



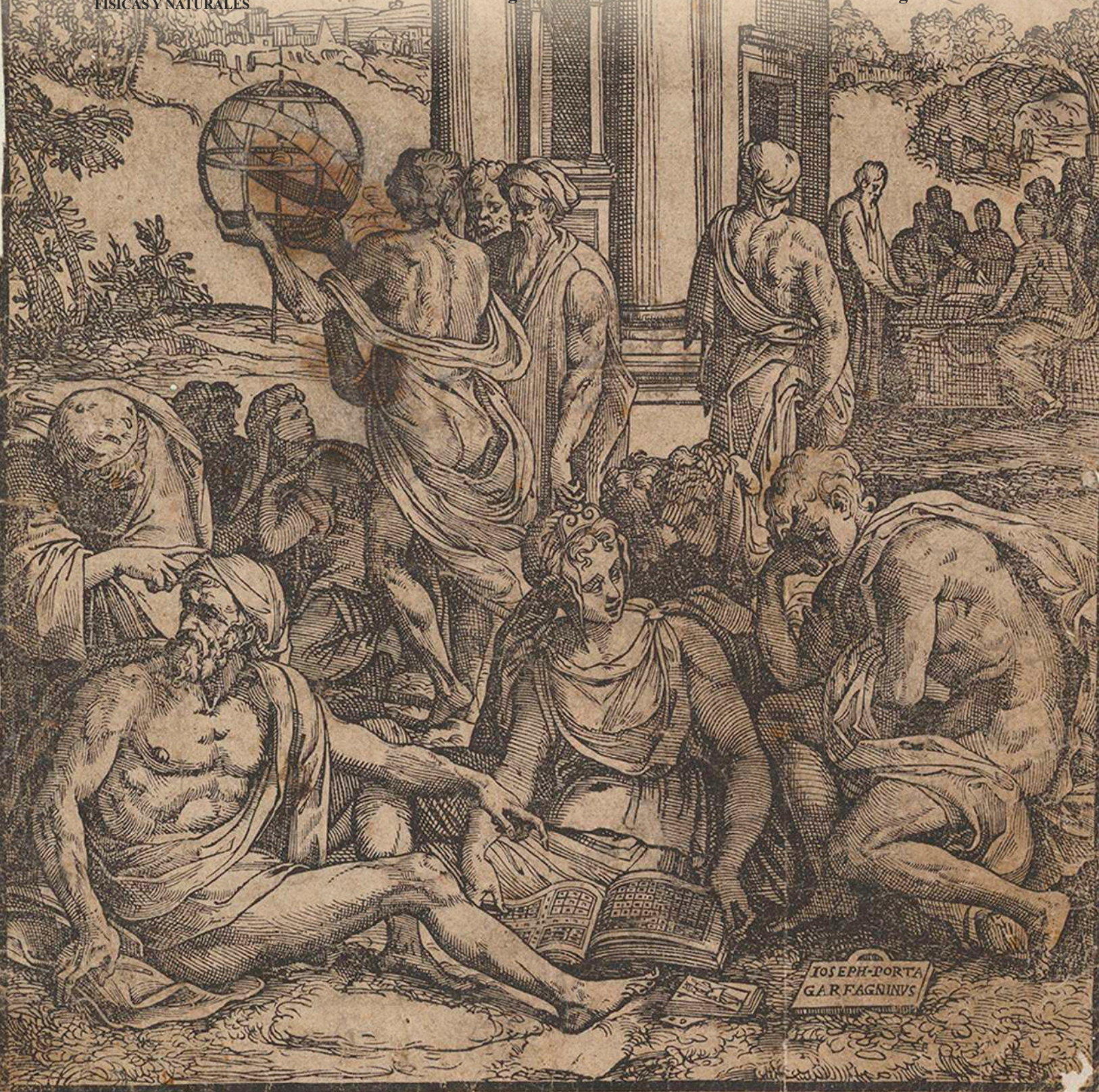
ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

85
Años
1936 - 2021

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

ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

Vol. 45 • Número 177 • Págs. 961- 1304 • Octubre - Diciembre de 2021 • 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. 45 • Número 177 • Págs. 961-1304 • Octubre - Diciembre de 2021 • 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, Colciencias (convocatoria 768 de 2018), categoría B

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. 45 • Número 177 • Págs. 961-1304 • Octubre - Diciembre de 2021 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Editorial	Dilemas éticos en la pandemia Ethical dilemma in the pandemic <i>Roberto Esguerra Gutiérrez</i> 968
Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences	Artículo original Comparación de la distribución de probabilidad en pacientes fallecidos por COVID-19 en tres picos de la pandemia en Colombia Comparison of the probability distributions in Covid-19 deaths in three peaks of the pandemic in Colombia <i>María X. Arias-Barahona, Juan J. Vanegas-Giraldo</i> 971
Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences	Artículo original Psicología evolucionista. Tomando en serio a Darwin Evolutionary psychology. Taking Darwin seriously <i>Rubén Ardila</i> 980
	Artículo original Densidad electrónica en regiones H II gigantes Electron density in giant H II regions <i>Hernando Efraín Caicedo-Ortiz, Hector Osvaldo Castañeda-Fernández</i> 989
Ciencias Físicas Physical Sciences	Artículo original Convergencia estadística en medida para sucesiones triples de funciones con valores difusos Statistical convergence in measure for triple sequences of fuzzy-valued functions <i>Carlos Granados</i> 1011
	Artículo de revisión El reto de reemplazar el cristalino The challenge of replacing the crystalline lens <i>María S. Millán</i> 1022

**Ciencias
Físicas**

Physical Sciences

Original article

Complex system properties in the spreading of COVID-19 pandemic

Propiedades de sistema complejo en la propagación de la pandemia del COVID-19

Carlos Quimbay 1039

Artículo de revisión

Nano-biointerface entre semiconductor y membrana celular: fenómenos fisicoquímicos implicados en la nanotoxicidad y la capacidad antifúngica de las nanopartículas de óxido de cinc

The semiconductor-cell membrane nano-biointerface: Physicochemical phenomena to consider in explaining the nanotoxicity and antifungal capacity of zinc oxide nanoparticles

J. E. Rodríguez-Páez 1053

Original article

Activity patterns of medium and large mammals in two savanna ecosystems in the Colombian Llanos

Patrones de actividad de mamíferos medianos y grandes en dos ecosistemas de sabana de los Llanos colombianos

Dennis Castillo-Figueroa, Daniela Martínez-Medina, Miguel E. Rodríguez-Posada 1071

Artículo original

¿Es el guamo (*Inga densiflora* Benth.) un árbol benéfico como acompañante de plántulas de café con diferentes tipos de fertilización?

Is guamo (*Inga densiflora* Benth.) a beneficial tree as a companion of coffee seedlings under differential fertilization?

Inge Armbrecht, Wilmar Torres, Nicole Vargas-García 1084

Artículo original

Distribución altitudinal de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables ambientales en un sistema fluvial amazónico (Perú)

Altitudinal distribution of aquatic macroinvertebrates and its relation to environmental variables in an Amazon river system (Perú)

Jerry Arana-Maestre, Daniel Álvarez-Tolentino, Rafael Miranda, Ibon Tobes, Julio Araujo-Flores, Carlos Carrasco-Badajoz, Carolina Rayme-Chalco 1097

Artículo original

Caracterización espacio-temporal de la avifauna del cañón de Las Hermosas, Chaparral, Tolima, Colombia

Space-time characterization of the avifauna in Las Hermosas Canyon, Chaparral, Tolima, Colombia

Jessica Nathalia Sánchez-Guzmán, Juan Camilo Váquiro-García, Sergio Losada-Prado 1113

Artículo original

Estructura de tallas, crecimiento y tasa de explotación de *Potamorphina altamazonica* (Characiformes: Curimatidae) en el río Ucayali (Perú)

Length structure, growth, and mortality of *Potamorphina altamazonica* (Characiformes: Curimatidae) in Ucayali River (Perú)

Stive Flores-Gómez, José Riofrío-Quijandría, Lilia Salazar-Ramírez, Javier Zavaleta-Flores 1128

Artículo original

Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en bosques secos tropicales (BST) afectados por fuego y depósitos fluviovolcánicos en el departamento del Tolima, Colombia

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in the tropical dry forest affected by fire and fluviovolcanic deposits in the department of Tolima, Colombia

Laura Daniela Devia-Grimaldo, Urley Adrián Pérez-Moncada, Edwin Orlando López-D, Maryeimy Varón-López 1137

**Ciencias
Naturales**

Natural Sciences

**Ciencias
Naturales**
Natural Sciences

Artículo original

Nuevas propuestas nomenclaturales en Melastomataceae y adiciones de la familia al Catálogo de la Flora de Colombia

New nomenclatural proposals in Melastomataceae and additions to the family in the Catalog of the Flora of Colombia

Humberto Mendoza-Ciuentes, Juan Mauricio Posada-Herrera, Heriberto David 1154

Artículo original

Diversidad de mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) en dos zonas del departamento del Vaupés, Colombia

Diversity of butterflies (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) in two areas of the department of Vaupés, Colombia

Paola Díaz-Urbina, M. Gonzalo Andrade-C., Jesús Manuel Vásquez-Ramos 1175

Ensayo

Consideraciones en torno al primer artículo impreso sobre la geografía de las plantas de Alexander von Humboldt, publicado en La Habana en mayo de 1804

Considerations on the first printed article on the geography of plants by Alexander von Humboldt, published in Havana in May 1804

Alberto Gómez-Gutiérrez 1192

Artículo original

Propuesta metodológica para abordar la restauración ecológica participativa en humedales de Bogotá D.C., Colombia

Methodological proposal to address participatory ecological restoration in wetlands of Bogotá DC (Colombia)

Lorena Cortés-Ballén, Juliana Zuluaga-Carrero, Clara Morales-Rozo 1205

Brief communication

Confirmation of *Homoeoneuria* Eaton, 1881 (Ephemeroptera: Oligoneuriidae) record in Colombia

Confirmación del registro de *Homoeoneuria* Eaton, 1881 (Ephemeroptera: Oligoneuriidae) en Colombia

Laura L. Garzón-Salamanca, Dennis Castillo-Figueroa, Hernán Aristizábal-García 1219

Artículo original

Estudios electrónicos y electroquímicos del 2,2-bis[5'-(2'-carbonilfuranil)]propano

Electronic and electrochemical studies of 2,2-bis[5'-(2'-carbonylfuranyl)]propane

Esperanza Galarza 1224

Original article

Using a warm dioxane/MeOH/NaBH₄ mixture as convenient medium for the selective chemical reduction of the C=C double bond in α,β -unsaturated systems

Uso de una mezcla dioxane/MeOH/NaBH₄ en caliente como un medio conveniente para la reducción química selectiva del doble enlace C=C en sistemas α,β -insaturados

Rodrigo Abonia, Andres C. García 1232

Artículo original

Evaluación de un método rápido para determinar los requerimientos de cal en suelos de la zona cafetera colombiana

Evaluation of a rapid method to determine lime requirements in acid soils of the Colombian coffee zone

Vanessa Catalina Díaz-Poveda, Siavosh Sadeghian 1246

**Ciencias
Químicas**
Chemical Sciences

**Ciencias
de la Tierra**
Earth Sciences

Original article

Learning complex functions with GeoGebra

Aprendiendo funciones complejas con GeoGebra

Ana Maria D'Azevedo Breda, José Manuel Dos Santos Dos Santos 1262

Comentario bibliográfico

Bibliographic commentary 1277

Agradecimientos

Acknowledgements 1280

Índice autores

Authors Index 1281

Índice de artículos

Article Index 1283

Enfoque y alcance

Focus and Scope 1292

Dilemas éticos en la pandemia

Los dilemas éticos en la pandemia de la COVID-19 (enfermedad causada por el coronavirus SARS-CoV-2) han sido múltiples, abarcan prácticamente todos los tópicos y se inician desde el origen mismo de la pandemia. Se han barajado muchas hipótesis sobre el comienzo y el origen de la COVID-19, pues el tema no es menor ya que se trata de un virus que hasta el momento ha cobrado la vida de más de cinco millones de personas. Desde su probable origen en animales, entre ellos los murciélagos, se han mencionado muchas otras posibilidades que incluyen un virus producido en el laboratorio y que eventualmente pudo salir de allí por accidente, hasta otras hipótesis que generarían un dilema ético mayor. Es probable que nunca llegamos a establecer con certeza absoluta que fue lo que pasó, por lo que el debate ético sobre este tema es más que todo un ejercicio teórico, que no sobra.

Superado este punto sigue el debate sobre si el anuncio del comienzo se demoró, lo que habría impedido tomar medidas tempranas que eventualmente hubieran permitido contener el brote. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recibió el primer informe oficial el 31 de diciembre de 2019. Investigaciones posteriores demostraron que la agencia china identificó 179 casos en la provincia de Wuhan en diciembre de 2019 y una revisión de 76.253 registros de enfermedades respiratorias ocurridas en los dos meses previos no identificó casos adicionales que pudieran ser ocasionados por la COVID-19.

Con esos datos se puede concluir que no existieron demoras importantes cuestionables éticamente, la OMS una vez recibió la notificación actuó también con rapidez, tomando medidas que se inician el 9 de enero de 2020 con el anuncio de la existencia de una nueva enfermedad en China, la declaratoria de emergencia de salud pública global el 31 de enero y culminan con la declaratoria de la pandemia el 11 de marzo de 2020. Por su parte el virus fue rápidamente identificado y codificado en China y compartida la información en enero de 2020, lo que abrió el camino para la elaboración de vacunas.

Una vez iniciada la pandemia y en el afán por contener su rápida expansión la medida empleada por la mayoría de las naciones fue la de las cuarentenas estrictas. Sin la menor duda, esta medida buscaba un fin bueno, pero tuvo consecuencias económicas y sociales devastadoras, especialmente para las gentes de menores recursos, profundizando las inequidades preexistentes, efecto que no pudo ser evitado a pesar del enorme esfuerzo realizado por los gobiernos al otorgar subsidios económicos extraordinarios a la población más vulnerable.

Mirando hacia atrás es válido preguntarse si la forma en que se implementaron inicialmente las cuarentenas con la prohibición hasta de salir a la calle, fue exagerada y eventualmente pudieran haberse logrado resultados similares con cuarentenas focalizadas, distanciamiento social y evitando las concentraciones de gente. En este dilema vale la pena profundizar, para que tengamos elementos que nos permitan actuar de la mejor manera en próximas ocasiones. Me aventuro a pronosticar que la población mundial difícilmente acatará nuevas cuarentenas estrictas generales.

Ante la situación que planteaba la enfermedad fue evidente la necesidad de contar con tratamientos y vacunas que permitieran enfrentarla efectivamente. Fuimos testigos de toda clase de tratamientos propuestos con los más variados medicamentos, algunos productos de observaciones casuales, otros de resultados en pequeños grupos de pacientes, la gran mayoría sin la rigidez científica necesaria. La OMS y la Organización Panamericana de la salud OPS desarrollaron siete criterios que se deberían cumplir para el uso de medicamentos e intervenciones en esta emergencia: 1. No existe ningún tratamiento de eficacia

comprobada. 2. No es posible iniciar ensayos clínicos inmediatamente. 3. Se dispone de datos que proporcionan un apoyo preliminar de la eficacia y la seguridad de la intervención, al menos de estudios de laboratorio o en animales, y el uso de la intervención fuera de ensayos clínicos ha sido sugerido por un Comité Científico asesor debidamente calificado, sobre la base de un análisis favorable de los riesgos y beneficios. 4. Las autoridades competentes del país y un comité de ética debidamente calificado han aprobado dicho uso. 5. Se dispone de recursos adecuados para garantizar que los riesgos puedan minimizarse. 6. Se obtiene el consentimiento informado del paciente. 7. Se monitorea el uso de emergencia de la intervención y los resultados se documentan y se comparten oportunamente con la comunidad médica y la comunidad científica. Desafortunadamente muchos ensayos no se acogieron a este marco ético, especialmente en los comienzos de la pandemia.

Análisis aparte merece el tema de las vacunas, pues en tiempo récord se desarrollaron cerca de 200 posibles vacunas, muy rápido las autoridades sanitarias autorizaron ensayos clínicos de emergencia para varias de ellas y progresivamente han autorizado el uso de emergencia de unas pocas, en base a los resultados de los ensayos clínicos. Pero este, que es uno de los logros importantes de la ciencia, no ha estado exento de cuestionamientos éticos, especialmente relacionados con la protección de los sujetos de investigación y de la población general. El proceso usual para el desarrollo de una vacuna puede tardar de 10 y hasta 15 años desde la fase exploratoria inicial, hasta tener lista su fabricación masiva luego del proceso de aprobación. En contraste las primeras vacunas para COVID-19 se lograron en cerca de doce meses, con la suma de muchos esfuerzos, que incluyeron autorización para fusionar Fase 1 y Fase2, reducción del número de individuos requeridos en cada fase y abreviación de tiempos de aprobación, entre otros.

Afortunadamente luego de cerca de 7.500 millones de dosis aplicadas en 184 países, se puede decir con absoluta certeza que las vacunas aprobadas hasta ahora son seguras y efectivas. Desafortunadamente, otra es la historia con la infinidad de medicamentos que se probaron para la COVID-19 de manera mucho menos rigurosa que en el caso de las vacunas, en que casi todos resultaron totalmente ineficaces. La conclusión obvia es que las medidas éticas que buscan proteger a los sujetos de investigación y a la población general se justifican plenamente.

Superada la etapa de contención, cuando el número de enfermos graves que requirieron soporte ventilatorio en unidades de cuidado intensivo, en los diferentes picos que ha tenido esta pandemia, la disponibilidad de recursos frente a la demanda, planteo el dilema sobre la asignación justa de los recursos disponibles. Sobre este punto inicialmente se propusieron diferentes métodos: asignar por el orden de llegada, de manera que quien primero llega primero se atiende, hasta agotar la disponibilidad, privilegiando a los más jóvenes, desechando a los viejos y a quienes tuvieran discapacidades o enfermedades avanzadas o terminales, mediante sorteos, etc. Muy temprano las principales autoridades bioéticas fijaron su posición en este punto con una gran coincidencia entre todas ellas. Los recursos deben asignarse en primera instancia, a quienes tienen mejores posibilidades de superar el episodio actual, sin tener en cuenta otras consideraciones. Para ello se recomendó que los hospitales crearan comités para realizar dicha asignación, constituidos por personal diferente al encargado de la atención directa de los pacientes. Si luego de ello persistía una demanda que superaba los recursos disponibles, se podrían utilizar criterios adicionales, como los propuestos inicialmente, siempre y cuando las reglas que se aplicarían estuvieran claras para todos.

También el principio de justicia se invocó para garantizar el acceso a los servicios de las personas mas vulnerables y mas pobres. Desde muy temprano se comenzó a observar que las poblaciones mas pobres y los grupos marginados tenían las tasas mas altas de enfermedad y muerte. Varios estudios muestran que la mortalidad puede ser el doble en los estratos mas pobres con relación a los estratos mas altos. En Estados Unidos la pandemia afectó más a los negros, latinos e indígenas que a la población blanca, que se manifiesta por un índice de hospitalización ajustado por edad entre 4 y 5 veces mas alto.

En el caso de las vacunas, en noviembre de 2021 en la mayoría de los países del primer mundo se han aplicado más de 150 dosis por 100 habitantes, mientras que varios países africanos tienen menos de 2 dosis por cada 100 personas y el promedio de esa región apenas es de 10 dosis por 100 personas. Los esfuerzos que se han realizado para una distribución más justa de las vacunas, como el mecanismo COVAX liderado por la OMS, claramente ha sido insuficiente. Cabe preguntarse si ante una situación tan grave para la humanidad no hubieran debido levantarse las patentes de las vacunas para permitir su producción masiva a muy bajos costos para proteger a toda la población.

En las últimas semanas se han anunciado dos medicamentos que parecen tener una eficacia alta para reducir los casos severos o desenlaces fatales, cuando se administran tempranamente. Se trata de Molnupiravir® de la compañía Merck y más recientemente el Paxlovid® de Pfizer. Ambos son orales y para tratamiento ambulatorio. Ambas compañías han anunciado que lo venderán a precios muy bajos para naciones pobres, Merck en 105 y Pfizer en 95 países. Sin duda es un paso importante, que contrasta con lo ocurrido con las vacunas, pero ¿es suficiente?

Las más recientes discusiones éticas giran en torno a la obligatoriedad de la vacunación. Demostrada la efectividad y la seguridad de las vacunas se comenzó a plantear la posibilidad de su obligatoriedad, inicialmente en algunos grupos como los trabajadores de la salud, especialmente quienes atienden directamente pacientes en los hospitales. Algunos han pensado que se debe ir más allá y que la vacunación debe ser obligatoria para toda la población, como sucede hace años con muchas vacunas. Recientemente Austria optó por ordenar la cuarentena obligatoria para los no vacunados, en un esfuerzo por promover la vacunación. Sin embargo, ha surgido en el mundo entero una fuerte oposición a estas medidas impositivas, alegando que vulneran las libertades individuales. Este movimiento que privilegia las libertades individuales sobre el interés colectivo nos coloca ante una discusión ética de gran importancia para la salud pública, ya que desde esta mirada se llega a posiciones tan radicales que afirman que la libertad individual es un bien superior a cualquier otro. Este debate ético apenas comienza y tendrá consecuencias sociales y políticas, que afectarán necesariamente las decisiones en salud, tanto las relacionadas con la COVID-19, como otras muchas.

Este repaso probablemente deja algunos de los dilemas éticos sin mencionar, pero demuestra que esta pandemia ha puesto en evidencia muchas falencias de nuestros sistemas de salud, ha profundizado inequidades y ha invitado a una reflexión ética profunda. Simultáneamente, es justo resaltar el éxito que significa haber desarrollado por primera vez en la historia vacunas efectivas en un tiempo tan corto, producto de diversas tecnologías, como también lo es reconocer el formidable esfuerzo, sacrificio y entrega del personal de salud en todo el mundo.

Roberto Esguerra Gutiérrez

Médico, especialista en Medicina Interna y Medicina Nuclear

Master del American College of Physicians

Profesor Clínico Titular de Ética Médica en la Universidad de los Andes

Artículo original

Comparación de la distribución de probabilidad en pacientes fallecidos por COVID-19 en tres picos de la pandemia en Colombia

Comparison of the probability distributions in Covid-19 deaths in three peaks of the pandemic in Colombia

✉ **María X. Arias-Barahona**^{1,*}, ✉ **Juan J. Vanegas-Giraldo**

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia

²Programa de Física, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Resumen

En este trabajo se muestra una comparación de las distribuciones de probabilidad para los casos confirmados por Covid-19 en los departamentos de Colombia para los tres intervalos de tiempo donde se presenta un mayor número de contagios (picos). Lo anterior se realizó a partir del análisis estadístico de las bases de datos reportadas por el Instituto Nacional de Salud en Colombia. Se encuentra que la probabilidad de fallecer ha aumentado en más del 8 % en el último pico para los colombianos entre los 20 y 69 años de edad, siendo los departamentos con mayor aumento en el porcentaje de estos decesos: Amazonas, Antioquia, Caquetá, Cauca, Córdoba y Putumayo.

Palabras clave: Covid-19 en Colombia; Distribución de Probabilidad; Letalidad; Pandemia; Procesos Gaussianos.

