

Conflicto de intereses

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, tal conflicto debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, entre otros.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, entre otros).

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Aviso de derechos de autor

Los autores certifican que son los creadores originales del trabajo y declaran que:

- a) Los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y,

en los casos que así lo requieran, se cuenta con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales.

- b) Todos los materiales que se presentan están totalmente libres de derecho de autor y, por lo tanto, el autor de la correspondencia se hace responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.
- c) El trabajo es inédito y no será enviado a otras revistas mientras se espera la decisión de los editores de tal revista. El primer autor declara que no existe un posible conflicto de intereses en este manuscrito.
- d) En caso de ser publicado, los autores del artículo transfieren todos los derechos de autor a la Revista ACCEFYN, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados en la misma.
- e) A través de este documento, y si el trabajo es aceptado para su publicación, la Revista ACCEFYN asume los derechos para editar y publicar los artículos en índices nacionales, e internacionales o bases de datos con fines académicos y científicos no comerciales en medios impresos, electrónicos, Internet en texto completo o cualquier otro medio conocido o por conocer con respeto de los derechos de autoría.

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También se pueden publicar el título del trabajo, el resumen, las tablas y las figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, dando también el crédito a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y de los coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico incluidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros ni serán usados con otros fines.

Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

1. Carta de sometimiento del artículo, donde informa que todos los autores han leído, aprueban y declaran que:

- Están de acuerdo con el manuscrito remitido, en su contenido, organización y presentación.
- El trabajo es original, el cual no ha sido publicado previamente y, de igual forma, no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del Comité Editorial.
- En caso de ser aceptado el manuscrito, se autoriza su publicación bajo las normas establecidas por la revista.

- El documento no cuenta con texto o figuras que tengan reserva de derechos y si los tuviere se cuenta con la autorización escrita para su reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carezcan de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se incluye un párrafo donde los autores declaran cuál fue el aporte de cada uno de ellos al documento.
- Esta carta firmada debe ser adjuntada en el paso 4 del presente proceso de envío en formato PDF.

2. Presentación

- Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo, apellido y segundo apellido separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grados académicos), filiaciones y correos electrónicos.
- Título completo del manuscrito en español e inglés y título corto.
- Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras. Figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales.

3. Estructura del artículo. Se incluyen

- El resumen en español e inglés (Abstract).
- Las palabras clave (máximo 6) en español e inglés (Keywords).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y/o instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.
- Referencias.
- Declaración de conflicto de interés.

4 Información adicional: figuras

- Se incluyen como archivo independiente, cada figura en página aparte.
- Se incluyen las leyendas correspondientes al final del original. Estas figuras deberán ser cargadas en el paso 4 del presente proceso de envío en formato JPG o TIF.

5. Información adicional: tablas

- Se incluyen al final del original, elaborados en el modelo más sencillo de tablas del programa Word.
- Se ordenan secuencialmente.
- Se incluye el título correspondiente.

6. Referencias

- Se han seguido las normas de la revista de ACCEFYN en las instrucciones a los autores.

7. Abreviaturas:

- Se introducen entre paréntesis la primera vez que se usan.

8. Nomenclatura:

- Los nombres de género y especie están en letra cursiva.
- Los nombres de microorganismos, plantas y animales se escriben completos la primera vez que se citan, en el título y en el resumen.

9. Ética

- Todos los autores conocen y aprueban la presentación del manuscrito, su contenido, la autoría y el orden de la autoría.
- El manuscrito ha sido postulado solo a la Revista ACCEFYN y no se encuentra postulado ni ha sido publicado en otra revista.
- Si el artículo incluye la investigación en humanos o con animales se han seguido las directrices de la Declaración de Helsinki y el uso de primates no humanos en la investigación.
- Se incluye los agradecimientos a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.

10. Revisores

Se suministran indicaciones sobre tres o cuatro posibles revisores con sus nombres completos, formación académica y direcciones de correos electrónicos.

To our readers and authors

Focus and Scope

The Journal of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences (ACCEFYN) is a multidisciplinary quarterly journal that publishes high quality original research articles.

The journal publishes scientific articles in the disciplines of Biomedical Sciences, Behavioral Sciences (philosophy, psychology, anthropology, and sociology), Natural Sciences (Biology, Botany, Microbiology, Zoology, Ecology), Physical Sciences, Chemical Sciences, Earth Sciences (Geology, Environmental Sciences) and Mathematics. It is included in several national and international directories and indexing services like Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, On-line Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal's website (www.racefyn.co) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website (www.racefyn.co) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

Author Guidelines

Research articles. A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

Brief articles. Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

Inaugural articles or Review articles. Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

Letters to the editor. Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

Book reviews. Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

Authors correction

Errata

Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.acefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Arial font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript. Maximum extension 30 pages, 5,000 to 8,000 words.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name, first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references, and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or TIF format.

Manuscript Structure

Introduction: there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

Materials and methods: a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

Statistical analysis: indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

Results: these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

Discussion: emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies. The results and the discussion may also be presented in a combined form.