Abstract

This work shows a comparison between the probability distributions for the cases confirmed by Covid-19 in the departments of Colombia for the three time intervals where there is a greater number of infections (peaks). This was done from the statistical analysis of the databases reported by the National Institute of Health in Colombia. It is found that the probability of dying has increased by more than 8 % in the last peak for Colombians between 20 and 69 years of age, being the departments with the highest increase in the percentage of these deaths: Amazonas, Antioquia, Caquetá, Cauca, Córdoba and Putumayo.

Keywords: Covid-19 in Colombia; Probability Distribution; Lethality; Pandemic; Gaussian Process.

Introducción

La Covid-19 es una enfermedad viral respiratoria (**Cruz, Santos, Cervantes, y Juárez, 2020**) causada por el nuevo coronavirus SARS-CoV-2 (**Phan, 2020**), este nuevo brote se notificó por primera vez en Wuhan (China) el 12 de diciembre del 2019 (**Lu y cols, 2020**). Desde entonces se han notificado decenas de miles de casos y el brote se ha extendido a nivel mundial (**Bwire y Paulo, 2020; Lai, Shih, Ko, Tang, y Hsueh, 2020**), por lo cual la Organización Mundial de la Salud (OMS) la declaró como pandemia (**Mahase, 2020**).

El 6 de marzo del 2020 Colombia confirmó su primer caso de la enfermedad por Covid-19 y hasta la fecha se han confirmado más de 3 millones de casos positivos y más de 80 mil decesos. A lo largo de la actual pandemia de Covid-19, los gobiernos han recopilado amplias bases de datos con información sobre las personas infectadas. Los datos sobre casos positivos y muertes en Colombia son reportados por el Instituto Nacional de Salud (INS) (**Casos positivos de COVID-19 en Colombia — Datos Abiertos Colombia, s.f.**) que son relevantes para rastrear la evolución de la infección en el país.

Citación: Arias-Barahona MX, Vanegas-Giraldo JJ. Comparación de la distribución de probabilidad en pacientes fallecidos por COVID-19 en tres picos de la pandemia en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):971-979, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1474>

Editor: Alberto Gómez-Gutierrez

***Correspondencia:**

Juan Vanegas-Giraldo;
jjvanegas@uniquindio.edu.co

Recibido: 17 de mayo de 2021

Aceptado: 6 de noviembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

A partir de estos datos se pueden visualizar cualitativamente 3 intervalos de tiempo en donde las cifras de casos positivos de Covid-19 en Colombia han alcanzado sus máximos relativos, más conocidos como picos. Es allí donde el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia (Minsalud) ha evidenciado que la población de edades más afectada y con mayor probabilidad de muerte a lo largo de la pandemia son las personas mayores a 60 años (*Minsalud- información del Coronavirus COVID-19*, s.f.; *Ministerio de Salud y Protección Social*, s.f.). Por lo tanto, se pretende encontrar si existe una variación en las distribuciones de probabilidad de fallecimientos en los 3 picos de la pandemia en Colombia y verificar si se encuentra una variación de riesgo de muerte por edad hasta la fecha. Lo anterior, a partir del análisis estadístico de las bases de datos reportadas por el INS por medio del lenguaje de programación interpretado *Python*, usando las librerías *Pandas*, *Numpy*, *Scipy*, *Matplotlib* y *Seaborn* (**Dey, Rahman, Siddiqi, y Howlader**, 2020) obteniendo las distribuciones de probabilidad de muertes y contagios por departamento en relación a la edad.

El presente trabajo se desarrolla de la siguiente manera: en la metodología se encuentra la descripción de los datos utilizados y los criterios de selección llevados a cabo para el análisis correspondiente de probabilidades a estudiar. Posteriormente se encuentran los resultados obtenidos a partir de las comparaciones y análisis realizados por medio de distribuciones de probabilidad y finalmente se encuentran las conclusiones más relevantes encontradas en el estudio.

Metodología

Datos

El conjunto de datos para el análisis realizado se obtuvo de los reportes publicados por el INS (*Casos positivos de COVID-19 en Colombia — Datos Abiertos Colombia*, s.f.), los cuales se actualizan todos los días y dan a conocer los casos positivos de Covid-19 en Colombia (ver **figura 1**). La base de datos proporcionada contiene los siguientes campos: la fecha de reporte web del caso, la fecha de notificación, ID del caso, departamento, municipio, edad, sexo, tipo de contagio, estado actual del paciente (recuperado o fallecido), fecha de inicio de síntomas, fecha de muerte, fecha de diagnóstico y fecha de recuperación. El trabajo centró la atención en el número de casos positivos por departamento y la cantidad de personas fallecidas por edad, reportadas desde el 6 de marzo del 2020, día en el que se presenta el primer contagiado, hasta el 8 de mayo del 2021. Cabe resaltar que al conjunto de datos se le aplicaron diferentes métodos de exploración y análisis estadístico, haciendo uso del lenguaje de programación interpretado *Python*, particularmente de las librerías *Pandas*, *Numpy*, *Scipy*, *Matplotlib* y *Seaborn* (**Dey y cols.**, 2020)

Selección de fechas por picos

Hasta el momento se pueden evidenciar cualitativamente tres picos en el número de casos positivos en Colombia, como se muestra en la **figura 1**, sin embargo, es preciso obtener el rango de tiempo específico de estos picos a partir de métodos analíticos; por tal motivo, se encontró una función que se ajustara a los datos reportados a partir de un modelo de regresión de procesos Gaussianos (GPR), utilizando la función *gaussian filter1d* de la librería *Python: SciPy*, la cual permite tener una precisión mayor en la selección de rangos de fechas a estudiar por pico y facilita la visualización de los mismos (**García Chilan y Viteri Paredes**, 2010). Una vez obtenida la función de ajuste (línea azul continua en la **figura 1**) se obtuvieron las fechas de inicio y fin de los picos así:

- **Fecha inicial:** Se hallaron los puntos de inflexión de la función obtenida por el modelo GPR a partir de su segunda derivada. Estos puntos son los valores para los cuales la función cambia de concavidad, particularmente, se interesó únicamente por las concavidades que presentan puntos máximos relativos (**Gu, Zhu, Sun, Zhou, y Gu**, 2020). Los tres puntos de inflexión obtenidos corresponden a las fechas: 9 de julio del 2020, 12 de octubre del 2020 y 21 de marzo del 2021, fechas que determinarán el inicio de cada pico para este trabajo.

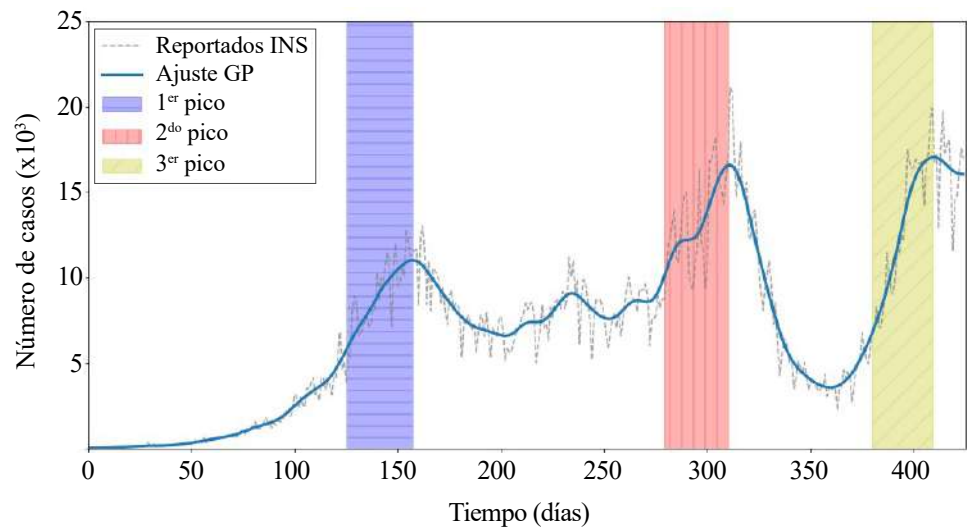


Figura 1. Línea gris punteada muestra el número de casos positivos por día de Covid-19 desde el 6 de marzo del 2020 hasta el 8 de mayo del 2021. La línea azul continua muestra la función obtenida a partir de procesos Gaussianos de los casos positivos reportados. La región azul con líneas horizontales representa el conjunto de casos positivos de Covid-19 en el intervalo de tiempo del primer pico. Región roja con líneas verticales representa el conjunto de casos positivos de Covid-19 en el intervalo de tiempo del segundo pico. Región amarilla con líneas diagonales representa el conjunto de casos positivos de Covid-19 en el intervalo de tiempo del tercer pico.

- **Fecha final:** Se toma nuevamente la función obtenida por el modelo GPR y se aplica el criterio de la primera derivada, con el fin de obtener los puntos máximos relativos que pueden existir (Peng, Yang, Zhang, Zhuge, y Hong, 2020). De esta manera se identificaron las fechas donde cada uno de los picos ha alcanzado el máximo de casos positivos, las cuales son: 10 de agosto del 2020, 1 de enero del 2021 y 19 de abril del 2021.

De esta manera, los picos de la pandemia para este trabajo fueron definidos como: **Primer pico** (comprendido entre el 9 de julio del 2020 hasta el 10 de agosto del 2020, está demarcado por una región azul y líneas horizontales en la **figura 1**), **segundo Pico** (comprendido entre el 12 de octubre del 2020 hasta el 1 de enero del 2021, está demarcado por una región roja y líneas verticales en la **figura 1**), **tercer Pico** (comprendido entre el 21 de marzo del 2021 hasta el 19 de abril del 2021, representado por la región de color amarillo y líneas diagonales en la **figura 1**).

Distribución de probabilidad

Una vez definidos los intervalos de tiempo para los tres picos de la pandemia en Colombia, se obtuvieron las distribuciones de probabilidad del número de casos positivos en cada uno de dichos picos, en función de las edades de los pacientes contagiados. Estas distribuciones permiten conocer la probabilidad de casos positivos dentro de un rango de edades definido, lo anterior, a partir de la integral de la función de distribución obtenida en un intervalo finito, o en otras palabras, el valor del área bajo la curva de la función de distribución en este mismo intervalo. Para obtener dicha función de distribución se utilizó la función *distplot*, la cual combina la función *hist* de la librería *Python: Matplotlib* con las funciones *kdeplot* y *rugplot* de la librería *Python: Seaborn* (Waskom, 2021) (Irvine y Hollingsworth, 2018). Dicha función *distplot* genera un histograma a partir de los datos reportados por el INS, y es a éstos a los que les calcula la distribución de probabilidad a partir de la estimación de la densidad Kernel, también conocido como KDE por sus siglas en inglés (Terrell y Scott, 1992). En la **figura 2** se puede ver el resultado de la aplicación de la función *distplot*, cuyos

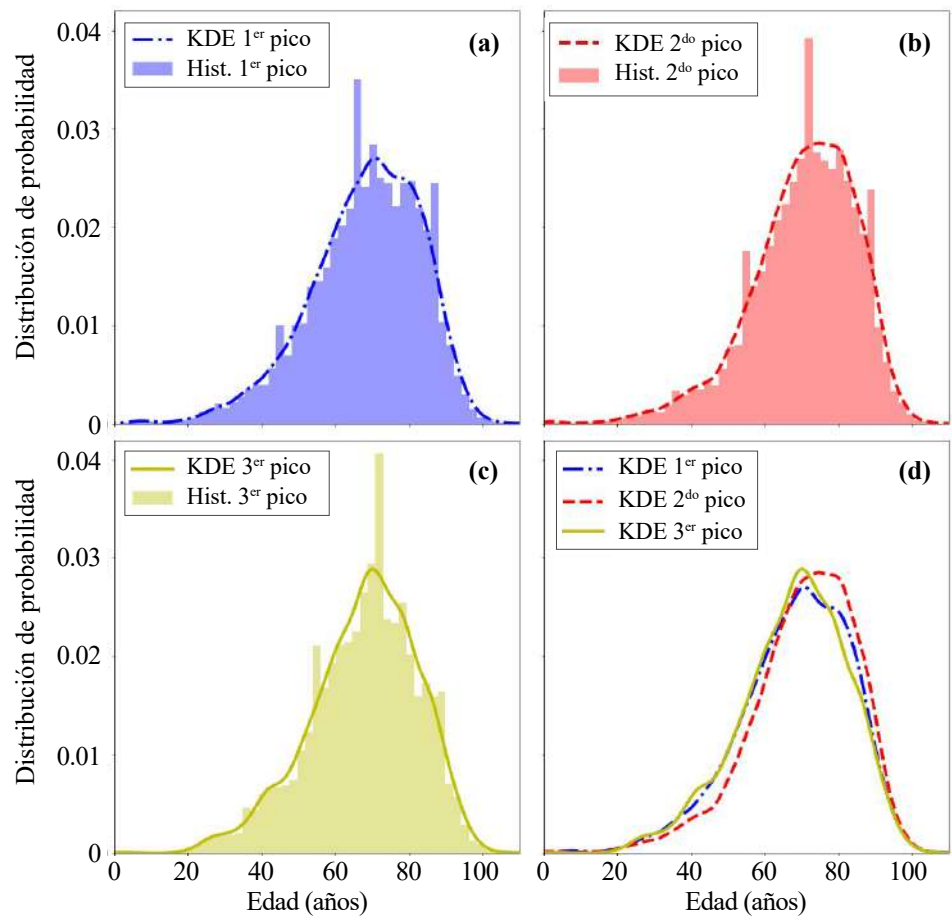


Figura 2. a). Histograma y distribución de probabilidad a partir de la KDE para los pacientes fallecidos por Covid-19 en función de sus edades en el primer pico de la pandemia en Colombia. b). Histograma y distribución de probabilidad a partir de la KDE para los pacientes fallecidos por Covid-19 en función de sus edades en el segundo pico de la pandemia en Colombia. c). Histograma y distribución de probabilidad a partir de la KDE para los pacientes fallecidos por Covid-19 en función de sus edades en el tercer pico de la pandemia en Colombia. d). Comparación de las distribuciones de probabilidad de fallecidos por Covid-19 obtenidas a partir de la KDE para los tres picos de la pandemia en Colombia.

valores de entrada son el número de fallecidos por Covid-19 en función de las edades, para los tres diferentes picos de la pandemia en Colombia. En esta figura se puede identificar cómo varía la función de distribución obtenida a partir de la KDE para los tres diferentes picos en relación al histograma respectivo.

Letalidad

La letalidad es una medida de la gravedad de una enfermedad estimada desde el punto de vista poblacional, y se precisa como la proporción de casos de una enfermedad que surgen mortales con respecto al total de casos en un periodo determinado (Gómez-Gómez, Danglot-Banck, y Velásquez-Jones, 2001), (Pinzón, 2020), (Moreno-Altamirano, 2007) y se deduce de la siguiente manera :

$$Letalidad(\%) = \frac{M}{C} \times 100, \tag{1}$$

donde *M* representa el número de muertes por una enfermedad en un periodo determinado y *C* el número de casos diagnosticados de la misma enfermedad en el mismo periodo.

Resultados y Discusión

El número de casos positivos por día en Colombia, desde 6 de marzo del 2020 (día cero) hasta el 8 de mayo del 2021 (día 428), se pueden ver en la **figura 1**. Asimismo, se muestran con regiones sombreadas los intervalos de tiempo en los que se presentan los diferentes picos de la pandemia en este país. Como se mencionó en la metodología, dichos intervalos fueron obtenidos a partir del análisis de la función de ajuste por modelo GPR aplicado a los datos reportados por el INS. Las distribuciones de probabilidad en los tres picos tienen un comportamiento con ligeras diferencias para cada grupo de edad de estudio (ver **tabla 1**), manteniéndose como grupo con mayor porcentaje de casos positivos, independiente del pico, el de los colombianos entre 30 - 39 años edad, por otro lado, se tiene como grupo con menor porcentaje el de los colombianos entre 90 - 99 años de edad. Lo anterior está mostrando cómo la edad productiva y social está relacionada directamente con el porcentaje de casos positivos (**Goldstein, Lipsitch, y Cevik, 2020**)(**Monod y cols., 2021**), en donde los colombianos con edades entre los 20 y 60 años corresponden al 65 % de los casos confirmados para Covid-19.

En la **figura 2**-(a,b,c) se pueden ver los histogramas para los casos de los pacientes fallecidos por Covid-19 reportados por el INS en los tres diferentes picos, adicionalmente, se presentan sus respectivas distribuciones de probabilidad, mostrando cómo los pacientes con edades mayores a los 60 años manifiestan una mayor probabilidad de fallecer dentro del grupo total de fallecidos. Particularmente, en la figura 2d se observa la comparación de las tres distribuciones de probabilidad correspondientes a cada pico, en donde se puede evidenciar cómo se tienen mayores probabilidades de fallecer en personas con edades entre los 20 y los 69 años en el primer y tercer pico, comparadas con las pertenecientes al segundo pico. Asimismo, Se puede notar un corrimiento hacia edades menores en el máximo de la distribución del tercer pico, dejando un indicio de que la población con mayor riesgo pueden empezar a ser colombianos menores a los 70 años, estando en contraposición con lo que se presenta en el primer y segundo pico en Colombia y en otros países de Lationamérica (**Undurraga, Chowell, y Mizumoto, 2021**).

Las probabilidades de fallecer por Covid-19 para diferentes grupos de edades en los tres picos de la pandemia se presentan en la **tabla 2**, allí se evidencia con mayor precisión, cómo los colombianos entre los 20 y 69 años de edad fallecidos por Covid-19 en el primer y tercer pico presentan un mayor porcentaje dentro de esta distribución, en comparación con los colombianos en este mismo rango de edades pertenecientes al segundo pico. Cabe resaltar, como lo mencionan Rosselli (**Rosselli, 2020**) y Mathwe (**Mathew, 2020**), que los

Tabla 1. Distribución de probabilidad de casos positivos (DPC) por Covid-19 para diferentes grupos de edades en Colombia reportados por el INS en los tres diferentes picos de la pandemia.

Edad (años)	DPC (%)		
	1 ^{er} Pico	2 ^{do} Pico	3 ^{er} Pico
0-9	3.215	2.444	2.838
10-19	5.813	6.04	6.884
20-29	19.092	19.925	17.4
30-39	22.028	20.712	19.434
40-49	15.363	14.784	15.047
50-59	11.592	12.356	13.119
60-69	6.712	7.672	8.826
70-79	3.804	4.081	4.213
80-89	1.781	1.919	1.725
90-99	0.359	0.408	0.344

fallecidos dentro de los primeros días no solo son consecuencias fatales del virus, sino parte de la inexperiencia mundial frente al nuevo virus, centrando la atención en las dinámicas de las probabilidades entre el segundo y tercer pico, pues es allí donde se conocen los protocolos para tratar al virus de manera más homogénea. Es importante evidenciar que no se está obteniendo una redistribución de probabilidad debido a una disminución de muertes en un grupo específico, por el contrario, se presentan aumentos en las tasas de letalidad de los colombianos mayores a 20 años (ver **tabla 3**).

En la **tabla 4** se compararon las distribuciones de probabilidad entre el segundo y tercer pico en cada departamento (distrito) de Colombia para tres grupos de edades (**Primer grupo**: personas entre los 20 y 44 años de edad, **segundo grupo**: personas entre los 45 y 69 años de edad y **tercer grupo**: personas entre los 70 y 100 años de edad). Se puede notar que los únicos departamentos que presentan disminución en las probabilidades entre el segundo y tercer pico para el primer grupo de edades son: Huila, Norte de Santander, Cauca, Cesar,

Tabla 2. Distribución de probabilidad de fallecer (DPF) por Covid-19 para diferentes grupos de edades en Colombia reportados por el INS en los tres diferentes picos de la pandemia.

DPF (%)			
Edad (años)	1 ^{er} Pico	2 ^{do} Pico	3 ^{er} Pico
0-9	0.139	0.1	0.036
10-19	0.163	0.129	0.057
20-29	0.977	0.754	1.061
30-39	2.741	1.916	2.805
40-49	5.988	4.017	6.508
50-59	13.046	10.354	13.507
60-69	21.13	20.291	21.948
70-79	23.295	25.138	24.076
80-89	17.843	21.728	14.644
90-99	4.356	5.898	4.472

Tabla 3. Letalidad para diferentes grupos de edades en Colombia para el segundo y tercer pico. La tabla muestra la cantidad de muertos por cada mil contagiados de ese grupo de edad.

Letalidad (%)		
Edad (años)	2 ^{do} Pico	3 ^{er} Pico
0-9	0.1	0.038
10-19	0.045	0.013
20-29	0.09	0.171
30-39	0.212	0.37
40-49	0.631	1.206
50-59	1.923	2.836
60-69	6.096	7.18
70-79	14.483	16.221
80-89	24.798	25.854
90-99	32.644	33.471
0-100	2.298	2.779

Tabla 4. Distribuciones de probabilidad de pacientes fallecidos por Covid-19 en diferentes departamentos (distritos) de Colombia para el segundo y tercer pico. La comparación también se hace entre grupos de edades. Las celdas de color amarillo representan los porcentajes que aumentaron entre el 1 % y el 5 % del segundo al tercer pico. Las celdas de color naranja representan los porcentajes que aumentaron más del 5 % en el tercer pico.

Departamento	Distribución de probabilidad %					
	20 - 44 (años)		45 - 69 (años)		70 - 100 (años)	
	2 ^{do} Pico	3 ^{er} Pico	2 ^{do} Pico	3 ^{er} Pico	2 ^{do} Pico	3 ^{er} Pico
Bogotá	4.031	5.849	34.799	38.848	56.777	51.31
Valle	3.821	5.878	33.514	34.383	60.432	55.379
Antioquia	3.84	7.066	32.034	42.889	61.529	46.174
Cartagena	3.956	10.238	36.666	44.412	55.15	41.206
Huila	7.437	1.406	38.864	38.779	49.735	56.369
Meta	5.471	11.009	42.732	43.984	48.006	40.534
Risaralda	3.762	5.497	33.977	31.745	57.959	58.427
Norte Santander	7.368	3.586	46.453	37.467	43.084	55.011
Caldas	2.973	7.075	30.919	36.009	62.297	51.423
Cundinamarca	5.242	7.965	35.0	40.898	56.485	47.34
Barranquilla	4.142	7.853	36.716	42.693	53.856	45.373
Santander	4.565	6.895	37.379	38.447	54.351	48.527
Quindío	3.457	3.907	31.847	36.107	60.732	54.922
Tolima	4.582	6.51	32.767	39.728	58.57	47.192
Cauca	4.855	0.25	25.58	40.133	65.653	56.238
Sta Marta D.e.	6.273	10.1	44.645	45.67	45.066	40.264
Cesar	8.647	7.835	38.038	46.77	49.19	41.173
Casanare	8.309	16.243	49.663	47.732	37.932	32.278
Nariño	5.975	6.005	35.029	41.926	54.587	47.513
Atlántico	7.118	7.497	37.075	46.586	51.006	42.155
Boyacá	5.197	7.019	34.175	29.114	56.121	57.629
Córdoba	10.069	5.817	28.952	41.012	54.08	46.85
Bolívar	6.866	7.494	27.943	32.552	59.433	52.077
Sucre	5.402	5.653	37.569	31.369	51.902	57.937
Magdalena	5.459	10.525	40.566	43.975	49.851	42.092
Guajira	9.079	14.13	37.151	46.132	48.725	34.512
Chocó	11.372	5.026	41.908	43.032	42.576	46.758
Amazonas	35.948	16.657	39.842	54.758	19.084	24.061
Caquetá	6.258	2.053	40.422	51.073	48.412	42.522
Putumayo	7.626	23.321	39.991	37.503	49.385	27.781
Arauca	4.316	3.08	38.383	43.933	54.131	48.834

Córdoba, Chocó, Amazonas, Caquetá y Arauca, por el contrario, departamentos (distritos) como: Cartagena, Meta, Casanare, Magdalena, Guajira y Putumayo presentan aumentos de más del 5 % en el porcentaje de fallecidos por Covid-19 en este grupo de edades; el caso más crítico está en el departamento de Putumayo, el cuál presenta un aumento de más del 15 %. Las distribuciones de probabilidad para el segundo grupo de edades presenta una situación un poco más crítica, ya que más del 45 % de los departamentos (distritos) presentan aumentos en sus probabilidades de más del 5 %, alertando a estos departamentos a tomar medidas que prevengan estos porcentajes en edades de 45 a 69

años. Los casos con un aumento mayor al 10 % en la probabilidad de pacientes fallecidos para el segundo grupo son: Antioquia, Cauca, Córdoba, Amazonas y Caquetá. Por último, se puede evidenciar que para el tercer grupo de edades son pocos los departamentos que presentan aumento entre el segundo y tercer pico, siendo los más afectados: Huila, Norte de Santander y Sucre.

Conclusiones

En este trabajo se presenta una comparación de las distribuciones de probabilidad tanto de los casos positivos por Covid-19 como de los casos fallecidos por la misma enfermedad para los tres diferentes picos de la pandemia. Se evidenciaron cambios insignificantes en las distribuciones asociadas a los casos positivos entre los tres diferentes picos, y se confirma que los colombianos con mayor probabilidad de contagio presentan edades entre los 20 y los 60 años. Asimismo, se obtienen aumentos en las probabilidades de fallecer de los pacientes con edades entre 20 y 69 años y disminuciones en la misma probabilidad en pacientes mayores a los 70 años, lo anterior a partir del análisis de las distribuciones de probabilidad y las letalidades en el tercer pico.

Adicionalmente, departamentos (distritos) como: Cartagena, Meta, Casanare, Magdalena, Guajira y Putumayo presentan un aumento de más del 5 % en la probabilidad de fallecer en el tercer pico, para los pacientes entre los 20 y los 44 años edad, siendo el departamento más crítico el del Putumayo, con un aumento de más del 15 %. De igual forma, se muestra que Antioquia, Cauca, Córdoba, Amazonas y Caquetá presentan un aumento de más del 10 % en la probabilidad de fallecer en el tercer pico para los pacientes con edades entre los 45 y los 69 años. Por último, los únicos departamentos que no han presentado disminución en la probabilidad de fallecer en pacientes mayores a 70 años para el tercer pico son: Huila, Risaralda, Norte de Santander, Boyacá, Sucre, Chocó y Amazonas.

Para finalizar, se espera que se pueda seguir una ruta eficaz para la vacunación en Colombia (**Gomez Marín y cols.**, 2021), pues hasta ahora se ha alcanzado una disminución en los porcentajes de pacientes fallecidos mayores a 70 años, pero estas disminuciones se han distribuido en otros grupos de edades, afectando en mayor medida a colombianos entre los 45 y 69 años de edad en diferentes departamentos de Colombia.

Agradecimientos

Se quiere dar un agradecimiento especial a todas las personas que trabajaron en el desarrollo de las librerías computacionales *Pandas*, *Numpy*, *Scipy*, *Matplotlib* y *Seaborn* del lenguaje *Python*, lo cuál permitió la manipulación y estudio de las grandes cantidades de información. Asimismo, se desea rendir homenaje a los más de cien mil decesos que ha dejado esta pandemia en Colombia, dedicando este trabajo a todas y cada una de sus familias que sienten su ausencia.

Contribución de los autores

JJVG generó la idea y desarrolló parte del código en *Python* para la manipulación de los datos reportados por el INS. MXAB revisó el código y realizó ajustes de optimización. El análisis estadístico, la redacción del artículo y el diseño de las figuras se trabajó de manera conjunta.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

Referencias

- Bwire, G. M., y Paulo, L. S.** (2020). Coronavirus disease-2019: is fever an adequate screening for the returning travelers? *Tropical medicine and health*. **48** (1): 1-3.
- Casos positivos de COVID-19 en Colombia — Datos Abiertos Colombia.** (s.f.). Descargado el 13 de mayo de 2021 de <https://www.datos.gov.co/Salud-y-Proteccion-Social/Casos-positivos-de-COVID-19-en-Colombia/gt2j-8ykr/data>

- Cruz, M. P., Santos, E., Cervantes, M. V., y Juárez, M. L.** (2020). Covid-19, una emergencia de salud pública mundial. *Revista Clínica Española*.
- Dey, S. K., Rahman, M. M., Siddiqi, U. R., y Howlader, A.** (2020). Analyzing the epidemiological outbreak of covid-19: A visual exploratory data analysis approach. *Journal of medical virology*. **92** (6): 632-638.
- García Chilan, C., y Viteri Paredes, J.** (2010). *Análisis e implementación de algoritmos para distorsionar imágenes con distintos tipos de ruido y aplicación de filtros en dos dimensiones para restaurarlas* (B.S. thesis).
- Goldstein, E., Lipsitch, M., y Cevik, M.** (2020). On the effect of age on the transmission of sars-cov-2 in households, schools and the community. *medRxiv*. Descargado de <https://www.medrxiv.org/content/early/2020/07/28/2020.07.19.20157362> doi: 10.1101/2020.07.19.20157362
- Gómez-Gómez, M., Danglot-Banck, C., Velásquez-Jones, L.** (2001). Bases para la revisión crítica de artículos médicos. *Rev Mex Pediatr*. **68** (4): 152-159.
- Gomez Marín, J. E., Castaño Osorio, J. C., Patarroyo, M. A., Mejía-Oquendo, M., Valdivia-Granda, W., Álvarez, C., Sepúlveda-Arias, J. C.** (2021, 03). Una hoja de ruta para la Vacuna COVID 19 en Colombia, un reto posible. *Infectio*. **25**: 7-10. Descargado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-93922021000100007&nrm=iso
- Gu, C., Zhu, J., Sun, Y., Zhou, K., y Gu, J.** (2020). The inflection point about covid-19 may have passed. *Science bulletin*.
- Irvine, M. A., y Hollingsworth, T. D.** (2018). Kernel-density estimation and approximate bayesian computation for flexible epidemiological model fitting in python. *Epidemics*. **25**: 80-88. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755436518300185> doi: <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2018.05.009>
- Lai, C.-C., Shih, T.-P., Ko, W.-C., Tang, H.-J., y Hsueh, P.-R.** (2020). Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (sars-cov-2) and coronavirus disease-2019 (covid-19): The epidemic and the challenges. *International journal of antimicrobial agents*. **55** (3): 105924.
- Lu, R., Zhao, X., Li, J., Niu, P., Yang, B., Wu, H., others** (2020). Genomic characterisation and epidemiology of 2019 novel coronavirus: implications for virus origins and receptor binding. *The lancet*. **395** (10224): 565-574.
- Mahase, E.** (2020). Covid-19: Who declares pandemic because of “alarming levels” of spread, severity, and inaction. *Bmj*, **368**.
- Mathew, R.** (2020). Rammya mathew: We must not be guided by bad science on covid-19. *BMJ*, **369**. Descargado de <https://www.bmj.com/content/369/bmj.m2241> doi: 10.1136/bmj.m2241
- Ministerio de Salud y Protección Social.** (s.f.). Descargado el 17 de mayo de 2021 de <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/default.aspx>
- Minsalud- información del Coronavirus COVID-19.** (s.f.). Descargado el 17 de mayo de 2021 de <https://www.minsalud.gov.co/portada-covid-19.html>
- Monod, M., Blenkinsop, A., Xi, X., Hebert, D., Bershian, S., Tietze, S.** (2021). Age groups that sustain resurging covid-19 epidemics in the united states. *Science*. **371** (6536). Descargado de <https://science.sciencemag.org/content/371/6536/eabe8372> doi: 10.1126/science.abe8372
- Moreno-Altamirano, S.-B. A., López-Moreno, A.** (2007). Principales medidas en epidemiología. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. Descargado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223219928011>
- Peng, L., Yang, W., Zhang, D., Zhuge, C., y Hong, L.** (2020). Epidemic analysis of covid-19 in china by dynamical modeling. *arXiv preprint arXiv:2002.06563*.
- Phan, T.** (2020). Genetic diversity and evolution of sars-cov-2. *Infection, Genetics and Evolution*, **81**: 104260. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567134820300915> doi: <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2020.104260>
- Pinzón, J. E. D.** (2020). Estimación de las tasas de mortalidad y letalidad por covid-19 en colombia. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 89-93.
- Rosselli, D.** (2020, 05). Covid-19 en colombia: los primeros 90 días. *Acta Neurológica Colombiana*, **36**: 1-6. doi: 10.22379/24224022287
- Terrell, G. R., y Scott, D. W.** (1992). Variable kernel density estimation. *The Annals of Statistics*, **20** (3): 1236-1265. Descargado de <http://www.jstor.org/stable/2242011>
- Undurraga, E. A., Chowell, G., Mizumoto, K.** (2021). Covid-19 case fatality risk by age and gender in a high testing setting in latin america: Chile, march–august 2020. *Infectious Diseases of Poverty*, **10** (1). doi: 10.1186/s40249-020-00785-1
- Waskom, M. L.** (2021). seaborn: statistical data visualization. *Journal of Open Source Software*, **6** (60): 3021. Descargado de <https://doi.org/10.21105/joss.03021> doi: 10.21105/joss.03021

Ciencias del Comportamiento

Artículo original

Psicología evolucionista. Tomando en serio a Darwin

Evolutionary psychology. Taking Darwin seriously

Rubén Ardila

Universidad Nacional de Colombia

Resumen

Se presentan los orígenes de la psicología evolucionista cuyos fundamentos se remontan a las obras de **Charles R. Darwin** (1859, 1871, 1872). En sus principales libros se encuentran referencias a la mente, el comportamiento y la cognición de los seres humanos y de animales no humanos. Darwin afirmaba que la teoría de la evolución contribuiría a entender mejor a la especie humana y su comportamiento y que la psicología podría estudiarse bajo una “nueva luz”. Más adelante aparece la sociobiología de **Wilson** (1975) y, posteriormente, la psicología evolucionista (**Buss**, 1999; **Cosmides & Tooby**, 1992, 2005, 2017; **Barkow, et al.**, 1992), la cual propone respuestas frente a las limitaciones de la sociobiología. La psicología evolucionista es uno de los campos de investigación y teorización de mayor relevancia en las ciencias del comportamiento en estas primeras décadas del siglo XXI. El presente artículo analiza los orígenes de la psicología evolucionista, su desarrollo, sus logros, sus limitaciones y las críticas que ha recibido.

Palabras clave: Psicología evolucionista; Natura-Nurtura; Cultura.

Abstract

In this article, the origins of evolutionary psychology are presented beginning with **Charles R. Darwin's** main works (1859, 1871, 1872). In his books, Darwin wrote about the mind, the behavior, and the cognition of human and non-human animals. He stated that the theory of evolution could contribute to a better understanding of the human species and its behavior and that psychology could be studied in a “new light”. Many years later, **Wilson** (1975) introduced sociobiology as a discipline, and later, other authors set the fundamentals of evolutionary psychology (**Buss**, 1999; **Cosmides & Tooby**, 1992, 2005, 2017; **Barkow, et al.**, 1992). Evolutionary psychology has been one of the most relevant research and theorizing fields in behavioral sciences in the first decades of the 21st Century. The present paper analyzes the origins of evolutionary psychology, its development, achievements, and the criticism it has received.

Key words: Evolutionary psychology; Nature-nurture; Culture.

Citación: Ardila R. Psicología evolucionista. Tomando en serio a Darwin. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):980-988, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1470>

Editor: Guillermo Páramo

Correspondencia:

Rubén Ardila;
ruben.ardila@outlook.com

Recibido: 15 de mayo de 2021

Aceptado: 30 de agosto de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Introducción

Los psicólogos han dado gran importancia a la teoría de la evolución desde que esta fue propuesta en su acepción moderna por **Charles R. Darwin** (1809-1882). Uno de los pivotes de la psicología contemporánea es la teoría de la evolución, aunque su aceptación por los psicólogos de finales del siglo XIX y durante el siglo XX adoptó formas diversas. Darwin se refirió a temas psicológicos en sus tres obras principales: *On the origin of species* (1859), *The descent of man and selection in relation to sex* (1871), y *The expression of emotions in man and animals* (1872), especialmente en las dos últimas. En el decenio de 1990 aparece la psicología evolucionista, que investiga los fenómenos psicológicos bajo una nueva luz, como quería Darwin. Buss, Tooby, Cosmides, Barkow, Symons y otros científicos estudiaron la estructura psicológica desde una perspectiva evolucionista moderna. La psicología evolucionista propuesta por ellos, y que difiere de la llamada “sociobiología”, busca identificar la forma en que los rasgos psicológicos adaptativos evolucionaron como productos funcionales

de la selección natural o de la selección sexual de la evolución humana. La psicología evolucionista afirma que la modularidad de la mente es similar a la del cuerpo y que diferentes adaptaciones modulares sirven para diferentes funciones. Gran parte de las adaptaciones psicológicas evolucionaron para resolver problemas recurrentes en los ambientes humanos ancestrales. La mente, según la psicología evolucionista, está formada por muchos mecanismos funcionales que se han desarrollado mediante la selección natural por ser útiles para la supervivencia y la reproducción del organismo. Son productos funcionales de la selección natural en medios ancestrales totalmente diferentes del actual.

El presente artículo traza los orígenes de la psicología evolucionista, sus presupuestos, estado actual, controversias y discusiones, y su lugar en la explicación de la naturaleza y el comportamiento humanos.

Orígenes

La psicología en las décadas recientes ha sido básicamente interaccionista: herencia-ambiente o natura-nurtura. Las explicaciones a los fenómenos del comportamiento se buscaron en el aprendizaje, en el contexto cultural, en las experiencias durante el transcurso de la vida, y en asuntos similares. Se consideró que la mayor parte de lo que hacen o dicen los seres humanos se basa en el aprendizaje, especialmente aquel que tiene lugar durante la primera infancia. Aunque no se ignoró el papel de la genética y la predisposición hacia ciertos comportamientos, se les dio menor relevancia. Generalmente, se habló de la interacción entre herencia y ambiente (el clásico problema natura-nurtura), con un énfasis notorio en el ambiente (Ardila, 2012).

Tópicos como las diferencias individuales, la violencia y la agresión, las aptitudes, los valores, las pautas complejas de conducta, se consideraron productos del ambiente, o de la interacción entre genética y ambiente. Podía tratarse del ambiente físico (calor, frío, toxinas en el aire) o social (la cultura, la familia, las demás personas, la constelación familiar, la escuela, los pares), y también del ambiente interno o externo al organismo.

Las leyes psicológicas se presentan a nivel de comportamiento, incluidas las leyes y los principios de la percepción, la motivación, el aprendizaje, la cognición, el comportamiento social, las actitudes y los valores. Todo se aprende y todo (o casi todo) es susceptible de modificarse si sabemos cómo hacerlo. La mayor parte de la psicología como disciplina científica y como campo de aplicación profesional, se fundamenta en este marco de referencia. La flexibilidad del comportamiento, los orígenes aprendidos de nuestra conducta, son pilares de la ciencia y la profesión psicológicas.

Hubo algunos autores que señalaron que existen tendencias innatas a comportarnos. Fueron posiciones minoritarias que se opusieron al concepto de *tabula rasa*, que considera que los seres humanos supuestamente naceríamos como una página en blanco en la cual la cultura imprime sus mensajes en forma de actitudes, valores y pautas de conducta. Esta posición mayoritaria (de *mainstream*) se puso en tela de juicio a partir de las objeciones de Breland & Breland (1961) a la posición de la mayoría en el campo de la psicología. Aparecieron numerosos casos en los cuales era posible señalar que existían tendencias innatas a comportarnos y que el ser humano al nacer no era una *tabula rasa*. De hecho, en la actualidad nadie considera que lo sea (Pinker, 2002).

La sociobiología

La sociobiología (Wilson, 1975) fue un intento de explicar la conducta con base en la evolución y, específicamente, en la genética de las poblaciones. El término “sociobiología” lo acuñó J.B. Scott en 1948 y lo difundió Wilson en sus obras. La sociobiología de Wilson se centró en la investigación de las conductas sociales, entre ellas, las pautas de apareamiento, las luchas territoriales, las sociedades de insectos y otras. Sus postulados plantean que la presión de la selección conduce a los animales a evolucionar en formas útiles de interacción con el ambiente natural y desemboca en la evolución genética de la conducta social ventajosa.

La sociobiología se define como “la extensión de la biología de las poblaciones y la teoría evolucionista a la organización social”. Su recepción en la comunidad científica fue muy variada, con adherentes entusiastas y con grandes críticos, tanto entre los biólogos como entre los científicos del comportamiento o científicos sociales. Se acepta que las conductas han evolucionado a lo largo del tiempo. Los animales actúan en formas que prueban ser exitosas a lo largo del tiempo. La conducta se explica como producto de la selección natural. De hecho, años antes de los trabajos de Wilson se había considerado la influencia de la evolución sobre el comportamiento, como puede verse en las investigaciones de William D. Hamilton, entre otros (Ardila, 1977; Gutiérrez, 2018; Gutiérrez & Papini, 2011; Hamilton, 1964).

Psicología evolucionista

La psicología evolucionista representa una forma de explicar las tendencias a comportarnos que son comunes a toda la humanidad, o al menos así lo parece. Es una manera de mirar los fenómenos psicológicos en su totalidad, no una rama de la psicología ni un “enfoque” de la misma, y representa la revolución más reciente en este campo.

Como ya se señaló, Darwin se había interesado por los fenómenos psicológicos y había escrito al respecto en sus tres libros principales, *The origin of species* (1859), *The descent of man and selection in relation to sex* (1871) y *The expression of emotions in animals and man* (1872). En las conclusiones de su obra fundamental planteaba: “En el futuro veo nuevos campos para investigaciones que son mucho más importantes. La psicología se basará en un nuevo fundamento...que es la necesaria adquisición de cada poder y capacidad mental en forma gradual. Esto servirá para arrojar mucha luz sobre el origen del hombre y su historia (Darwin, 1859).

La psicología evolucionista se define como “una perspectiva de la investigación psicológica que considera a la cognición y la conducta humana en el amplio contexto darwiniano de la adaptación a ambientes físicos y sociales cambiantes y a la forma de enfrentar nuevos retos intelectuales. Difiere de la sociobiología principalmente en su énfasis en los efectos de la selección natural sobre el procesamiento de la información y en la estructura de la mente humana.” (American Psychological Association - APA, 2007).

Al igual que la sociobiología, la psicología evolucionista explica la conducta como producto de la selección natural. Considera que la conducta es en gran medida un esfuerzo por preservar nuestros genes en la población. Ciertos genes o sus combinaciones que influyen en los rasgos del comportamiento pueden ser heredados de una generación a otra. La psicología evolucionista trata de establecer las causas últimas de que nuestras características psicológicas permitieran la supervivencia y el éxito reproductivo en el pasado remoto.

Nuestra especie surgió en un ambiente muy diferente del actual, hace varios millones de años, en lo que hoy son las sabanas africanas. En ese ambiente estable la humanidad evolucionó durante la mayor parte de su historia. Esos largos períodos de tiempo en los que nuestros antepasados fueron cazadores-recolectores abarcan lapsos mucho más extensos que el período durante el cual se inventó la agricultura (hace aproximadamente 10.000 años), y no se compara con el período en el cual se organizó la sociedad contemporánea, hace solo unos pocos miles de años. La psicología evolucionista se basa en el presupuesto de que de la misma forma en que se desarrollaron los órganos y sistemas del cuerpo (riñones, corazón, pulmones, sistema inmunológico, entre otros), también la cognición tiene una estructura funcional que posee, a su vez, una base genética y que, por lo tanto, se ha desarrollado por selección natural.

Como han señalado varios psicólogos evolucionistas, los seres humanos han tenido que reconocer regularmente caras, identificar objetos, evitar depredadores, detectar alimentos, cazar animales, calcular distancias, evitar ciertas toxinas, balancearse al caminar, fabricar herramientas, interpretar correctamente las situaciones sociales, ayudar a sus parientes, elegir pareja, inducir a la persona elegida a que los elija, elegir a las personas

con alto valor reproductivo, evitar que su pareja tenga descendientes con otras personas, detectar cuando los niños requieren ayuda, mantener amistades, cooperar, combinar adecuadamente tareas.

Tal como ocurre con los órganos y tejidos, la estructura funcional de la “mente” es universal y común a toda la especie humana. Responde a la solución de problemas importantes para la supervivencia y la reproducción. La tarea de los psicólogos evolucionistas es entender los procesos cognitivos estudiando las facultades de supervivencia y las funciones reproductivas que le sirvieron a la especie humana en el ambiente en el cual se originó. En esa naturaleza estable de las sabanas africanas el ambiente social lo conformaban grupos pequeños de cazadores-recolectores, adaptados a su contexto. Este es el ambiente de la adaptabilidad evolutiva (*environment of evolutionary adaptedness*, EEA). Hemos vivido en ese ambiente durante la mayor parte de nuestra historia evolutiva como especie.

La psicología evolucionista busca responder cuatro preguntas básicas (Buss, 1999): 1) ¿Por qué está la mente diseñada en la forma como lo está, o sea, cuáles procesos causales crearon, moldearon la mente humana para llegar a su forma actual? 2) ¿Cómo está diseñada la mente humana, ¿cuáles son sus mecanismos o partes constitutivas y cómo están organizadas? 3) ¿Cuáles son las funciones de las partes constitutivas y su estructura organizada, es decir, para qué está diseñada la mente? 4) ¿En qué forma la estimulación procedente del ambiente actual, especialmente del ambiente social, interactúa con el diseño de la mente humana para producir la conducta que observamos?

Estas preguntas resumen en buena parte el programa investigativo de la psicología evolucionista. Un marco de referencia para estudiar los fenómenos psicológicos, que tuvo sus orígenes a finales de la década de 1980 y comienzos de la década de 1990, y es hoy una de las perspectivas de investigación más influyentes e importantes de la psicología en estas primeras décadas del siglo XXI, que aspira a integrar la disciplina como un todo.

El surgimiento de la psicología evolucionista ha permitido estudiar el clásico problema de la relación entre natura y nurtura desde una nueva perspectiva. Debe señalarse que un enfoque evolucionista no implica necesariamente un determinismo genético. Implica que existen bases genéticas para la cognición y la conducta, pero no desconoce el aprendizaje cultural. Sin duda gran parte de la conducta humana ocurre en un contexto social y se basa en el aprendizaje. La modificación de las pautas conductuales, y en general la transmisión cultural, tienen un papel especialmente importante en la conducta de los seres humanos. Nunca seremos capaces de entender la naturaleza humana sin entender la cultura y la forma en que influye en lo que hacen los seres humanos.

Fundamentos conceptuales

Los siguientes fundamentos conceptuales de la psicología evolucionista, presentados por **Cosmides & Tooby** (2005), constituyen la base teórica sobre la que se sustentan la mayor parte de los investigadores.