Conclusions: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

References: these citations must be verifiable. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way: last name of the first author and year of publication Pérez (1996). If there are only two authors use both last names Perez and Ribas (1996). If there are more than two authors use only the first last name followed by *et al.*

Reference list: alphabetically and following the examples

Journal article

Last name, A. A., Last name, B. B., Last name, C. C. (Year). Title. Journal name, **volume:** pp-pp.
Example

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, **7:** 33-40.

Book

Last name, A. A. (year). Title, City, Country: Publisher
Example

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). *Fisiología Vegetal*. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Book chapter

Last name, A. A., Last name, B. B. (Year). Chapter title. In A. A. Last name. (Ed.), Book title (pp. xx-xx). City, Country: Publisher.
Example

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. *La enseñanza: Su teoría y su práctica* (148-165). Madrid, España: Akal.

Journal on line

Last name, A. A. (Year). Article title. Journal, **volume** (issue): pp-pp. Available in <http://www...or DOI>
Examples

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Available in: <http://www.jstor.org/pss/2388013>

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

References web pages

Date of the access
Example

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available in <http://www.algaebase.org>., accessed in June 2015.

Tables and graphics: The tables and frames are called tables and carry an Arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column

headings. If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures, or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

Acknowledgments: These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

Considerations

They will be published in the following issue to the announcement of the correction. They are responsibility of the authors. Errata are responsibility of the Journal.

Fabrication of evidence, data omission, duplicity of data or plagiarism will be penalized. The authors and their institutions, research center or university and sponsors will be notified.

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments, and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc.).

Copyright Notice

Declaration of originality and transfer author's rights

The authors declare:

The published data and reference materials have been duly identified with their respective credits and have been included in the bibliographic notes and citations that have been so identified and that should it be required, I have all releases and permissions from any copyrighted material.

All material presented is free from any copyright and that I accept full legal responsibility for any legal claims relating to copyrighted intellectual property, fully exonerating from responsibility the **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

This work is unpublished and will not be sent to any other journal while waiting for the editorial decision of this journal. I declare that there is no conflict of interest in this manuscript.

In case of publication of this article, all author's rights are transferred to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, and so cannot be reproduced in any form without the express permission of it.

By means of this document, if the article is accepted for publication by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, the Revista assumes the right to edit and publish the articles in national and international indices or data bases for academic and scientific use in paper, electronic, CD-ROM, internet form either of the complete text or any other known form known or to be known and non-commercial, respecting the rights of the authors.

Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights of the corresponding article to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, except in the following cases:

The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations, and distribution to some colleagues of reprints of their own published work, if the corresponding credit is given to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables, and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista.

If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce, or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

If the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** were approached for permission by a third party for using, printing, or publishing specifically articles already published, the Revista must obtain the express permission of the author and co-authors of the work or of the employer except for use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work. The **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

No other right, other than the author's right, can be claimed by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

Privacy Statement

The names and e-mail addresses appearing in the journal will be used solely for the purposes explicitly therein expressed and by no means will they be supplied to third parties.

Submission Preparation Checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

1. Letter of submission, where it is stated that all authors have read and approved that:

- The submitted manuscript conforms in content, organization and presentation with established norms.
- The original article has not been previously published in any form nor has it been submitted to another journal nor will it be until an answer is received from the Editorial Committee.
- In the case the manuscript is accepted, it is then authorized to be published under the journal's norms.
- The document may not be published without authorization of all copyrighted texts and figures.
- The document is fully cited in a list of references.

2. Appearance

- The first page written in Word with names and surnames (complete name, first and second surnames separated by a hyphen) of all authors (without job titles or academic titles), affiliations and e-mail address.
- Complete title of the manuscript in Spanish and English. Short title.
- Name of person responsible for correspondence with their complete address, telephone number and electronic address.
- E-mail of all coauthors.
- Text, references and tables in the same file together with legends of the figures. Figures in jpg or TIF format.

3. Structure of the article

The following sections are to be included:

- An abstract should be included in both Spanish and English.
- Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
- Introduction.
- Materials and methods.

- Results and Discussion for short communications.
- Discussion.
- Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
- Declaration of conflict of interest.

4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or TIF format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o TIF format

5. Additional information: Tables

- Tables are included on a separate page and are presented in a simple manner as a Word table
- Tables are ordered sequentially

6. References

Citations must follow the journal ACCEFYN's norms found in the authors' instructions

7. Abbreviations

The first use is introduced in parentheses

8. Nomenclature

- The generic and specific names are written in italics
- Names of micro-organisms, plants and animals are written out completely the first time that they are cited in the title and in the abstract.

9. Ethics and malpractice considerations

- All authors must know and approve of the form, content, authors, and the order of the authors
- An article that has been submitted to the journal ACCEFYN has not be submitted or published in any other journal.
- If the article includes research on human or animals have all authors read and followed the guiding principles of the Declaration of Helsinki and the use of non-human primates in the research?

10. Reviewers

List 3 or 4 possible reviewers with their complete names, academic background and e-mails.