1. El cerebro es un computador que la selección natural diseñó para extraer y procesar información del ambiente.
2. La conducta humana individual es generada por este computador en respuesta a la información que extrae del ambiente. Comprender la conducta requiere articular los programas cognitivos que la generan.
3. Los programas cognitivos del cerebro humano son adaptaciones. Existen porque produjeron en nuestros antecesores conductas que los capacitaron para sobrevivir y reproducirse.
4. Los programas cognitivos del cerebro humano pueden o no ser adaptativos ahora. Originalmente lo fueron, en los ambientes ancestrales en los cuales vivió nuestra especie en el pasado.
5. La selección natural asegura que el cerebro está compuesto por muchos programas diferentes con propósitos especiales que no son un dominio de arquitectura general.

6. La descripción de la arquitectura computacional evolucionada de nuestros cerebros permite una comprensión sistemática de los fenómenos culturales y sociales.

Es importante señalar que la analogía entre el cerebro y el computador es simplemente eso, una analogía, que muchos investigadores no comparten. Los mecanismos psicológicos son producto de la selección natural, y como se ha indicado, aparecieron para responder a circunstancias específicas en los ambientes de nuestros antecesores. No necesitan ser adaptativos en este momento. Se afirma, asimismo, que existe una analogía entre los órganos y los mecanismos psicológicos o módulos. Los órganos llevan a cabo funciones específicas, no hay órganos de propósito general (el corazón bombea la sangre, el pulmón lleva aire y lo procesa, el hígado limpia el organismo de toxinas). Tampoco hay mecanismos psicológicos de propósito general, sino que surgieron como respuesta a contingencias específicas del ambiente y fueron seleccionados en cuanto contribuyeron a la supervivencia y a la reproducción del organismo.

La psicología evolucionista señala que toda conducta se explica mejor en términos de los mecanismos psicológicos subyacentes que son adaptaciones para resolver un conjunto particular de problemas que los seres humanos enfrentaron en el pasado. Los mecanismos están universalmente distribuidos en los seres humanos y no son susceptibles de mucha variación. Se retoma, por lo tanto, el concepto de naturaleza humana, de universalidad de la especie, de lo que todos los seres humanos tienen en común (Ardila, 2011 a, b). Los psicólogos evolucionistas enfatizan la validez transcultural de sus resultados y afirman que existe consistencia en las respuestas de una amplia variedad de poblaciones humanas.

La metodología utilizada en psicología evolucionista abarca todos los métodos estándar de investigación utilizados por los psicólogos para probar hipótesis, incluidos experimentos de laboratorio, técnicas observacionales, técnicas fisiológicas, cuestionarios, instrumentos mecánicos de registro, métodos genéticos, técnicas de imagen cerebral, entre otros, y recurre también a registros arqueológicos, datos paleontológicos, análisis comparativos en especies, y otros (Barkow, 1992; Cosmides & Tooby, 1992; Cosmides & Tooby, 1992; Cruz & Javela, 2018, Dunbar & Barrett, 2007, Tooby & Cosmides, 2000).

El problema de la modularidad de la mente

En la psicología evolucionista una de las discusiones centrales es la modularidad de la mente. Se afirma que la mente posee algún grado de estructura modular, pero no sabemos con certeza qué forma toma esa modularidad y cuántos módulos hay. En el estado actual de nuestros conocimientos, se considera que en el adulto la cognición se comporta en forma modular, aunque no sabemos si ese nivel de modularidad está presente en todos los casos desde el nacimiento o si se desarrolla durante los procesos ontogenéticos.

En la actualidad se considera que existe una coevolución gen-cultura, y tanto los factores genéticos como la cultura se consideran en una explicación comprensiva de la conducta humana desde la perspectiva de la psicología evolucionista. Se da importancia a la selección en múltiples niveles y a la teoría de la construcción del nicho.

Anteriormente, uno de los marcos de referencia en las ciencias del comportamiento era el llamado modelo estándar de las ciencias sociales (MECS), el cual enfatiza la autonomía de la cultura con respecto a las mentes individuales. Los investigadores que dieron origen a la psicología evolucionista proponen en cambio el modelo de causas integradas (MCI). Desde esa perspectiva se considera que la selección natural ha ido modelando mecanismos mentales específicos. La configuración y el funcionamiento de la mente es fruto de la evolución, que ha ido seleccionando aquellos circuitos cerebrales capaces de responder de forma más adecuada a los problemas con los que la especie humana ha tenido que enfrentarse a lo largo de su desarrollo filogenético.

Al proponer el modelo de causas integradas (MCI), Cosmides & Tooby, 2017 señalan que nuestras conductas están determinadas por nuestra evolución biológica en interacción con nuestro ambiente. Esto lleva a seleccionar en nuestra mente módulos específicos pre-programados para resolver problemas planteados básicamente en nuestra época

ancestral de cazadores-recolectores, lo que se traduce en la existencia de una naturaleza humana única sobre la que se superponen las variaciones culturales observables, que son únicamente manifestaciones de particularidades rituales de costumbres o tradiciones.

A la pregunta de si la mente actúa de manera general o de manera modular, estos autores responden con la metáfora de las “navajas suizas”. El enfoque de dominio general consideraba que la mente era como una navaja común, o como una herramienta de utilidad general capaz de realizar funciones muy diferentes. Por el contrario, el enfoque modular considera la mente como una navaja suiza compuesta de múltiples herramientas especializadas en tareas muy diferentes. La evolución de la mente humana ha dado lugar a una organización modular, una colección de mecanismos mentales especializados en resolver de manera eficaz problemas concretos. Como las navajas suizas.

Entre los “módulos” que han propuesto los psicólogos evolucionistas se encuentran la selección de alimentos (evitación de sustancias que contienen toxinas); el temor a las serpientes y a las arañas; la selección de pareja; la selección de hábitat; el altruismo orientado hacia los parientes cercanos; la amistad, que incluye detectar a los amigos falsos y mentirosos; la cooperación; la agresión selectiva; la negociación de estatus; la ansiedad de los niños ante los extraños y muchos otros. Es importante señalar que estos “módulos” no están completamente separados, sino que con frecuencia tienen componentes en común e interactúan para producir el comportamiento adaptativo.

Se discute si existen mecanismos psicológicos de dominio general, como sería la inteligencia fluida. También la racionalidad se ha postulado como un mecanismo de dominio general. Sin embargo, la mayor parte de los especialistas consideran que estos dominios generales no son una explicación adecuada, porque no dan cuenta de los fenómenos investigados en la psicología evolucionista, no generan nuevas predicciones empíricas y son simplemente explicaciones *post hoc*. Aunque los seres humanos seamos (parcialmente...) racionales, la mayor parte de los fenómenos investigados no pueden explicarse con base en la racionalidad. Las decisiones no se toman siempre de forma racional sino de la forma en que nuestra mente fue diseñada por la evolución para hacerlo.

Conductas ancestrales

Como hemos señalado, los psicólogos evolucionistas consideran que la mente humana es un conjunto integrado y complejo de muchas adaptaciones psicológicas funcionalmente especializadas. Las adaptaciones psicológicas son circuitos de procesamiento de información que toman ciertas unidades delimitadas de información y las transforman en conductas diseñadas de manera funcional para resolver un problema particular de adaptación.

Pinker (2002) afirma que las adaptaciones psicológicas están diseñadas para responder a condiciones sociales, tales como el hecho de tener pareja o de no tenerla, de tener hijos o no tenerlos, poseer un nivel alto o bajo en la jerarquía de estatus, y en forma más general, enfrentar un problema adaptativo en lugar de otro. Insiste en que, aunque la psicología evolucionista claramente rechaza el concepto de *tabula rasa* de la mente humana, también rechaza claramente el determinismo genético y en cambio brinda un detallado marco de referencia interaccionista.

Entre las numerosas conductas de los seres humanos actuales que han sido estudiadas, y que tuvieron importancia para la adaptación y la supervivencia en el ambiente ancestral en que evolucionó nuestra especie pero ya no la tienen, está el temor a las serpientes. Originalmente se trataba de un reto importante y un peligro para la supervivencia. Se ha encontrado que en los seres humanos y en otros primates existe un temor intenso a las serpientes. Frente al miedo a las serpientes, los seres humanos se condicionan más fácil y rápidamente que frente a otros estímulos. El temor universal y evolutivo a las serpientes, incluso en los ambientes modernos en los cuales hay muy pocas serpientes, muestra que estas fueron una fuerza hostil de la naturaleza en nuestro pasado evolutivo. Es un miedo muy difícil de eliminar y se ha descubierto que está presente en todas las culturas.

Los peligros ancestrales, como el miedo a las serpientes, adoptan la forma de fobias muy frecuentes en nuestros días, mucho más que los peligros modernos, como las armas y los automóviles, cuya peligrosidad para la supervivencia en el ambiente moderno es mayor que la de las serpientes. Estos temores con fundamento evolutivo, pues presentaban amenazas para la supervivencia, producen como consecuencia conductas de escape, congelamiento o lucha.

El ambiente en que se originó y evolucionó la especie humana durante la mayor parte de su historia era diferente del actual. Sin embargo, podemos saber mucho acerca de la vida en ese ambiente utilizando múltiples métodos, algunos derivados de la arqueología y la paleontología. **Duntley & Buss (2008)** afirman que la evidencia paleontológica muestra rupturas en los cráneos y en los esqueletos de nuestros antepasados que seguramente produjeron heridas letales, y que se correlacionan con el tamaño y la forma de las armas ancestrales encontradas en la vecindad. Cuando se combina esta información con la que proporcionan las pinturas rupestres de luchas, y también otras fuentes, se pueden hallar evidencias confiables de peleas, y se constata que los varones fueron más violentos, agresivos y también víctimas de violencia más frecuentemente que las mujeres, y que, además, la mayoría de los atacantes ancestrales eran diestros.

Otras conductas ancestrales son la búsqueda de una pareja que garantice fertilidad y cuidado de la cría, y la evitación del incesto. También la violencia contra los niños, ocasionada a veces por miembros de la familia, el infanticidio, el rapto y muchos otros comportamientos antisociales e ilegales, se explican, al menos parcialmente, considerando sus fundamentos evolutivos y su origen en el ambiente ancestral de nuestra especie. También lo son varias conductas relacionadas con la salud y la enfermedad (**Strassman & Dunbar, 1998**). Igualmente, nuestro apetito por grasas y alimentos dulces, que fue adaptativo hace miles de años pero que en la actualidad es causa de obesidad y enfermedades cardíacas, entre otras, así como la evitación de alimentos amargos, que en muchos casos eran venenosos y cuyo consumo producía náusea, lo cual constituía una adaptación conductual.

Críticas a la psicología evolucionista

Esta conceptualización de los fenómenos psicológicos desde la perspectiva neodarwiniana ha dado origen a numerosas críticas, algunas de las cuales se deben a malas interpretaciones de la psicología evolucionista, otras a limitaciones de la investigación y, en otros casos, a interpretaciones alternativas de los fenómenos. No es verdad, como se ha dicho caricaturizando la psicología evolucionista, que se considere a los seres humanos como “fósiles vivientes”.

En primer lugar, se ha señalado la imposibilidad de falsear la teoría (según la perspectiva de Popper). No es posible comprobar ni refutar directamente cómo el ambiente ancestral del Pleistoceno, tanto el físico como el social, influyó en el origen y evolución de los módulos de la mente. Además, no se conocen con total certeza las características de ese ambiente ancestral, más allá de la limitada evidencia geológica y fósil, y la información sobre los grupos humanos que actualmente viven en las regiones de la sabana africana.

En segundo lugar, se afirma que la psicología evolucionista puede conducir al determinismo genético. Esto es incorrecto, como lo enfatizan los psicólogos evolucionistas, dado que se tienen en cuenta las variaciones culturales, además del papel del desarrollo ontogenético y la historia de aprendizaje individual.

Se dice también que la psicología evolucionista descuida el ambiente, lo cual es falso. Se tiene en cuenta de manera relevante. De hecho, desde una perspectiva evolutiva actual, tratar de separar los factores genéticos de los aprendidos y de su interacción es una tarea que no lleva a explicaciones valederas.

Otra crítica se centra en afirmar que la psicología evolucionista le da demasiada importancia a la selección sexual, a los factores que se asocian con la búsqueda de pareja, la transmisión de los propios genes a la siguiente generación, el atractivo interpersonal (¿qué factores llevan a que un hombre seleccione a una mujer o a que sea seleccionado por

ella? ¿Qué buscan las mujeres y los hombres en una pareja?). Si bien buena parte de los investigadores se han centrado en el estudio de la búsqueda de parejas, dado el papel de la evolución sexual en la evolución de nuestros rasgos psicológicos, esto puede obedecer a factores “externos”, como los intereses personales o la atención pública sobre estos temas. Esta tendencia se puede ver reflejada en el estudio de las preferencias, tópico que ha sido considerado como la piedra angular en la investigación desde la perspectiva evolucionista (Conroy-Beam & Buss, 2016; Shackelford & Weekes-Shackelford, 2021). Como se ha demostrado, estas críticas son en su mayor parte falacias.

Conclusiones

La psicología evolucionista es la más reciente de las revoluciones psicológicas. Sus fundamentos en la teoría neodarwiniana, su utilización de las conceptualizaciones de la teoría de la información, de la psicología cognitiva, de las neurociencias, y su explicación de muchos fenómenos del comportamiento humano hasta entonces no explicados satisfactoriamente, la convierten en una perspectiva muy valiosa de la psicología y de las ciencias del comportamiento en general.

La insistencia en la uniformidad psicológica de los seres humanos es algo que debe señalarse (Cosmides & Tooby, 2017). Es un acierto centrar la investigación en los mecanismos psicológicos comunes a la especie y que son compatibles con la diversidad cultural. Los psicólogos evolucionistas diferencian entre ambiente actual y ambiente ancestral a la hora de investigar qué presiones de selección se ejercían sobre nuestros antepasados. Es posible que este énfasis en la uniformidad de nuestra especie sea también un esfuerzo por tomar distancia de la sociobiología, como han dicho varios autores. Las afirmaciones de la sociobiología llevaron a consideraciones “políticamente incorrectas” y a postular que las diferencias culturales entre poblaciones tienen un origen genético. Nada de eso afirman los psicólogos evolucionistas.

Para concluir, recordemos que la evolución se estudia en tres niveles: 1) cosmológico, que incluye la evolución del universo; 2) biológico, referido a la evolución de las especies, incluida la especie humana, y 3) psico-social, centrado en la conducta y la cultura, en aquella parte del ambiente hecha por el hombre, en la organización social, los valores, las leyes y, en general, el ser humano y su sociedad. La psicología evolucionista no ignora este tercer nivel al enfatizar el nivel biológico. Tenemos una concepción integrada que nos sirve para entender mejor la especie humana y su devenir en el planeta.

Conflicto de intereses

El autor declara que no existe conflicto de intereses que pueda afectar el contenido de este artículo.

Referencias

- American Psychological Association.** (2007). *APA dictionary of psychology*. Washington, D.C.; American Psychological Association.
- Ardila, R.** (1977). *Darwin y la psicología*. Investigaciones psicológicas. Bogotá: Siglo XXI Editores.
- Ardila, R.** (2011a). Darwin, El origen de las especies y la psicología, 150 años después. En G. Gutiérrez y M.R. Papini (Eds.). *Darwin y las ciencias del comportamiento* (pp. 61-72). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Ardila, R.** (2011b). *El mundo de la psicología*. Bogotá: Editorial Manual Moderno.
- Ardila, R.** (2012). Nature and nurture. A nonkilling developing world perspective. In D.J. Christie & J.E. Pim (Eds.). *Nonkilling psychology* (pp. 71-84). Honolulu, Hawaii: Center for Global Nonkilling.
- Barkow, J., Cosmides, L., Tooby, J. H.** (Eds.).(1992). *The adapted mind. Evolutionary psychology and the generation of culture*. New York: Oxford University Press.
- Breland, K. & Breland, M.** (1961). The misbehavior of organisms. *American Psychologist*. **16**: 681-684.
- Buss, D.M.** (1999). *Evolutionary psychology. The new science of the mind*. Boston: Allyn & Bacon.

- Buss, D.M.** (Ed.). (2005). *The handbook of evolutionary psychology*. New York: Wiley.
- Duntley, J.D. & Buss, D.M.** (2008). The evolutionary psychology of warfare. Paper presented in: *Evolutionary perspectives on war*. Eugene, OR: University of Oregon.
- Comroy-Beam, D. & Buss, D.M.** (2016). Mate preferences. In Shackelford, T. K., & Weekes-Shackeldord, V. A. (Eds.). (2021). *Encyclopedia of evolutionary psychological science* (pp. 1-11). Switzerland: Springer Nature.
- Conroy-Beam, D. & Buss, D.M.** (1989). Evolutionary psychology and the generation of culture. Part II. Case study: A computational theory of social exchange. *Ethology and Sociobiology*, **10**: 51-97.
- Cosmides, L. & Tooby, J. H.** (1992). Cognitive adaptations for social exchange. In J. H. Barkow, L. L. Cosmides & J. H. Tooby (Eds.). *The adapted mind* (pp. 163-228). Oxford: Oxford University Press.
- Cosmides, L. & Tooby, J. H.** (2005). Neurocognitive adaptations designed for social exchange. In D. M. Buss (Ed.). *The handbook of evolutionary psychology* (pp. 584-627). New York: Wiley.
- Cosmides, L. & Tooby, J.** (2017). *Universal minds: Expanding the new science of evolutionary psychology*. London: Weidenfeld & Nicolson.
- Cruz, J.E. & Javela, L. G.** (2018). Psicología evolucionista, volver a lo natural. En G. Gutiérrez. (Ed.). *Teorías en psicología. Integración y el futuro de la disciplina* (pp. 84-98). Bogotá: Editorial Manual Moderno.
- Darwin, C.R.** (1859). *The origin of species*. London: Murray.
- Darwin, C.R.** (1871). *The descent of man, and selection in relation to sex*. London: Murray.
- Darwin, C.R.** (1872). *The expression of emotions in man and animals*. London: Murray.
- Dunbar, R.I. M. & Barrett, L.** (Eds.). (2007). *Oxford handbook of evolutionary psychology*. New York: Oxford University Press.
- Gutiérrez, G.** (Ed.). (2018). *Teorías en psicología. Integración y el futuro de la disciplina*. Bogotá: Editorial Manual Moderno.
- Gutiérrez, G. & Papini, M.R.** (Eds.). (2011). *Darwin y las ciencias del Comportamiento*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Hamilton, W.D.** (1964). The genetic evolution of social behavior. I. II. *Journal of Theoretical Biology*, **7**: 1-52.
- Pinker, S.** (2002). *The blank slate*. New York: Penguin Books.
- Strassman, B.I. & Dunbar, R.I. M.** (1998). Human evolution and disease: putting the Stone Age in perspective. In S.C: Stearns (Ed.). *Evolution in health and disease* (pp. 91-101). Oxford: Oxford University Press.
- Tooby, J. H. & Cosmides, L.** (2000). *Evolutionary psychology. Foundational papers*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wilson, E. O.** (1975). *Sociobiology*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Artículo original

Densidad electrónica en regiones H II gigantes

Electron density in giant H II regions

Hernando Efraín Caicedo-Ortiz^{1,2,*}, Hector Osvaldo Castañeda-Fernández³

¹ Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Popayán, Colombia.

² Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México, México.

³ Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, México.

Resumen

Se estudió la densidad electrónica a escala global y punto a punto de las regiones H II gigantes Hubble V y Hubble X, localizadas en la galaxia NGC 6822, utilizando espectroscopia de rendija larga en el espectro visible. Los resultados obtenidos presentan por primera vez una medida de la variación espacial de la densidad electrónica de estas dos regiones H II gigantes, demostrando que poseen un comportamiento no homogéneo en su densidad a nivel local así como un régimen de baja densidad a nivel global y comprobando que la temperatura electrónica tienen una baja incidencia en su determinación.

Palabras clave: Densidad Electrónica; Regiones H II Gigantes; NGC 6822; Hubble V; Hubble X.

Abstract

The electron density on a global and point-to-point scale of Hubble V and Hubble X giant H II regions, located in the galaxy NGC 6822, was studied using long-slit spectroscopy in the visible spectrum. The results obtained present for the first time a measure of the spatial variation of the electron density of these two giant H II regions, showing that they have an inhomogeneous behavior in their density at the local level as well as a low-density regime at the global level, and verifying that the electronic temperature has a low incidence in its determination.

Keywords: Electron density; Giant H II Regions; NGC 6822; Hubble V; Hubble X.

Citación: Caicedo-Ortiz HE, Castañeda-Fernández HO. Densidad electrónica en regiones H II gigantes. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):989-1010, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1464>

Editor: Jairo Roa Rojas

***Correspondencia:**
Hernando Efraín Caicedo Ortiz;
hernando.caicedo@uniautonomo.edu.co

Recibido: 6 de mayo de 2021

Aceptado: 15 de agosto de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Introduction

En los años 30 del siglo XX, **Struve y Elvey** (1934) encontraron que grandes regiones de la Vía Láctea tenían espectros de líneas de emisión, en particular, las líneas de Balmer del

¹ Correspondencia: hernando.caicedo@uniautonomo.edu.co

² Fallecido en 2020.

hidrógeno. Este descubrimiento proporcionó un indicio claro de que una fracción considerable del hidrógeno -*el elemento más abundante en el medio interestelar*- debía estar ionizado. Un ejemplo de objetos astronómicos compuestos fundamentalmente por hidrógeno ionizado son las regiones H II (**Osterbrock y Ferland, 2006**), que son un tipo particular de nebulosas gaseosas, e incluye a otros objetos como las nebulosas planetarias y los remanentes de supernova.

Strömgren (1939) creó el primer modelo teórico de regiones H II, en el cual una estrella masiva y caliente (de tipo espectral O o B temprano) se encuentra inmersa en un medio interestelar de densidad constante. Strömgren descubrió que bajo estas circunstancias, la radiación estelar ultravioleta ioniza la mayor parte del hidrógeno, formando una zona esférica concéntrica con la estrella, alrededor de la cual se encuentra una segunda zona con hidrógeno neutro, por lo que un observador debe percibir un borde bien definido. Este modelo es conocido como la esfera de Strömgren (**Strömgren, 1939**). En la actualidad, la visión de la estructura de las regiones H II ha cambiado radicalmente en los últimos 80 años, pasando de ser objetos con una simetría esférica simple a estructuras asimétricas complejas (**Osterbrock y Ferland, 2006; Caicedo-Ortiz, 2011; Geen et al., 2017; Haworth et al., 2018; Campbell-White et al., 2020; Pellegrini et al., 2020; Fleming, 2021**) y donde se ha propuesto el uso de métricas alternas como la dimensión fractal (**Caicedo-Ortiz et al., 2015; Caicedo-Ortiz et al., 2017**) para la clasificación morfológica de estas regiones de formación estelar.

Debido a las grandes distancias a las cuales se encuentran, las regiones H II con tamaño y brillo similares a las de la nebulosa de Orión son intrínsecamente débiles, lo cual las hace difíciles de detectar desde observatorios terrestres, por este motivo, las que se observan en otras galaxias deben ser de gran tamaño, del orden de cientos de parsec y mucho más brillantes que la mayoría de las que se pueden ver en la Vía Láctea. A estos objetos se les denomina regiones H II Gigantes (**Osterbrock y Ferland, 2006**) y presentan una masa ionizada del orden de $10^3 - 10^6 M_{\odot}$. La gran diferencia con las regiones H II normales es que están ionizadas por grandes conglomerados o cúmulos de estrellas calientes, los cuales son del orden de 10^5 estrellas ionizantes.

La densidad electrónica (N_e) y temperatura electrónica (T_e) son los dos parámetros fundamentales que permiten caracterizar las regiones H II. A través de ellos es posible calcular la masa del gas ionizado, la estructura de ionización, interpretar el espectro de emisión y calcular su composición química. Diferentes modelos para la distribución del gas en las regiones H II dan como resultado distintos espectros teóricos (**Stasińska, 1980**). **Rubin (1968)** demostró que los métodos empíricos empleados para determinar las propiedades físicas del gas ionizado (densidad, abundancias químicas) basados en propiedades integrales a través de la nebulosa, están sujetos a errores debido a las variaciones de la densidad electrónica interna. Los modelos teóricos asumen generalmente que la densidad es homogénea y uniforme en la nebulosa, con una simetría esférica (**Evans y Dopita, 1985**). Los valores de densidad reportados en la literatura corresponden en su mayoría a la luz integrada de la nebulosa o a las zonas de mayor brillo.

Para construir un modelo realista de una región H II, es fundamental conocer la estructura del gas ionizado que lo constituye. Los estudios de la variación de la densidad con respecto a la posición (**Castañeda et al., 1992; Caicedo-Ortiz, 2011**) son escasos y altamente complejos de realizar debido a la baja señal-ruido (S/N) de las líneas de emisión del doblete de azufre y a su bajo brillo superficial. La mayoría de estudios sobre regiones H II se concentran en analizar el aspecto morfológico (**Maíz-Apellániz et al., 2004b; A. Peimbert et al., 2005; Osterbrock y Ferland, 2006; Caicedo-Ortiz et al., 2015**) y determinar otras características como su composición ó metalicidad (**Maíz-Apellániz et al., 2004b; A. Peimbert et al., 2005; Osterbrock y Ferland, 2006; Relaño et al., 2010; Pérez Oregón et al., 2014; Caicedo-Ortiz y Castañeda Fernández, 2019**). En este artículo se presenta el primer

estudio a alta resolución espacial que describe la estructura de la densidad punto a punto y la densidad integrada de las dos regiones H II gigantes extra galácticas más cercanas a nuestra galaxia, que son Hubble V y Hubble X.

Objetos de estudio

0.1. NGC 6822

La Galaxia de Bernard o NGC 6822 (DDO 209), es una galaxia irregular que pertenece al Grupo Local (Figura 1). En su artículo histórico, **Hubble** (1925) presentó su descubrimiento de las cefeidas en esta galaxia, lo que que convirtió a NGC 6822 en el primer objeto reconocido como verdaderamente extragaláctico fuera de la Vía Láctea. Esta galaxia se encuentra ubicada a una distancia de 490 ± 40 kpc (**Mateo**, 1998). En la Tabla 1 se presentan las características más relevantes de esta galaxia irregular.



Figura 1. Galaxia irregular NGC 6822, localizada en el Grupo Local. Composición formada por observaciones realizadas con el instrumento Wide Field Imager, del Telescopio MPG/ESO de 2.2 metros en el Observatorio La Silla de ESO y los datos recogidos por ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array). Créditos: ESO, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/A. Schrubba, VLA (NRAO)/Y. Bagetakos/Little THINGS.

En el óptico, NGC 6822 tiene una barra dominante (**de Vaucouleurs et al.**, 1991), con una distribución irregular de asociaciones OB (**Wilson**, 1992) y regiones H II (**Hodge et al.**, 1988). La magnitud absoluta es $m_b = -15.1$ (**Lee et al.**, 2006) y su radio en el óptico es de $2.9 \text{ kpc} \times 2.9 \text{ kpc}$ (**Mateo**, 1998). La población estelar de esta galaxia, así como su historia de formación estelar han sido reportados por (**Gallart et al.**, 1996a, 1996b; **Hutchings et al.**, 1999; **Tolstoy et al.**, 2001; **Wyder**, 2001; **Clementini et al.**, 2003).

NGC 6822 ha sido observada en otras longitudes de onda diferentes al óptico, con el fin de estudiar el medio interestelar (ISM), su dinámica y localizar los lugares con alta formación estelar. Cabe resaltar los estudios de esta galaxia en radio (**Gottesman y Weliachew**, 1977; **Israel**, 1997), infrarrojo (**Gallagher et al.**, 1991), UV (**Longo y Ceriello**, 1991) y rayos X (**Eskridge y White**, 1997). Recientes observaciones con Spitzer en el infrarrojo ha sido realizadas por **Cannon et al.** (2006), así como estudios con Chandra para la detección de fuentes de rayos X (**Tennant**, 2006). De igual forma, existen trabajos en los cuales ha sido cartografiado el gas atómico (**de Blok y Walter**, 2000; **Weldrake et al.**, 2003), el gas molecular (**Israel et al.**, 2003) así como el CO sobre NGC 6822 (**Gratier et al.**, 2010).

Propiedad	Valor	Referencias
Tipo morfológico	IB(s)m IV-V	The NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)
Nombres Alternos	DDO 209, IC 4895	The NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)
RA(J2000)	19 ^h 44 ^m 56 ^s .4	(Brandenburg y Skillman, 1998)
DEC((J2000)a)	-14 48 04.5	(Brandenburg y Skillman, 1998)
Ángulo de Posición (deg)	120	(Brandenburg y Skillman, 1998)
Inclinación (deg)	50.1	(Brandenburg y Skillman, 1998)
Distancia	0.47–0.50 Mpc	(Pietrzyński et al., 2004)
Escala lineal angular en esta distancia	2.3–2.4 pc seg arc ⁻¹	(Lee et al., 2006)
Velocidad Heliocéntrica	-54 km s ⁻¹	(Mateo, 1998)
Longitud de escala del disco, r_{exp} , (min arc)	3.0 ± 0.1	(Letarte et al., 2002)
D_{25} (arcmin)	15.5	(Karachentsev et al., 2004)
B_T	9.32	(Karachentsev et al., 2004)
$E(B - V)$	0.236	(Karachentsev et al., 2004)
M_B	-15.1	(Lee et al., 2006)
Flujo integral en 21 cm, F_{21}	2339 (Jy km s ⁻¹)	(Karachentsev et al., 2004)
$\langle 12 + \log(O/H) \rangle$, A-sg ³	8.36 ± 0.19	(Venn et al., 2001)
$\langle 12 + \log(O/H) \rangle$, H II ⁴	8.11 ± 0.10; 8.10	(Lee et al., 2006; Hidalgo-Gómez et al., 2001)

Tabla 1. Datos Básicos de NGC 6822.

0.2. Hubble V y Hubble X

Hubble V y Hubble X forman parte del gran complejo de regiones H II que se encuentra ubicados al norte de la barra de la Galaxia de Bernard (NGC 6822), donde también están las regiones Hubble I y II (Hubble, 1925; Hodge et al., 1988), así como varias asociaciones OB relativamente luminosas (Wilson, 1992; Hodge et al., 1989).

En la Figura 2(c) se aprecia la ubicación de Hubble V y Hubble X en NGC 6822. Cada recuadro abarca una región H II. Hubble V se encuentra en la parte derecha de la imagen, mientras que Hubble X se ubica en la parte izquierda. Hubble V (Figura 2(a)) y Hubble X (Figura 2(b)) tienen un tamaño en el óptico de 112 pc y 143 pc respectivamente (Hodge et al., 1989; Tomita et al., 1993) y son las dos regiones H II más luminosas de NGC 6822, separadas entre sí por una distancia de 320 pc.

Estudios en el rango del espectro visible han permitido describir la morfología de estas regiones. Un particular interés ha tenido la fotometría de regiones H II, debido al uso potencial que tiene el utilizar regiones H II gigantes extragalácticas en la determinación de distancias a escala extragaláctica (Roy y Arsenault, 1986; Shields, 1990; De Grijs, 2011; Relano et al., 2005). Kennicutt (1979) obtuvo flujos fotoeléctricos en H α para Hubble V y Hubble X, mientras que Hodge et al. (1989); Collier y Hodge (1994) empleando tecnologías con CCD, determinaron el flujo de H α para 145 regiones. Los mapas de flujos de emisión en H α de Hubble V y Hubble X fueron presentados por Collier y Hodge (1994) como mapas de isocontornos del brillo de estas regiones. Estudios posteriores reportados por O'Dell et al. (1999) y Bianchi et al. (2001) hicieron uso del Telescopio Espacial Hubble (HST) y presentaron una luminosidad en H α de 4.8×10^{-12} erg cm⁻² s⁻¹ para Hubble V y 3.8×10^{-12} erg cm⁻² s⁻¹ para Hubble X. O'Dell et al. (1999) concluyó que estas regiones son ópticamente gruesas y propuso que el brillo de las regiones H II en H α puede ser una herramienta útil para cuantificar la radiación ultravioleta y la tasa de formación estelar. Utilizando datos obtenidos del VLT, A. Peimbert et al. (2005) obtuvieron la temperatura, densidad y abundancias para Hubble V y Hubble X. Estudios sobre la densidad electrónica

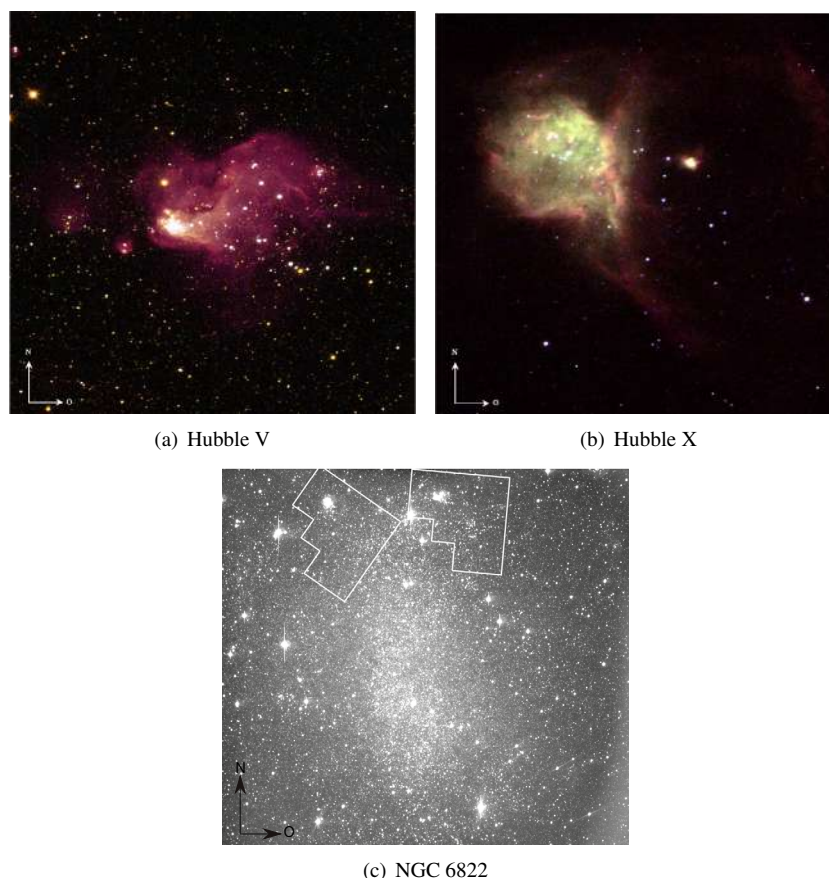


Figura 2. (a) Hubble V. (b) Hubble X. (c) Imagen de 68'' x 630'' de NGC 6822 centrada a 19h 44m 54s, 14°47'39'' (E2000) obtenida con un filtro V [29]. La región que comprende a Hubble V se observa en la parte superior derecha de la imagen (“oeste”), mientras que Hubble X se ubica en la parte superior izquierda (“este”). Créditos: NASA, ESA y el Hubble Heritage Team (STScI / AURA) (O’Dell et al., 1999).

de Hubble V y Hubble X se han realizado considerando espectros integrados que abarcan a cada una de estas regiones (Castañeda et al., 1992; A. Peimbert et al., 2005), pero no punto a punto con una alta resolución, tal como se presenta en este trabajo.

Observaciones y reducción de datos

Los espectros utilizados fueron obtenidos del Centro de Datos adscrito al *Cambridge Astronomical Survey Unit (CASU)* en el Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge. Las observaciones se realizaron entre el 18 y 19 de agosto de 1992, con el espectrógrafo ISIS⁵ del Telescopio William Herschel de 4.2 metros, en Islas Canarias, España, empleando la técnica de rendija larga. Para Hubble V se obtuvieron 4 espectros y para Hubble X 8 espectros (las observaciones se realizaron cambiando la posición de la rendija en la dirección norte a sur). Cada espectro corresponde a una diferente posición de la rendija, sobre cada una de las regiones H II. En la figura 3 se presenta las posiciones de las rendija en la dirección norte-sur (eje y) para cada una de las observaciones realizadas.

⁵<http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/isis/index.html>

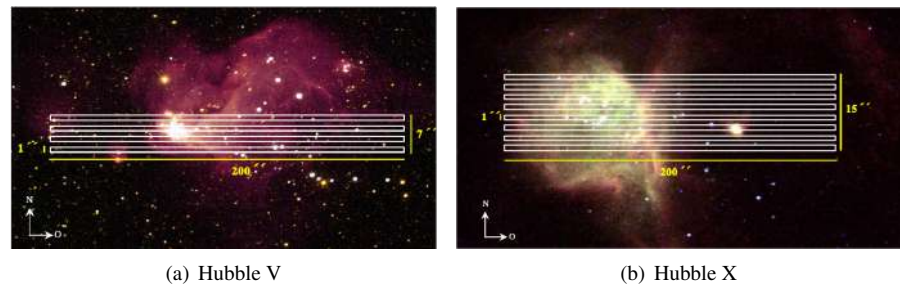


Figura 3. Posiciones de la rendijas durante las observaciones en (a) Hubble V y (b) Hubble X. Imágenes adaptadas de Hubble Heritage Team (STScI / AURA) (O'Dell et al., 1999) O'Dell et al. (1999).

Todas las observaciones se realizaron a P.A. de 90° , con un ancho efectivo para cada observación de $1''$ con una separación de $2''$ entre los centros de cada dos posiciones consecutivas de la rendija. Se tomaron dos espectros de forma simultánea para cada posición, una para el brazo rojo, en el rango comprendido entre 6390 \AA y 6849 \AA y otra en el brazo azul entre 4665 \AA y 5065 \AA (estos no fueron utilizados en el presente trabajo), con una dispersión aproximada de 0.4 \AA/pixel . El tiempo de exposición para cada espectro obtenido en cada posición de la rendija fue de 1000 s para Hubble V y de 1200 s para Hubble X. La rendija tenía una longitud de $200''$, con un muestreo espacial a lo largo de la rendija de $0.34''/\text{pixel}$ en el brazo rojo (Chip EEV3) y $0.36''/\text{pixel}$ en el brazo azul (Chip TEK1).

Los datos fueron reducidos utilizando las técnicas estándar (sustracción de bias, corrección de campo de flat) y calibración en longitud de onda, usando el software **IRAF** (Image Reduction and Analysis Facility)⁶.

Para determinar la densidad de las regiones H II, es fundamental medir con alta precisión las líneas de emisión de [S II] $\lambda\lambda 6717, 6731$. Para ello, se fijó y ajustó la diferencia de longitud de onda de 14.38 \AA entre estas dos líneas, imponiendo que ellas tengan el mismo ancho y dejando libre la razón de flujos, ya que tal razón aritmética es un indicador de la densidad electrónica presente en el medio. Las medidas de los flujos de las dos líneas de emisión del azufre doblemente ionizado [S II], con los parámetros antes mencionados, se realizaron con el paquete DIPSO dentro del entorno Starlink⁷ (Currie et al., 2014). Por la forma como se obtuvieron los espectros para este estudio y debido a la naturaleza adimensional de la razón R de [S II] no fue necesario realizar una calibración por flujo a los espectros.

Cálculo de la densidad electrónica de regiones H II gigantes

El azufre doblemente ionizado [S II] es un ión que posee una configuración electrónica p^3 . Considerando una aproximación de primer orden de los niveles superiores, el cociente entre la intensidad de las transiciones $^2D_{5/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$ (6717.4) y $^2D_{3/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$ (6730.8) resulta ser una función de la densidad electrónica. Para el caso del límite de baja densidad, $N_e \rightarrow 0$ y cada excitación colisional es seguida por la emisión de un fotón, por lo tanto :

⁶El software de reducción de datos astronómicos **IRAF** se distribuye por el National Optical Astronomy Observatories (NOAO), operado por la Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. (AURA) bajo el acuerdo de cooperación con la National Science Foundation. Disponible en <http://iraf.noao.edu/>

⁷Software disponible en <http://star-www.rl.ac.uk/>

$$\frac{S_{31}}{S_{32}} = \frac{A_{31}}{A_{32} + \frac{\Omega_{12}}{\Omega_{13}}(A_{31} + A_{32})e^{\Delta-E_{23}/kT}}, \quad (1)$$

donde S_{31} y S_{32} es el número de fotones emitidos por unidad de tiempo y de volumen para las transiciones $3 \rightarrow 1$ y $3 \rightarrow 2$ y A_{31} y A_{32} son los coeficientes de emisión espontánea de Einstein, en unidades de s^{-1} para las mismas transiciones (**López Sánchez, 2006**). No se considera el valor de la exponencial E_{23} debido a que es muy pequeño y hemos asumido que $A_{31} \gg A_{32}$ debido a que la transición 3-2 tiene tiempos característicos más elevados que la transición 3-1 (**Osterbrock y Ferland, 2006; López Sánchez, 2006**). Empleando las fuerzas de colisión para el ion S^+ , encontramos que $S_{31}/S_{32} = 1.42$ en el rango del límite de baja densidad. Para el límite de alta densidad, $N_e \rightarrow \infty$, predominando las excitaciones y desexcitaciones colisionales, donde el cociente de poblaciones (de Boltzmann) es:

$$\frac{S_{31}}{S_{32}} = \frac{A_{31} g_3}{A_{32} g_2} e^{\Delta-E_{23}/kT} \approx \frac{A_{31} g_3}{A_{32} g_2}, \quad (2)$$

donde g_3 y g_2 son los pesos estadísticos de los niveles 3 y 2. Para el ion S^+ , el valor de este cociente en el límite de alta densidad es $S_{31}/S_{32} = 0.44$. En el caso real, el cociente S_{31}/S_{32} posee valores comprendidos entre estos dos límites. Así, la densidad es una función monótona del cociente de intensidades, que depende débilmente de T_e . La gran mayoría de regiones H II se encuentran en el límite de baja densidad y para los casos en los cuales se desconoce o bien no se puede medir, se considera generalmente que su densidad es $N_e \leq 100 \text{ cm}^{-3}$.

Para densidades intermedias, es necesario solucionar el átomo de cinco niveles. En la literatura se encuentran soluciones numéricas (**Stanghellini y Kaler, 1989**), programas que permiten realizar dicho cálculo (**De Robertis et al., 1987**) y soluciones analíticas para un tratamiento más simplificado, considerando el modelo de átomo de tres niveles (**Aller, 1984; McCall, 1984**).

Una solución analítica que considera el modelo del átomo de cinco niveles es propuesto por **Castañeda et al. (1992)**, donde se incluyen las posibles transiciones de radiación, excitación colisional, desexcitación colisional del [S II] en la configuración $2p^3$ entre los niveles 4S , 2D y 2P , a partir del esquema propuesto por **Seaton y Osterbrock (1957)**, sin considerar las transiciones $^2P_{1/2} - ^2P_{3/2}$ y $^2D_{3/2} - ^2D_{5/2}$. En este modelo no se consideran los niveles 2P cuando se calculan las poblaciones en 2D . Esta aproximación es válida para $N_e \leq 10^4 \text{ cm}^{-3}$, es decir, los valores de densidad deben ser menores que la densidad crítica cuando la razón de desexcitación colisional es igual a la razón de radiación espontánea para el [S II] (**Zheng, 1988; López Sánchez, 2006**). La solución analítica de primer orden de x (donde $x = N_e 10^{-4} t^{1/2}$ y $t = 10^{-4} T_e$) queda definida como (**Castañeda et al., 1992**):

$$R = \frac{S_{31}}{S_{32}} = \frac{I(\lambda 6717)}{I(\lambda 6731)} = 1.45 \frac{1 + 4.18x}{1 + 13.42x}. \quad (3)$$

Computacionalmente, la densidad de las regiones H II se calcula a partir del valor de R , utilizando la rutina **TEM DEN** de IRAF (**Shaw y Dufour, 1995**), la cual incorpora el programa **FIVEL** (**De Robertis et al., 1987**) que reproduce el comportamiento de un átomo con cinco niveles.

En la Figura 4 se presenta la solución analítica propuesta por **Castañeda et al. (1992)**, la solución para el átomo de tres niveles de **McCall (1984)** y los resultados numéricos obtenidos para la solución del átomo de cinco niveles, obtenidos usando el programa **FIVEL**

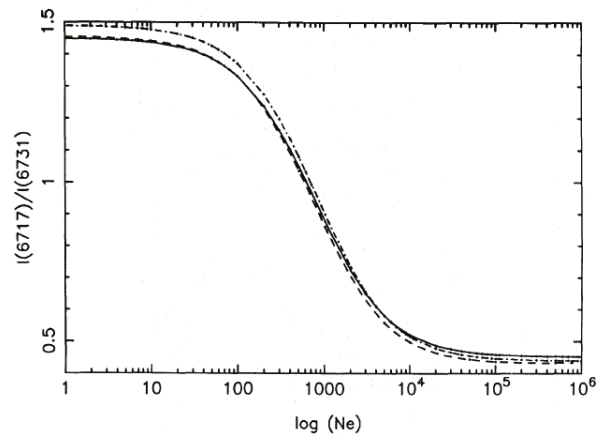


Figure 4. Comparación entre las solución numérica obtenida con el programa FIVEL (De Robertis et al., 1987) (—), el átomo de tres niveles (McCall, 1984) (---) y la solución aproximada del átomo de 5 niveles (Castañeda et al., 1992) (-.-), todas para $T_e = 10^4$ K. Imagen adaptada de Castañeda et al. (1992).

(De Robertis et al., 1987), incorporado actualmente en la tarea *temden* del paquete **Nebular** de **IRAF** (Shaw y Dufour, 1995). Existe una alta concordancia entre los valores de densidad obtenidos por la solución numérica del átomo de 5 niveles y los calculados con la ecuación 3 para $N_e = 100 \text{ cm}^{-3}$, siendo su discrepancia del 4%, mientras que para densidades electrónicas del orden de $N_e = 7 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, la discrepancia aumenta hasta el 20% (Castañeda et al., 1992).

0.3. Cálculo de la densidad electrónica a partir de las observaciones

Los flujos de las líneas de [S II] fueron medidos con la rutina DIPS0⁸. Esta herramienta ofrece la ventaja de calcular los errores asociados a cada una de las cantidades determinadas por el mismo. El error de [S II] ha sido cuantificado usando la relación dada por Oliveira (2009):

$$\Delta R = \frac{I_{6717}}{I_{6731}} \sqrt{\frac{\Delta I_{6717}}{(I_{6717})^2} + \frac{\Delta I_{6731}}{(I_{6731})^2}}, \quad (4)$$

donde ΔR es el error calculado para la razón R de [S II], I_{6717} e ΔI_{6717} son la intensidad y el error asociado a la medida de la línea [S II] $\lambda 6717$, I_{6731} e ΔI_{6731} son la intensidad y el error asociado a la medida de la línea [S II] $\lambda 6731$.

Para determinar la densidad electrónica de Hubble V y Hubble X, se utilizó la tarea *temden* del paquete **Nebular** de **IRAF**, la cual converge a una solución a partir de la razón R de flujo de las líneas de [S II] que se encuentran en el intervalo de 0.46 a 1.42, donde es posible obtener valores de densidad positivos.

El proceso de creación de los espectros unidimensionales se realizó para los 4 espectros de Hubble V y los 8 espectros de Hubble X. Con los espectros unidimensionales, se seleccionó únicamente aquellos para los cuales la S/N de la emisión de [S II] $\lambda\lambda 6717, 6731$

⁸DIPS0 es una herramienta de análisis espectral del proyecto Starlink y se encuentra disponible en <http://starlink.jach.hawaii.edu/starlink/>

existiera, fuera claramente identificable y que pudiera ser cuantificado con el programa DIPSO.

Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a partir de las observaciones espectroscópicas de las regiones H II gigantes Hubble V y Hubble X.

0.4. Hubble V

En las Figuras 5(a) - 5(d) se observan los perfiles de emisión en H α y la razón R de las líneas de emisión de [S II] $\lambda\lambda 6717, 6731$ para las 4 posiciones de la rendija sobre Hubble V. En las observaciones, la primera rendija fue ubicada en la sección norte de la zona central de Hubble V, con P.A. = 90°. Para las subsiguientes posiciones, se desplazó la rendija en la dirección norte-sur (eje y) cada 2" respecto a su centro, manteniendo P.A. = 90°. La línea roja en 1.42 es la cota máxima de R para la cual es posible obtener un valor positivo de densidad, tal como se mencionó en la sección 0.3.

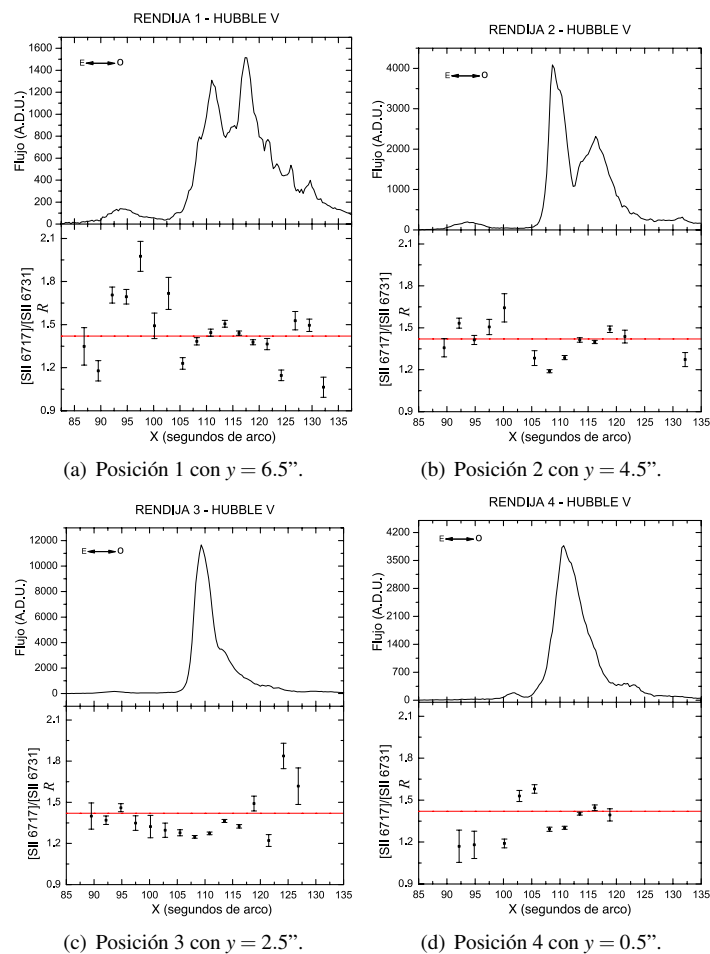


Figura 5. Perfil espacial del flujo en H α (en A.D.U) y la razón R de [S II] $\lambda\lambda 6717/\lambda 6731$ para cada una de las diferentes 4 posiciones en Hubble V. a P.A. = 90°. La línea roja en $R = 1.42$ representa la cota superior para la cual la densidad es positiva.

0.5. Hubble X

En las Figuras 6(a) a 7(d) se presentan los perfiles de emisión en $H\alpha$, la razón de flujo (R) de las líneas $[S II] \lambda\lambda 6717, 6731$. De forma similar a Hubble V, las observaciones en Hubble X se realizaron ubicando la primera rendija en la sección norte de la zona central de Hubble X, con P.A. = 90° . Las subsecuentes observaciones se obtuvieron al desplazar la rendija en la dirección norte-sur manteniendo P.A. = 90° . De forma similar a Hubble V, en las figuras de Hubble X la línea roja representa el máximo valor de R para el cual es posible determinar un valor de densidad electrónica positivo.

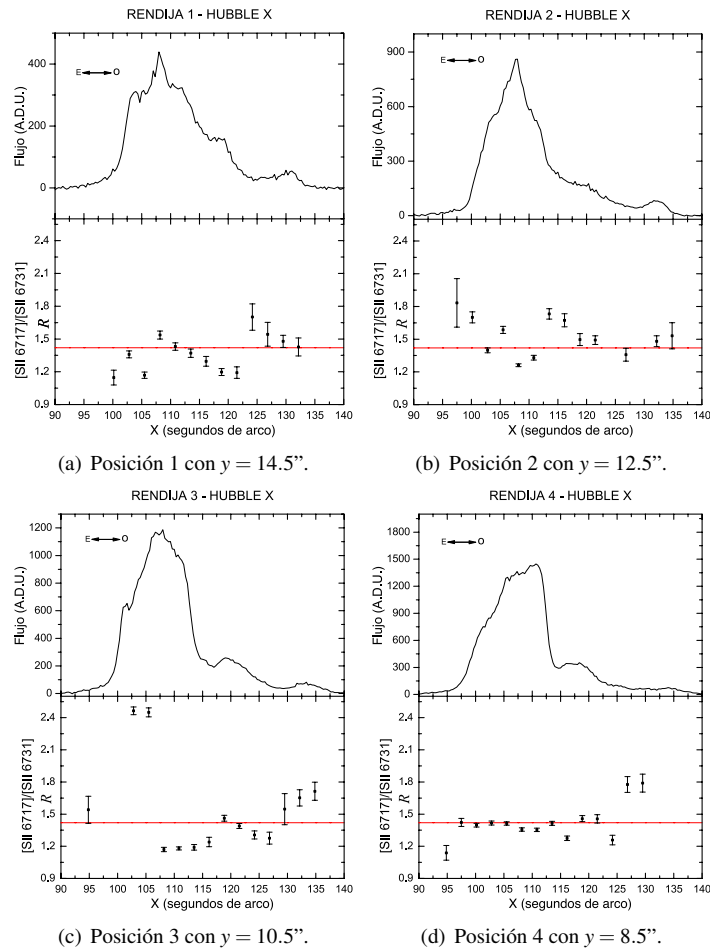


Figura 6. Perfil espacial del flujo en $H\alpha$ en A.D.U. y la razón R de $[S II] \lambda\lambda 6717/\lambda 6731$ para las posiciones 1-4 en Hubble X a P.A. = 90° . La línea roja en $R = 1.42$ representa la cota superior para la cual la densidad es positiva.

Discusión

0.6. Espectros punto a punto

Los gráficos en la parte superior de las figuras 5(a) - 5(d) y 6(a) - 7(d) presentan el flujo en $H\alpha$ punto a punto a lo largo de la rendija para cada una de las distintas posiciones en Hubble V y Hubble X. Los resultados asociados a la variación espacial de la razón R en

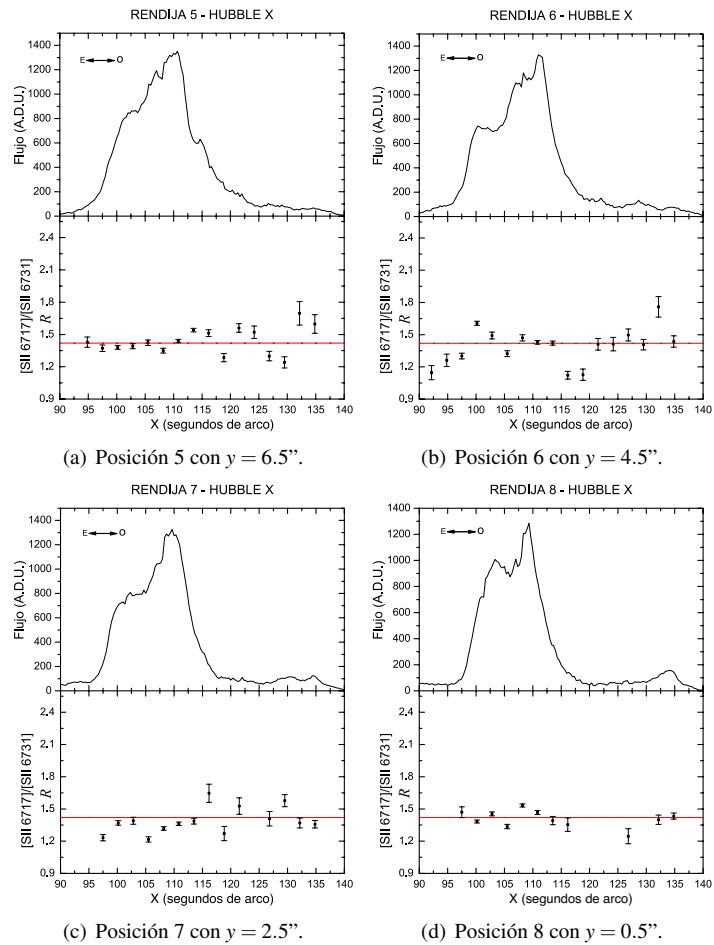


Figura 7. Perfil espacial del flujo en H α en A.D.U. y la razón R de $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731$ para las posiciones 5-8 en Hubble X a P.A. = 90° . La línea roja en $R = 1.42$ representa la cota superior para la cual la densidad es positiva.

Hubble V y Hubble X se presentan en las gráficas inferiores de las figuras 5(a) - 5(d) y 6(a) - 7(d). La razón R entre las líneas de emisión de $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731$ es un fuerte indicador de la densidad electrónica y en los resultados que se reportan en este trabajo se pone en evidencia la variación espacial de esta propiedad en Hubble V como en Hubble X.

En Hubble V se observó que la razón de flujo del doblete de azufre está en el intervalo $1.06 \leq R \leq 2.0$, es decir, $N_e \leq 495 \text{ cm}^{-3}$, lo que corresponde a un régimen de baja densidad (Castañeda et al., 1992). Se detectó en esta región una variación espacial sistemática de la razón de $[S II]$ en la zona correspondiente al núcleo principal de esta región H II. Aunque en las observaciones realizadas sobre la zona de la primera rendija (Figura 5(a)) no se identificó una variación sistemática de la densidad (gradiente de densidad), este comportamiento si es visible en las otras tres posiciones restantes de las rendija (Figuras 5(b) - 5(d)) y que conforman nuestro conjunto total de observaciones para Hubble V. En esta región H II es visible un patrón común en el comportamiento de la densidad electrónica y es el hecho de que para el punto de máximo brillo superficial se encuentra asociado un bajo valor de R , o lo que es equivalente, un alto valor de la densidad electrónica, la cual disminuye a medida que nos alejamos de este punto. Castañeda et al. (1992) y Copetti et al. (2000) afirmaron que una característica distintiva en regiones H II con gradiente de

densidad es presentar un pico de densidad electrónica en la zona de máximo brillo superficial, siendo esta una propiedad visible en Hubble V. **Castañeda et al.** (1992) proponen una metodología para la construcción de un modelo matemático que reproduzcan la variación del brillo superficial de la región H II en función de su densidad electrónica y considerando que en la región se identifican gradientes de densidad. Este modelo considera que la densidad varía radialmente, desde el centro de la región H II, con un punto de máxima densidad. Debido al poco número de puntos disponibles en nuestras observaciones en Hubble V para los cuales $R \leq 1.42$ y tomando en cuenta que el gradiente de densidad identificado en esta región abarca una zona de poca extensión en comparación con el tamaño total de Hubble V, no es posible construir un modelo de este tipo, pero es posible discutir semejanzas con los resultados previos. Una característica relevante identificada en Hubble V, es el hecho que en las regiones con gradientes de densidad se tienen zonas de alto brillo o núcleos en las cuales se detecta una gran cantidad puntos con altos valores de densidad, mientras que en las zonas restantes el comportamiento de N_e en general está en el límite convencional de baja densidad ($N_e \leq 100 \text{ cm}^{-3}$).

Para Hubble X, el comportamiento de la razón R es completamente diferente al observado en Hubble V. En esta región H II no son visibles las variaciones o cambios sistemáticos de la densidad electrónica en función de la posición, donde R describe un comportamiento más plano, a excepción de algunos puntos aislados que aleatoriamente presentan altos valores de densidad. La razón de flujo del doblete de azufre está en el intervalo $1.10 \leq R \leq 2.5$, es decir, que la densidad electrónica es menor a $N_e \leq 412 \text{ cm}^{-3}$, lo que corresponde a un régimen de baja densidad. Estos resultados concuerdan con lo reportado por **Castañeda et al.** (1992) para esta región H II, el cual se realizó observando 6 puntos a lo largo de Hubble X, en los cuales se determinó la razón R , donde solo tres de ellos están por debajo de 1.4 y muy cercanos entre sí. En nuestro estudio, el análisis de la densidad de Hubble X se sustenta en observaciones que arrojan un conjunto de 115 puntos con una alta S/N , donde se detectó y midió el doblete de azufre. Un estudio similar para un gran conjunto de regiones H II (S 255, S 257, S 271, S 285, S 301, S 305, NGC 3372 e IC 1275) presentó que no fue posible identificar variaciones espaciales sistemáticas en la densidad (**Copetti et al.**, 2000).

La existencia de distintos estudios que contienen información sobre las variaciones punto a punto de la densidad electrónica N_e en otras regiones H II gigantes concuerdan cuantitativamente con los resultados obtenidos en este trabajo. **White** (1981) presentó un estudio de la variación espacial de la densidad electrónica sobre el núcleo de 30 Doradus (NGC 2070), utilizando el doblete de $[\text{O II}]\lambda\lambda 3726, 3729$. La densidad para esta región está en el intervalo de $500 - 700 \text{ cm}^{-3}$ para las posiciones en las cuales fue posible medir las dos líneas, encontrando que el valor máximo de N_e se localiza en el punto más brillante de esta región. **Cantó et al.** (1980) miden la línea de separación del doblete de $[\text{O II}]$ en 30 Doradus, obteniendo valores de densidad electrónica que fluctúan en el orden de 200 cm^{-3} a 1000 cm^{-3} . **Rosa y Solf** (1984) presentaron mediciones de N_e para NGC 604 en su zona de alto brillo superficial, obteniendo un rango de valores de $50-200 \text{ cm}^{-3}$. Un estudio reciente para H II (NGC 604) fue realizado por **Maíz-Apellániz et al.** (2004a), empleando la misma técnica y configuración en sus observaciones que las utilizadas en este trabajo. Para 10 posiciones diferentes de la región sobre NGC 604, **Maíz-Apellániz et al.** (2004a) construyó mapas de la razón R en los cuales para la mayor cantidad de puntos obtiene valores de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731 \geq 1.30$, lo que corresponde a un régimen de baja densidad. Tan solo algunos puntos en esta región presentan valores de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731 \approx 1.30$. No se observa una alta discrepancia en sus resultados y en ambos estudios se describe un comportamiento de la densidad electrónica dentro del régimen de baja densidad. **Relaño et al.** (2010) reportó determinó la densidad punto a punto de NGC 595 utilizando la técnica de Espectroscopía de Campo Integral (IFS). El rango de la razón de las líneas de azufre R es de 1.2 a 1.8 ($N_e \leq 220 \text{ cm}^{-3}$), lo cual muestra que esta región H II tiene baja densidad, corroborando lo encontrado en estudios anteriores por **Esteban et al.** (2009) y **Vílchez et**

al. (1988). Según **Relaño et al.** (2010), la distribución de la densidad de electrones en NGC 595 no presenta fuertes variaciones ni una tendencia con la distribución de emisión en H α . Sin embargo, en la figura 7 de **Relaño et al.** (2010) sí se identifica que las altas emisiones en la distribución de emisión están acompañadas de altos valores de densidad, lo que contradice este último resultado. **Lagrois y Joncas** (2009) realizan un estudio similar de esta región H II empleando la técnica de espectroscopía de Fabry-Perot. En sus resultados presentan un mapa bidimensional de densidad de NGC 595 que se extiende en un campo más amplio que el de **Relaño et al.** (2010). En la zona de emisión de H α no se observan fuertes variaciones en la densidad fluctuando de 60 cm⁻³ a 150 cm⁻³. En términos generales estos trabajos confirman que en los estudios de alta resolución de densidad en regiones H II, es común encontrar puntos o zonas con altos valores de densidad, i.e. $N_e > 300$ cm³. Asociamos estos altos valores a puntos en las regiones H II como pequeños grumos de gas o filamentos altamente densos. Sin embargo los efectos de estas zonas son muy pequeños en comparación con el comportamiento global de la región H II, el cual para todos los casos reportados en este estudio se encuentran en el régimen de baja densidad, tal como era esperado.

Resulta fundamental comprobar el grado de validez de estos resultados y conocer que factores son las fuentes de error asociadas al proceso de cuantificar la densidad electrónica. La dependencia de la razón en función de la temperatura electrónica no es tan fuerte en el rango de temperaturas consideradas para estas regiones H II. La temperatura electrónica típica para regiones H II han sido estimadas en el rango 8000 K a 15000 K (**Pagel et al.**, 1980; **Rayo et al.**, 1982; **Shields**, 1990), aunque existen casos especiales de regiones H II, como M51, donde su temperatura es del orden $T_e < 4000$ K (**Diaz et al.**, 1991). Con la finalidad de minimizar los efectos asociados al uso de un valor de la temperatura en el cálculo de la densidad, se recurrió a consultar los distintos estudios previos sobre Hubble V y Hubble X en los cuales se cuantifica T_e (Tabla 2), encontrando que el rango de temperaturas para Hubble V está entre 11000 K y 12000 K mientras que para Hubble X está entre 10500 K y 12000 K.

T_e de Hubble V (K)	T_e de Hubble X (K)	Referencia
11100 \pm 800/600	-	(M. Peimbert y Spinrad , 1970)
11100	-	(Smith , 1975)
11200	10700	(Lequeux et al. , 1979)
11000 \pm 900	11500 \pm 1500	(Pagel et al. , 1980)
11500 \pm 1000	-	(Skillman et al. , 1989)
11800 \pm 50	11950 \pm 600	(Hidalgo-Gómez et al. , 2001)
11860 \pm 540	-	(Lee et al. , 2006)
11000	11500	(Roy y Arsenault , 1986)
11500 \pm 2000	-	(A. Peimbert et al. , 2005)

Tabla 2. Valores de la temperatura electrónica de Hubble V y Hubble X reportados en la literatura.

En la Figura 8 se presenta la densidad calculada con la tarea **temden** de IRAF, para diferentes valores de la razón R de [S II] $\lambda\lambda 6717, 6731$ a distintas temperaturas electrónicas ($T_{e1} = 10000$ K, $T_{e2} = 10500$ K, $T_{e3} = 11000$ K, $T_{e4} = 11500$ K, $T_{e5} = 12000$ K). En

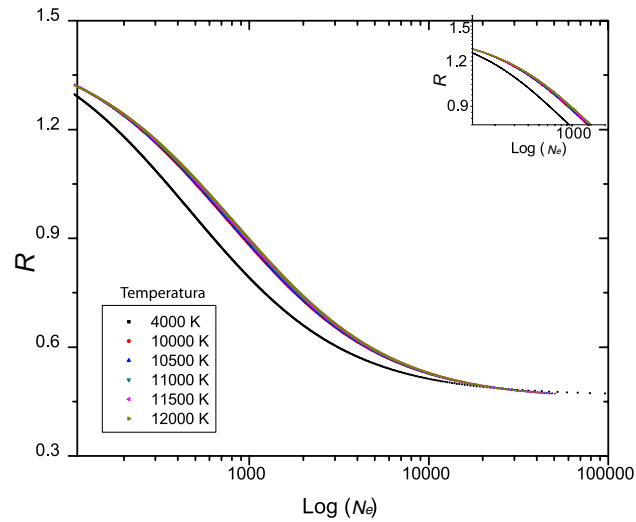


Figura 8. Comportamiento de la densidad electrónica vs razón R de [S II] para distintas temperaturas electrónicas, el cual es indistinguible para el rango de 10000 K a 12000 K.

el intervalo de temperaturas de 10000 K a 12000 K no se observan grandes diferencias en los valores de la densidad. Al considerar el caso extremo reportado por (Díaz et al., 1991) para M51 en el cual su temperatura electrónica es del orden de 4000 K, si se observa una discrepancia en los valores de la densidad en comparación a los obtenidos dentro del rango de 10000 K a 12000 K. Para el rango de temperaturas medidas en las regiones H II estudiadas en este trabajo, la incertidumbre asociada a la elección de la temperatura electrónica para Hubble V y Hubble X no afecta de forma representativa el resultado en el cálculo de la densidad.

En este estudio se consideró que la temperatura electrónica es de 11500 K, siendo este un valor característico para estas dos regiones H II gigantes (Tabla 2). La incertidumbre asociadas a la temperatura electrónica genera un error en el cálculo de la densidad electrónica. Phillips (1998), empleando el modelo de Keenan et al. (1996), determinó que un error en la temperatura electrónica del orden de $\Delta T_e / T_e \sim 0.1$ genera en la densidad un error del orden de $\Delta \log(N_e) \sim 0.02$.

Otra fuente de error a considerar en el cálculo de la densidad resulta del hecho que al estar cerca del límite de baja densidad, esta es una zona prácticamente plana de la relación R vs. N_e . Como consecuencia, un pequeño error en la razón de [S II] se traduce en un gran error en el cálculo de la densidad. Keenan et al. (1996) estiman que una incertidumbre en la razón R de $\Delta R/R \sim 0.2$ puede verse traducida en un error típico de $\Delta \log(N_e) \sim 0.1$. Una forma de minimizar este último error es considerar espectros con una alta S/N, por este motivo, los cálculos de la densidad electrónica que se muestran en las figuras 5(a) - 5(d) y 6(a) - 7(d) fueron realizados a partir de mediciones en espectros unidimensionales obtenidos del promedio de 4 líneas de azufre.

0.7. Espectros integrados

A partir de nuestras observaciones se obtuvo el espectro integrado total para Hubble V y Hubble X. El procedimiento empleado para determinar el espectro integrado es similar al usado para crear cada uno de los espectros unidimensionales. En este caso, se promedian las distintas zonas de todos los espectros (4 para Hubble V y 8 para Hubble X) en los cuales existe emisión del doblete [S II], empleando para ello la tarea *imcombine* de IRAF y creando

para cada región H II un espectro unidimensional. En la tabla 3 se presentan los resultados de la densidad electrónica N_e utilizando el espectro unidimensional integrado de Hubble V y Hubble X, así como los valores de temperatura electrónica T_e (K) reportados en la literatura.

Hubble V		Hubble X		Referencia
N_e (cm^{-3})	T_e (K)	N_e (cm^{-3})	T_e (K)	
< 100	11200	< 100	10700	(Lequeux et al., 1979)
		66^{+84}_{-66}	10000	(Castañeda et al., 1992)
90 ± 75	11500 ± 2000	< 100	-	(A. Peimbert et al., 2005)
< 100	10000 - 12000	< 100	10000 - 12000	(Hidalgo-Gómez y Peimbert, 2007)
140^{+29}_{-27}	11500	< 100	11500	Este estudio

Tabla 3. Densidades y temperaturas electrónicas de Hubble V y Hubble X para espectros integrados.

Hubble V describe una estructura en su perfil de emisión constituido inicialmente por dos máximos de emisión, uno de los cuales se atenúa a medida que se desplaza la rendija hacia el sur en esta región H II. En la zona sur, se observa un perfil con un único pico de emisión (rendija 3 y 4). Hubble X presenta un comportamiento similar. Estos resultados en $H\alpha$ concuerda con los mapas de emisión reportados por Collier y Hodge (1994). El perfil de emisión en $H\alpha$ asociado a Hubble V presenta la misma estructura, aunque con una menor intensidad que las observadas en Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007), como se aprecia en la Figura 9.

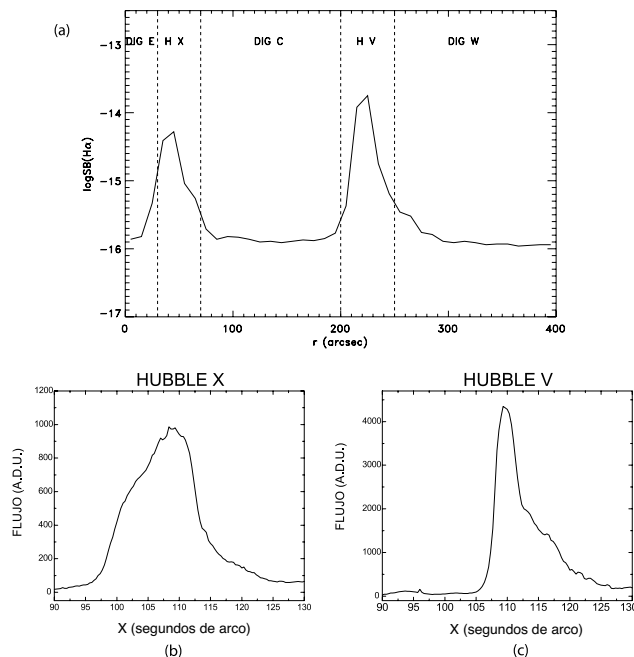


Figura 9. Flujo en $H\alpha$ a lo largo de la posición de la rendija. (a) Flujo de Hubble V y Hubble X presentado por (Hidalgo-Gómez et al., 2001). (b), (c) Flujos integrados de Hubble V y Hubble X reportados en este trabajo. El “este” en todas las figuras se ubica al lado izquierdo.

Para Hubble X, se observó una diferencia en la estructura del perfil de emisión entre el perfil presentado en este trabajo y el reportado por Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007).

Esta aparente discrepancia se explica si se considera que a pesar de que las observaciones se realizaron con el mismo ángulo de posición, existe una diferencia en el ancho de la zona observada. **Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007)** abarcan una zona de Hubble X en la dirección norte-sur con un ancho de 0.5 segundos de arco, mientras que para el perfil reportado en este trabajo, el ancho observado en la misma dirección corresponde a las 8 posiciones de la rendija, cada una con un ancho de 1 segundo de arco y separadas por dos segundos de arco entre los centros de las rendijas. Aunque la técnica empleada en los dos trabajos fueron observaciones con espectroscopía de rendija larga, la principal causa de la diferencia en el tamaño de las zonas de emisión radica en que las observaciones reportadas por Hidalgo se realizaron en un telescopio de 8.2 metros, 4 veces más grande que el telescopio William Herschel con el cual se realizaron las observaciones de este trabajo.

En Hubble V, el perfil de emisión coinciden con el reportado por **Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007)** a pesar de que el área de la región observada es diferente. Esto se debe a que en la zona abarcada por la rendija en la tercera posición presenta un muy alta emisión en $H\alpha$, con un pico de emisión de un orden de magnitud mayor que el medido en las otras tres posiciones de la rendija y con una forma muy similar a la observada por **Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007)**. Al medir el espectro integrado, el perfil de máxima emisión atenúa los efectos de las observaciones restantes, de ahí que coincidan los perfiles de los dos estudios.

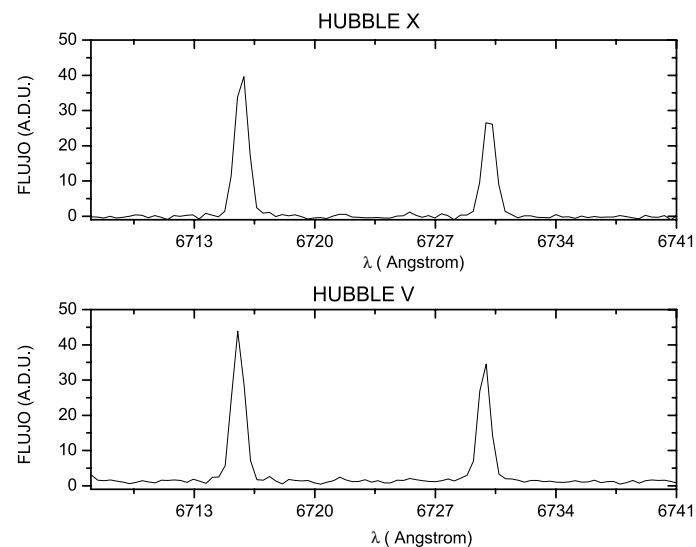


Figura 10. Espectro integrado de emisión del doblete de azufre para Hubble V y Hubble X.

En la Figura 10 se presentan los espectros integrados de Hubble V y Hubble X del doblete de azufre. Es visible un comportamiento dentro del régimen de baja densidad, el cual se corrobora con las medidas de la densidad reportadas en la literatura (**Lequeux et al., 1979; Castañeda et al., 1992; A. Peimbert et al., 2005; Hidalgo-Gómez y Peimbert, 2007**). La causa de la diferencia en el valor de la densidad obtenido por **A. Peimbert et al. (2005)** se debe al uso de rendijas que cubren una mayor área de observación en comparación a las observaciones utilizadas en este trabajo.

Conclusiones

En este trabajo se determinó la densidad electrónica de Hubble V y Hubble X punto a punto, así como también para sus espectros integrado, usando la razón de las líneas de

emisión [S II] ($\lambda 6717/\lambda 6731$), medido a partir de observaciones en el visible realizadas con la técnica de rendija larga con una alta S/N.

La densidad a alta resolución muestra en las dos regiones H II un comportamiento no homogéneo de la densidad, con la presencia de gradientes, siendo más pronunciados en Hubble V que en Hubble X. El comportamiento de la densidad en las dos regiones corrobora la tendencia de un régimen de baja densidad.

Se comprobó que el intervalo de temperatura electrónica del gas al interior de las dos regiones H II estudiadas no es un factor que afecte el cálculo de la densidad de Hubble V y Hubble X. No se observa una relación explícita entre la densidad electrónica y el flujo de emisión en $H\alpha$, lo cual es un resultado nuevo y relevante en este tipo de estudios.

La densidad electrónica para los espectros integrados de Hubble V y Hubble X corresponde a un régimen de baja densidad y coinciden con lo reportado en estudios previos a la misma temperatura electrónica, de modo que la desexcitación por colisión desempeña un papel de poca relevancia en estos procesos.

Las regiones H II se encuentran localizadas a grandes distancias, lo que dificulta realizar observaciones a alta resolución que posibiliten llevar a cabo este tipo de análisis. El estudio que aquí se presentó es el primero en alta resolución y punto a punto que se reporta en la literatura para Hubble V y Hubble X.

Una línea de trabajo a desarrollar consiste en construir mapas bidimensionales de densidad de estas dos regiones H II, empleando técnicas de interpolación bidimensional y reconstrucción de imágenes (Caicedo-Ortiz, 2011), pero para ello es necesario utilizar el doblete de [O II], el cual ofrece una mayor sensibilidad a las condiciones de baja densidad y resulta ser más adecuado para estas condiciones que el doblete de [S II]. Para llevar a cabo mediciones de estas líneas de emisión, es necesario el uso de telescopios más potentes que posean espectrógrafos de alta resolución, así como la asignación de un alto tiempo de observación, una combinación a la cual no es tan sencillo acceder.

Contribución de los autores

H.O. Castañeda-Fernández realizó las observaciones, supervisó la reducción de datos, la obtención de resultados y revisó parcialmente la redacción del artículo. H.E. Caicedo-Ortiz realizó la reducción de datos, proceso los espectros, realizó las medidas de la densidad, verificó la validez de los resultados y escribió el artículo. Todos los autores propusieron en conjunto la metodología de trabajo, analizaron, discutieron y aprobaron los resultados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

Agradecimientos

H.E. Caicedo-Ortiz agradece a los tres evaluadores la respetuosa y detallada revisión de este manuscrito, así como sus acertados comentarios y sugerencias que permitieron mejorar considerablemente el presente artículo.

Referencias

- Aller, L. H. (1984). *Physics of thermal gaseous nebulae* (Vol. 112). Springer; 1 edición.
- Bianchi, L., Scuderi, S., Massey, P., y Romaniello, M. (2001). The Massive Star Content of NGC 6822: Ground-Based, Hubble Space Telescope Photometry. *AJ*, **121**, 2020-2031. doi: 10.1086/319969
- Brandenburg, H. J., y Skillman, E. D. (1998). The Neutral Hydrogen in NGC 6822. En *American astronomical society meeting abstracts* (Vol. 30, p. 1354).
- Caicedo-Ortiz, H. E., Santiago-Cortés, E., López-Bonilla, J., y Castañeda, H. O. (2015). Fractal dimension and turbulence in Giant HII Regions. *Journal of Physics Conference Series*, **582**, 012049. doi: 10.1088/1742-6596/582/1/012049
- Caicedo-Ortiz, H. E. (2011). *Estudio de Regiones HII Gigantes* (Tesis de Master no publicada). Instituto Politécnico Nacional (IPN), México.
- Caicedo-Ortiz, H. E., Castañeda, H. O., y Santiago-Cortés, E. (2017). Fractalidad en regiones de Formación Estelar. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **39** 3, e3308-1 - e3308-8. doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2017-0006
- Caicedo-Ortiz, H. E., y Castañeda Fernández, H. O. (2019). Relationship Between the Ionization Energy and the Radial Velocity of the Ionized Gas in Gaseous Nebulae. *Astrophysics*, **62** (1), 57-68. doi: 10.1007/s10511-019-09564-9
- Campbell-White, J., Ali, A. A., Froebrich, D., y Kume, A. (2020). Shape analysis of h ii regions—ii. synthetic observations. *MNRAS*, **496** 4, 4311–4329.
- Cannon, J. M., Walter, F., Armus, L., Bendo, G. J., Calzetti, D., Draine, B. T., ... Thornley, M. D. (2006). The Nature of Infrared Emission in the Local Group Dwarf Galaxy NGC 6822 as Revealed by Spitzer. *ApJ*, **652**, 1170-1187. doi: 10.1086/508341
- Cantó, J., Elliott, K. H., Meaburn, J., y Theokas, A. C. (1980, 12). On the derivation of electron density and temperature from [S II] and [O II] line intensity ratios. *MNRAS*, **193** 4, 911-919. doi: 10.1093/mnras/193.4.911
- Castañeda, H. O., Vilchez, J. M., y Copetti, M. V. F. (1992). Density studies on giant extragalactic H II regions. *A&A*, **260**, 370-380.
- Clementini, G., Held, E. V., Baldacci, L., y Rizzi, L. (2003). RR Lyrae, Short-Period Variable Stars in the Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822. *ApJ*, **588**, L85-L88. doi: 10.1086/375633
- Collier, J., y Hodge, P. (1994). The H II regions of NGC 6822. 3: A photometric atlas. *ApJS*, **92**, 119-123. doi: 10.1086/191961
- Copetti, M. V. F., Mallmann, J. A. H., Schmidt, A. A., y Castañeda, H. O. (2000). Internal variation of electron density in galactic HII regions. *A&A*, **357**, 621-636.
- Currie, M. J., Berry, D. S., Jenness, T., Gibb, A. G., Bell, G. S., y Draper, P. W. (2014, mayo). Starlink Software in 2013. En N. Manset y P. Forshay (Eds.), *Astronomical data analysis software and systems xxiii* (Vol. 485, p. 391).
- de Blok, W. J. G., y Walter, F. (2000). Evidence for Tidal Interaction, a Supergiant H I Shell in the Local Group Dwarf Galaxy NGC 6822. *ApJ*, **537**, L95-L98. doi: 10.1086/312777
- De Robertis, M. M., Dufour, R. J., y Hunt, R. W. (1987). A five-level program for ions of astrophysical interest. *JRASC*, **81**, 195-220.
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., Jr., Buta, R. J., Paturel, G., y Fouque, P. (1991). *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin Jr., R. J. Buta, G. Paturel, y P. Fouque, Eds.).
- De Grijs, R. (2011). *An introduction to distance measurement in astronomy*. John Wiley & Sons.
- Díaz, A. I., Terlevich, E., Vilchez, J. M., Pagel, B. E. J., y Edmunds, M. G. (1991). Abundance analysis of giant H II regions in M51. *MNRAS*, **253**, 245-255.

- Eskridge, P. B., y White, R. E., III.** (1997). The nature of the X-ray point source in the bar of NGC 6822. *AJ*, **114**, 988-996. doi: 10.1086/118529
- Esteban, C., Bresolin, F., Peimbert, M., García-Rojas, J., Peimbert, A., y Mesa-Delgado, A.** (2009). Keck HIRES Spectroscopy of Extragalactic H II Regions: C and O Abundances from Recombination Lines. *ApJ*, **700**, 654-678. doi: 10.1088/0004-637X/700/1/654
- Evans, I. N., y Dopita, M. A.** (1985). Theoretical models for H II regions. I - Diagnostic diagrams. *ApJS*, **58**, 125-142. doi: 10.1086/191032
- Fleming, L.** (2021). *Synthetic observations of line emission from simulated hii regions* (Tesis de Master no publicada).
- Gallagher, J. S., III, Hunter, D. A., Gillett, F. C., y Rice, W. L.** (1991). Far-infrared properties of NGC 6822. *ApJ*, **371**, 142-147. doi: 10.1086/169878
- Gallart, C., Aparicio, A., Bertelli, G., y Chiosi, C.** (1996a). The Local Group Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822.III. The Recent Star Formation History. *AJ*, **112**, 2596. doi: 10.1086/118205
- Gallart, C., Aparicio, A., Bertelli, G., y Chiosi, C.** (1996b). The Local Group Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822.II. The Old, Intermediate -Age Star Formation History. *AJ*, **112**, 1950. doi: 10.1086/118154
- Geen, S., Soler, J. D., y Hennebelle, P.** (2017). Interpreting the star formation efficiency of nearby molecular clouds with ionizing radiation. *MNRAS*, **471** 4, 4844–4855.
- Gottesman, S. T., y Welichew, L.** (1977). An interferometer study of the neutral hydrogen associated with the optical core of the irregular galaxy NGC 6822. *A&A*, **61**, 523-530.
- Gratier, P., Braine, J., Rodríguez-Fernández, N. J., Israel, F. P., Schuster, K. F., Brouillet, N., y Gardan, E.** (2010). The molecular interstellar medium of the Local Group dwarf NGC 6822. The molecular ISM of NGC 6822. *A&A*, **512**, A68. doi: 10.1051/0004-6361/200911722
- Haworth, T. J., Glover, S. C., Koepferl, C. M., Bisbas, T. G., y Dale, J. E.** (2018). Synthetic observations of star formation and the interstellar medium. *New Astronomy Reviews*, **82**, 1–58.
- Hidalgo-Gómez, A. M., Olofsson, K., y Masegosa, J.** (2001). The chemical abundances in a sample of dwarf irregular galaxies. I. Small scale variations within NGC 6822? *A&A*, **367**, 388-404. doi: 10.1051/0004-6361:20010063
- Hidalgo-Gómez, A. M., y Peimbert, A.** (2007). Diffuse Ionized Gas inside the Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822. *AJ*, **133**, 1874-1882. doi: 10.1086/511267
- Hodge, P., Lee, M. G., y Kennicutt, R. C., Jr.** (1988). The H II regions of NGC 6822. I - an atlas of 157 H II regions. *PASP*, **100**, 917-934. doi: 10.1086/132254
- Hodge, P., Lee, M. G., y Kennicutt, R. C., Jr.** (1989). The H II regions of NGC 6822. II - The luminosity function, size distribution. *PASP*, **101**, 32-39. doi: 10.1086/132401
- Hubble, E.** (1925). *Ngc 6822: A remote stellar system* (no 304).
- Hubble, E. P.** (1925). NGC 6822, a remote stellar system. *ApJ*, **62**, 409-433. doi: 10.1086/142943
- Hutchings, J. B., Cavanagh, B., y Bianchi, L.** (1999). The Resolved Outer Population of NGC 6822 with WFPC2. *PASP*, **111**, 559-565. doi: 10.1086/316366
- Israel, F. P.** (1997). Dust, molecules in the Local Group galaxy NGC 6822. II. CO, molecular hydrogen. *A&A*, **317**, 65-72.
- Israel, F. P., Baas, F., Rudy, R. J., Skillman, E. D., y Woodward, C. E.** (2003). Dust, molecules in the Local Group galaxy NGC 6822. III. The first-ranked HII region complex Hubble V. *A&A*, **397**, 87-97. doi: 10.1051/0004-6361:20021464
- Karachentsev, I. D., Karachentseva, V. E., Huchtmeier, W. K., y Makarov, D. I.** (2004). A Catalog of Neighboring Galaxies. *AJ*, **127**, 2031-2068. doi: 10.1086/382905
- Keenan, F. P., Aller, L. H., Bell, K. L., Hyung, S., McKenna, F. C., y Ramsbottom, C. A.** (1996). Auroral and nebular emission lines of [SII] in the optical spectra of

- planetary nebulae. *MNRAS*, **281**, 1073-1080.
- Kennicutt, R. C., Jr.** (1979). H II Regions as Extragalactic Distance Indicators. III. Application of H II Region Fluxes, Galaxy Diameters. *ApJ*, **228**, 704-711. doi: 10.1086/156895
- Lagrois, D., y Joncas, G.** (2009). A Multi-ionic Kinematic Investigation of NGC 595, a Giant Extragalactic H II Region in M33. *ApJ*, **700**, 1847-1877. doi: 10.1088/0004-637X/700/2/1847
- Lee, H., Skillman, E. D., y Venn, K. A.** (2006). The Spatial Homogeneity of Nebular, Stellar Oxygen Abundances in the Local Group Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822. *ApJ*, **642**, 813-833. doi: 10.1086/500568
- Lequeux, J., Peimbert, M., Rayo, J. F., Serrano, A., y Torres-Peimbert, S.** (1979). Chemical composition, evolution of irregular, blue compact galaxies. *A&A*, **80**, 155-166.
- Letarte, B., Demers, S., Battinelli, P., y Kunkel, W. E.** (2002). The Extent of NGC 6822 Revealed by Its C Star Population. *AJ*, **123**, 832-839. doi: 10.1086/338319
- Longo, G., y Ceriello, M., A. and Capaccioli.** (1991). The UV properties of normal galaxies. I - The IUE data. *A&AS*, **90**, 375-386.
- López Sánchez, A.** (2006). *Formación de estrellas masivas en galaxias Wolf-Rayet enanas* (Tesis Doctoral no publicada). Departamento de Astrofísica, Universidad de la Laguna.
- Maíz-Apellániz, J., Pérez, E., y Mas-Hesse, J. M.** (2004a). NGC 604, the Scaled OB Association (SOBA) Prototype. I. Spatial Distribution of the Different Gas Phases and Attenuation by Dust. *AJ*, **128**, 1196-1218. doi: 10.1086/422925
- Maíz-Apellániz, J., Pérez, E., y Mas-Hesse, J. M.** (2004b). NGC 604, the Scaled OB Association (SOBA) Prototype. I. Spatial Distribution of the Different Gas Phases, Attenuation by Dust. *AJ*, **128**, 1196-1218. doi: 10.1086/422925
- Mateo, M. L.** (1998). Dwarf Galaxies of the Local Group. *ARA&A*, **36**, 435-506. doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.435
- McCall, M. L.** (1984). Emission coefficients for gaseous nebulae - Three-level atom approximations. *MNRAS*, **208**, 253-259.
- O'Dell, C. R., Hodge, P. W., y Kennicutt, R. C., Jr.** (1999). A Hubble Space Telescope Study of Two HII Regions in NGC 6822. *PASP*, **111**, 1382-1391. doi: 10.1086/316452
- Oliveira, V. A.** (2009). *A spectrophotometric study of HII regions in chemically young galaxies* (Tesis Doctoral no publicada). Universidade Federal de Santa maria., Santa Maria, RS, Brasil,.
- Osterbrock, D. E., y Ferland, G. J.** (2006). *Astrophysics of Gaseous Nebulae, Active Galactic Nuclei*. University Science Books; 2 edición.
- Pagel, B. E. J., Edmunds, M. G., y Smith, G.** (1980). On the composition of H II regions in southern galaxies. II - NGC 6822, 1313. *MNRAS*, **193**, 219-230.
- Peimbert, A., Peimbert, M., y Ruiz, M. T.** (2005). Chemical Composition of Two H II Regions in NGC 6822 based on VLT Spectroscopy. *ApJ*, **634**, 1056-1066. doi: 10.1086/444557
- Peimbert, M., y Spinrad, H.** (1970). On the Chemical Abundance of NGC 6822. *A&A*, **7**, 311.
- Pellegrini, E. W., Rahner, D., Reissl, S., Glover, S. C., Klessen, R. S., Rousseau-Nepton, L., y Herrera-Camus, R.** (2020). warpfild-emp: The self-consistent prediction of emission lines from evolving h ii regions in dense molecular clouds. *MNRAS*, **496** 1, 339-363.
- Pérez Oregón, J., Caicedo-Ortiz, H. E., Castañeda Fernández, H. O., y Hidalgo-Gómez, A. M.** (2014). La estructura interna de regiones HII gigantes. *Jou. Cie. Ing.*, **6** (1), 16-20. doi: 10.46571/JCI.2014.1.4

- Phillips, J. P.** (1998). Electron densities in planetary nebulae, and the unusual characteristics of the [s ii] emission zone. *A&A*, **340**, 527-542.
- Pietrzyński, G., Gieren, W., Udalski, A., Bresolin, F., Kudritzki, R.-P., ... Kubiak, M.** (2004). The Araucaria Project: The Distance to the Local Group Galaxy NGC 6822 from Cepheid Variables Discovered in a Wide-Field Imaging Survey. *AJ*, **128**, 2815-2825. doi: 10.1086/425531
- Rayo, J. F., Peimbert, M., y Torres-Peimbert, S.** (1982). Gradients in the physical conditions of M101, the pregalactic helium abundance. *ApJ*, **255**, 1-10. doi: 10.1086/159796
- Relaño, M., Monreal-Ibero, A., Vílchez, J. M., y Kennicutt, R. C.** (2010). Spatially resolved study of the physical properties of the ionized gas in NGC 595. *MNRAS*, **402**, 1635-1648. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.16036.x
- Relano, M., Beckman, J., Zurita, A., Rozas, M., y Giammanco, C.** (2005). The internal dynamical equilibrium of h ii regions: A statistical study. *Astronomy & Astrophysics*, **431** 1, 235-251.
- Rosa, M., y Solf, J.** (1984). The internal kinematics of the giant extragalactic H II complex NGC 604. *A&A*, **130**, 29-38.
- Roy, J. R., y Arsenault, R.** (1986). The H-alpha velocity widths of giant H II regions as distance indicators. *ApJ*, **302**, 579-584. doi: 10.1086/164016
- Rubin, R. H.** (1968). The Structure, Properties of H II Regions. *ApJ*, **153**, 761. doi: 10.1086/149704
- Seaton, M. J., y Osterbrock, D. E.** (1957). Relative [OII] Intensities in Gaseous Nebulae. *ApJ*, **125**, 66. doi: 10.1086/146282
- Shaw, R. A., y Dufour, R. J.** (1995). Software for the Analysis of Emission Line Nebulae. *PASP*, **107**, 896. doi: 10.1086/133637
- Shields, G. A.** (1990). Extragalactic H II regions. *ARA&A*, **28**, 525-560. doi: 10.1146/annurev.aa.28.090190.002521
- Skillman, E. D., Terlevich, R., y Melnick, J.** (1989). Abundances in southern Local Group dwarf irregular galaxies. *MNRAS*, **240**, 563-572.
- Smith, H. E.** (1975). Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral, irregular galaxies. *ApJ*, **199**, 591-610. doi: 10.1086/153727
- Stanghellini, L., y Kaler, J. B.** (1989). Electron densities in planetary nebulae. *ApJ*, **343**, 811-827. doi: 10.1086/167751
- Stasińska, G.** (1980). Some comments on the analysis of extragalactic H II regions spectra. *A&A*, **84**, 320-328.
- Strömgren, B.** (1939). The Physical State of Interstellar Hydrogen. *ApJ*, **89**, 526. doi: 10.1086/144074
- Struve, O., y Elvey, C. T.** (1934, mayo). The Intensities of Stellar Absorption Lines. *ApJ*, **79**, 409. doi: 10.1086/143551
- Tennant, A. F.** (2006). Chandra Observation of NGC 6822. *AJ*, **132**, 1372-1383. doi: 10.1086/506511
- Tolstoy, E., Irwin, M. J., Cole, A. A., Pasquini, L., Gilmozzi, R., y Gallagher, J. S.** (2001). Using the CaII triplet to trace abundance variations in individual red giant branch stars in three nearby galaxies. *MNRAS*, **327**, 918-938. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04785.x
- Tomita, A., Ohta, K., y Saito, M.** (1993). H-alpha velocity fields of giant H II regions in four nearby dwarf irregular galaxies. *PASJ*, **45**, 693-705.
- Venn, K. A., Lennon, D. J., Kaufer, A., McCarthy, J. K., Przybilla, N., Kudritzki, R. P., ... Smartt, S. J.** (2001). First Stellar Abundances in NGC 6822 from VLT-UVES, Keck-HIRES Spectroscopy. *ApJ*, **547**, 765-776. doi: 10.1086/318424
- Vílchez, J. M., Pagel, B. E. J., Diaz, A. I., Terlevich, E., y Edmunds, M. G.** (1988). The chemical composition gradient across M 33. *MNRAS*, **235**, 633-653.

-
- Weldrake, D. T. F., de Blok, W. J. G., y Walter, F.** (2003). A high-resolution rotation curve of NGC 6822: a test-case for cold dark matter. *MNRAS*, **340**, 12-28. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06170.x
- White, N. J.** (1981). The dynamics and structure of the ionized and neutral gas in the 30 Doradus nebula. *Ap&SS*, **78**, 443-461. doi: 10.1007/BF00648950
- Wilson, C. D.** (1992). The stellar populations of NGC 6822. *AJ*, **104**, 1374-1394. doi: 10.1086/116327
- Wyder, T. K.** (2001). The Star Formation History of NGC 6822. *AJ*, **122**, 2490-2523. doi: 10.1086/323706
- Zheng, W.** (1988). The critical densities for some emission lines. *Astrophysical Letters Communications*, **27**, 275-279.

Artículo original

Convergencia estadística en medida para sucesiones triples de funciones con valores difusos

Statistical convergence in measure for triple sequences of fuzzy-valued functions

Carlos Granados

Estudiante de Doctorado en Matemáticas, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Resumen

En este artículo, definimos y extendemos las nociones de dos tipos de convergencia en medida, estos son interna y externa estadística convergencia para sucesiones triples de funciones medibles con valores difusos. Además, mostramos que ambas sucesiones son equivalentes en un espacio de medida finita. Adicionalmente, definimos y estudiamos la noción de estadística convergencia en medida para sucesiones triples de funciones medibles con valores difusos. En adición, mostramos y probamos la versión estadística del teorema de Egorov para sucesiones triples de funciones con valores difusos sobre un espacio de medida finita.

Palabras clave: Sucesiones triples; espacio de medida; teorema de Egorov; interna y externa estadística convergencia; funciones con valores difusos.

Abstract

In this paper, we define and extend the notions of two kinds of convergence in measure, these are inner and outer statistical convergence for triple sequences of fuzzy-valued measurable functions. Besides, we show that both kinds of convergence are equivalent in a finite measurable space. Additionally, we define and study the notion of statistical convergence in measure for triple sequences of fuzzy-valued measurable functions. In addition, we show and prove the statistical version of Egorov's theorem for triple sequences of fuzzy-valued functions on a finite measure space.

Keywords: Triple sequence; Measure space; Egorov's theorem; Outer and inner statistical convergence; Fuzzy-valued function.

Citación: Granados C. Convergencia estadística en medida para sucesiones triples de funciones con valores difusos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1011-1021, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1456>

Editor: Francisco José Marcellán Español

Correspondencia:

Carlos Granados;
carlosggranadosortiz@outlook.es

Recibido: 18 de abril de 2021

Aceptado: 26 de agosto de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Introduction

La convergencia estadística, si bien se introdujo hace casi cincuenta años como una generalización de la convergencia habitual, la cual fue inicialmente introducida bajo el nombre de casi-convergencia en la publicación principal de la conocida monografía de (Zygmund, 1935). Sin embargo, en un caso general, ni los límites ni los límites estadísticos pueden calcularse o medirse con absoluta precisión. Para reflejar esta imprecisión y modelarla mediante estructuras matemáticas, se han desarrollado varios enfoques en matemáticos tales

como la teoría de conjuntos difusos y la lógica difusa. Adicionalmente, esta convergencia fue estudiada por (Fast, 1951), después (Salát, 1980) y (Schoenberg, 1959) establecieron algunas de sus propiedades. En adición, en 1985 una nueva noción relacionada con este concepto fue presentada por (Fridy, 1985), esta noción es conocida como sucesión estadística de Cauchy; además, mostró que ambos conceptos son equivalentes. En la última década, la convergencia estadística se ha convertido en un área de investigación activa en donde diferentes matemáticos han estudiado las propiedades de la convergencia estadística y han aplicado este concepto en diversas áreas como en la teoría de la medida, series trigonométricas, teoría de la aproximación, espacios localmente convexos, espacios de Banach y entre otros. (Ilkhan & Kara, 2018) introdujeron otras variantes de sucesiones estadística de Cauchy en la que presentaron su relación con la completitud de Bourbaki. Los autores (Sahiner, Gurdal, & Duden, 2007) definieron y estudiaron las nociones mencionadas anteriormente en triple sucesiones, mientras que la convergencia común para sucesiones triples viene dada por (Pringsheim, 1900). (Balcerzak, Dems, & Komisariski, 2007) examinaron diferentes tipos de convergencia estadística y convergencia sobre espacios de ideales para sucesiones únicas de funciones con valores en un espacio métrico o en el conjunto \mathbb{R} (el conjunto de números reales), es decir, puntuales, uniformes y equi-estadísticos (o, ideal) convergencia. (Esi & Necdet, 2014) discutieron sobre algunos conceptos de convergencia estadística puntual y uniforme de triple sucesiones de funciones en \mathbb{R} . Recientemente, utilizando la noción de triple sucesiones y convergencia estadística, (Granados, 2021) definió la noción de sucesiones localizadas y sucesiones localizadas de Cauchy teniendo en cuenta la noción de ideal (Kostyrko, Salat, & Wilczynski, 2000/2001). Además, (Das, Tripathy, Deb-nath, & Bhattacharya, 2021) definieron la noción de secuencia triple incierta compleja, en la cual estudian la convergencia estadística de sucesiones complejas sobre espacios de medidas finitas.

El término “conjuntos difusos” fue planteado por el matemático (Zadeh, 1965). Utilizó los conceptos de intersección, inclusión, relación, unión, complemento, convexidad, y así sucesivamente, para establecer la noción de conjuntos difusos. La noción de un conjunto difuso proporciona una conveniente punto de partida para la construcción de un marco conceptual paralelo en muchos aspectos al marco utilizado en el caso de conjuntos ordinarios, pero es más general que el último y, potencialmente, puede llegar a tener un alcance mucho más amplio de aplicabilidad, particularmente en los campos de clasificación e información de patrones. Esencialmente, dicho marco proporciona una forma natural de abordar problemas en los que la fuente de imprecisión es la ausencia de criterios de pertenencia a una clase en lugar de la presencia de variables aleatorias. A partir de lo mencionado anteriormente, los conjuntos difusos y la lógica difusa conectaron de manera efectiva a los científicos de las diferentes áreas del saber, por ejemplo, la ingeniería de control y la teoría de la decisión, y además los investigadores en inteligencia artificial. La utilidad y la importancia de los límites de sucesiones de conjuntos difusos, los límites (continuidad) y las derivadas de funciones de valores difusos se han aplicado en muchas áreas, por ejemplo, análisis variacional, optimización por conjuntos difusos, teoría de la estabilidad, análisis de sensibilidad, entre otros. Durante los últimos 50 años, numerosas sucesiones de números difusos y sus propiedades de convergencia han sido estudiadas y han sido bien acogidas por la comunidad científica. (Nuray & Savas, 1995) discutieron sobre la convergencia estadística en la configuración de sucesiones (simples) de números difusos, y recientemente, esta noción a través de operadores de diferencia junto con la media ponderada ha sido definida y estudiada por (Mohiuddine, Asiri, & Hazarika, 2019). El autor (Savas, 1996) presentó la idea del límite de Pringsheim de sucesiones de números difusos, y luego, en 2004, (Savas & Mursaleen, 2004) presentaron la generalización del límite de Pringsheim en sentido estadístico. La convergencia estadística ha sido estudiada en diferentes áreas del saber matemático, espacios normativos difusos intuicionistas (Mursaleen & Mohiuddine, 2009), espacios Riesz localmente sólidos (Mohiuddine, Alotaibi, & Mursaleen, 2012) y entre otros. Para estudios realizados sobre números difusos, los teoremas de Tauberian con vistas a Cesáro y la

sumabilidad estadística de Cesáro fueron obtenidos por (Canak, Totur, & Önder, 2017), (Önder, Çanak, & Totur, 2017) y para la convergencia estadística de (Talo & Bayazit, 2017). (Gong, Zhang, & Zhu, 2015) discutieron sobre la convergencia estadística y otras nociones asociadas para sucesiones únicas de funciones con valores difusos y también obtuvieron algunas sus propiedades básicas. Recientemente, (Hazarika, Alotaibi, & Mo-hiuddine, 2020) estudiaron la convergencia estadística en medida sobre doble sucesiones para funciones con valores difusos y obtuvieron algunas propiedades importantes las cuales serán de gran utilidad para el desarrollo de este artículo.

Nociones preliminares

En esta sección mostramos algunas nociones que son de gran utilidad para el desarrollo de este artículo.

Para cualquier conjunto A diferente de vacío, (Zadeh, 1965) definió la noción de un conjunto difuso como: Un subconjunto no vacío de A se dice que es un conjunto difuso si $\{(\alpha_1, \bar{y}(\alpha_1)) : \alpha_1 \in A\}$ de $A \times B = [0, 1]$ para alguna función $\bar{y} : A \rightarrow B = [0, 1]$. Una función $\bar{y} : \mathbb{R} \rightarrow B = [0, 1]$ se dice que es un número difuso si satisface las siguientes propiedades:

1. \bar{y} es convexa, es decir, $\bar{y}(\alpha_1) \geq \bar{y}(\alpha_2) \wedge \bar{y}(\alpha_3) = \min\{\bar{y}(\alpha_2), \bar{y}(\alpha_3)\}$, donde $\alpha_2 < \alpha_1 < \alpha_3$.
2. \bar{y} es normal, es decir, existe un $\alpha_0 \in \mathbb{R}$ tal que $\bar{y}(\alpha_0) = 1$.
3. \bar{y} es semi-continua por arriba, es decir, para cada $\varepsilon > 0$, $\bar{y}^{-1}([0, b + \varepsilon))$ es abierto en la topología usual de \mathbb{R} para todo $b \in [0, 1]$.
4. $[\bar{y}]^0 = cl(\{\alpha_1 \in \mathbb{R} : \bar{y}(\alpha_1) > 0\})$ es compacto, (cl denota el operador clausura).

A través de este artículo, denotaremos el conjunto de todos los números difusos por $F(\mathbb{R})$. El conjunto \mathbb{R} puede estar en $F(\mathbb{R})$ si $\bar{r} \in F(\mathbb{R})$ está dado por $\bar{r}(\alpha_1) = 1$ si $\alpha_1 = r$ y $\bar{r}(\alpha_1) = 0$ si $\alpha_1 \neq r$.

Para $0 < \alpha \leq 1$, α -cortado de \bar{y} es un intervalo cerrado y acotado de \mathbb{R} que esta dado por $[\bar{y}]_\alpha = \{\alpha_1 \in \mathbb{R} : \bar{y}(\alpha_1) \geq \alpha\} = [\bar{y}_\alpha^-, \bar{y}_\alpha^+]$. Ahora, supongamos que \bar{y}_1 y \bar{y}_2 son dos números difusos, entonces la Hausdorff distancia entre \bar{y}_1 y \bar{y}_2 (ver (Negoița & Ralescu, 1975)) esta definida como:

$$D(\bar{y}_1, \bar{y}_2) = \sup_{\alpha \in [0,1]} d([\bar{y}_1]_\alpha, [\bar{y}_2]_\alpha) = \sup_{\alpha \in [0,1]} \max\{|\bar{y}_{1\alpha}^- - \bar{y}_{2\alpha}^-|, |\bar{y}_{1\alpha}^+ - \bar{y}_{2\alpha}^+|\}$$

donde $D : F(\mathbb{R}) \times F(\mathbb{R}) \rightarrow [0, +\infty)$ y d es la métrica de Hausdorff. Además, es bien sabido que para cualquier $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \bar{y}_4 \in F(\mathbb{R})$:

1. $(F(\mathbb{R}), D)$ es un espacio métrico completo.
2. $D(\omega \bar{y}_1, \omega \bar{y}_2) = |\omega|D(\bar{y}_1, \bar{y}_2); \omega \in \mathbb{R}$.
3. $D(\bar{y}_1 + \bar{y}_4, \bar{y}_2 + \bar{y}_4) = D(\bar{y}_1, \bar{y}_2)$.
4. $D(\bar{y}_1 + \bar{y}_3, \bar{y}_2 + \bar{y}_4) \leq D(\bar{y}_1, \bar{y}_2) + D(\bar{y}_1, \bar{y}_4)$.

Lema 0.1 (Negoița & Ralescu, 1975). Sea $\bar{y} \in F(\mathbb{R})$ y $[\bar{y}]_\alpha = [\bar{y}_\alpha^-, \bar{y}_\alpha^+]$. Entonces los siguientes enunciados se satisfacen:

1. $\bar{y}_1^- \leq \bar{y}_1^+$.
2. \bar{y}_α^- y \bar{y}_α^+ son continuas por la derecha en $\alpha = 0$.
3. \bar{y}_α^- y \bar{y}_α^+ son funciones continuas por la izquierda monotonas crecientes y continuas por la derecha monotonas decrecientes, respectivamente, en $(0, 1]$.

Una sucesión triple $x = (x_{uvq})$ tiene un Pringsheim límite L (abreviado, $P\text{-lim} x = L$, o, L es el P -límite de x) (**Pringsheim**, 1900) si para cada $\varepsilon > 0$ existe un $N \in \mathbb{N}$ tal que $|x_{uvq} - L| < \varepsilon$ para cualquier $u, v, q > N$. Para $A \subset \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ y $k, l, p \in \mathbb{N}$, $\delta_{klp}(A)$ es llamado el klp th triple parcial densidad de A si,

$$\delta_{klp}(A) = \frac{|A \cap \{(1, 1, 1), (2, 2, 2), \dots, (k, l, p)\}|}{klp},$$

donde $|\cdot|$ representa la cardinalidad del conjunto enmarcado. Recordemos que, δ_{klp} es un operador de medida de probabilidad sobre $P_1 = P(\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N})$ con la ayuda de $\{(1, 1, 1), (2, 2, 2), \dots, (k, l, p)\}$. Si

$$\delta_3(A) = \lim_{n,m,j \rightarrow \infty} \frac{1}{nmj} |\{u \leq n, v \leq m, q \leq j : (u, v, q) \in A\}|$$

en el sentido de Pringsheim, es decir,

$$\delta_3(A) = P\text{-}\lim_{k,l,p \rightarrow +\infty} \delta_{klp}(A)$$

existe, es llamada la triple natural densidad de A . Análogamente, esta noción puede ser definida de la siguiente manera: Sea $K \subset \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ y $K(m, n, p) = \{(m, n, p) : k \leq m, j \leq n, i \leq p\}$. Entonces, la triple natural densidad de K está dada por

$$\delta(k) = P\text{-}\lim_{m,n,p \rightarrow \infty} \frac{1}{mnp} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p \chi_{K(m,n,p)}(k, j, i)$$

si el límite existe. Además, $\Lambda = \{A \subset \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \delta_3(A) = 0\}$ se dice que es conjunto de triple densidad cero. La sucesión triple $x = (x_{uvq})$ es estadísticamente convergente (ver (**Sahiner et al.**, 2007)) a L si dado $\varepsilon > 0$, el conjunto $\{(u, v, q), u \leq n, v \leq m, q \leq j : |x_{uvq} - L| \geq \varepsilon\}$ tiene triple densidad cero.

Ahora, vamos a recordar algunos conceptos definidos por (**Kumar, Kumar, & Bhatia**, 2012).

Una sucesión triple de conjuntos difusos (\bar{y}_{uvq}) es estadísticamente convergente al número difuso \bar{y}_0 ; esto lo denotaremos como $S_3\text{-lim} \bar{y}_{uvq} = \bar{y}_0$, si para cualquier $\varepsilon > 0$, la triple natural densidad cero del el conjunto $B = \{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{y}_{uvq}, \bar{y}_0) \geq \varepsilon\}$ es cero, esto significa que $\delta_3(B) = 0$, en otras palabras,

$$\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{y}_{uvq}, \bar{y}_0) \geq \varepsilon\} \in \Lambda. \tag{1}$$

De 1, podemos observar que $S_3\text{-lim} \bar{y}_{uvq} = \bar{y}_0$ si y solo si para cada $\varepsilon > 0$, existe $T \subset \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ que satisface $\delta_3(T) = 0$ tal que $D(\bar{y}_{uvq}, \bar{y}_0) < \varepsilon$, para todo $(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} - T$.

Resultados

Esta sección está dividida en dos partes, la primera, se discutirá sobre el Teorema de Egorov par sucesiones triples de funciones con valores difusos, y la segunda, se mostrarán los resultados obtenidos sobre convergencia estadística en medida de sucesiones triples de funciones con valores difusos.

La generalización del teorema de Egorov, un famosos y clásico resultado de la teoría de la medida, se ha presentado por varios autores en diferentes maneras. En esta sección, probamos el teorema de Egorov para sucesiones triples de funciones con valores difusos en un espacio de medida finita. Durante el desarrollo de esta sección, asumiremos que $\bar{g} : [a, b] \rightarrow F(\mathbb{R})$ y $\bar{g}_{klp} : [a, b] \rightarrow F(\mathbb{R})$ son la función de valor difuso y una sucesión triple de funciones con valores difusos para todo $k, l, p \in \mathbb{N}$, respectivamente.

Definición 0.1 Sea (\bar{g}_{klp}) una sucesión triple de funciones con valores difusos. Se dice que (\bar{g}_{klp}) converge puntual estadísticamente a una función con valor difuso \bar{g} en $[a, b]$ (en el sentido de Pringsheim), denotado por $pS_3\text{-lim } \bar{g}_{klp}(y) = \bar{g}(y)$ o $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}$, si para todo $y \in [a, b]$ y para todo $\varepsilon > 0$, existe $T_y \in \Lambda$ tal que para todo $(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} - T_y$, tenemos que $D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) < \varepsilon$. \bar{g} se llama el límite estadístico de Pringsheim (o triple) función de (\bar{g}_{klp}) .

Definición 0.2 Sea (\bar{g}_{klp}) una sucesión triple de funciones con valores difusos. Se dice que (\bar{g}_{klp}) converge uniformemente en estadística a una función con valor difuso \bar{g} en $[a, b]$ (en el sentido de Pringsheim), denotado por $uS_3\text{-lim } \bar{g}_{uvq}(y) = \bar{g}(y)$ en $[a, b]$ o $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{uS_3} \bar{g}$, si para todo $\varepsilon > 0$, existe $T \in \Lambda$ tal que para todo $(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} - T$, tenemos que $D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) < \varepsilon$ para todo $y \in [a, b]$. Podemos observar que si $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{uS_3} \bar{g}$ para todo $\varepsilon > 0$, $\delta_3(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq \varepsilon\}) = 0$, para todo $y \in [a, b]$.

Definición 0.3 Sea (\bar{g}_{klp}) una sucesión triple de funciones con valores difusos. Se dice que (\bar{g}_{klp}) converge equi-estadísticamente a una función con valor difuso \bar{g} en $[a, b]$ (en el sentido de Pringsheim), denotado por $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}$, si dado un $\varepsilon > 0$, $G_{klp, \varepsilon} = \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq \varepsilon\})$ con respecto a $y \in [a, b]$ es uniformemente convergente a la función cero. Así, $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}$ si y solo si para todo $\varepsilon, \beta > 0$, existe $m, n, j \in \mathbb{N}$, para todo $k \geq n, l \geq m, p \geq j$, para todo $y \in [a, b]$, $\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq \varepsilon\}) < \beta$. Podemos observar que por la monotonocidad de δ_{klp} , se puede tomar $\beta = \varepsilon$.

Observación 0.1 Podemos observar que $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}$ si y solo si para todo $y \in Y$ y para todo $\varepsilon, \beta > 0$, existe $m, n, j \in \mathbb{N}$, para todo $k \geq n, l \geq m$ y $p \geq j$, $\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq \varepsilon\}) < \beta$. En este caso, tomamos $\beta = \varepsilon$, y tenemos que $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}$ implica $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}$. Adicionalmente, $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{uS_3} \bar{g}$ implica $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}$.

El siguiente teorema, es una versión estadística del teorema de Erogov para sucesiones triples de funciones con valores difusos.

Teorema 0.1 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida finita, y consideremos que \bar{g} y (\bar{g}_{uvq}) son medibles y definidas en casi todas partes en Ω . Además, consideremos que $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}$ en casi todas partes en Ω . Entonces, para todo $\varepsilon > 0$ existe un $A \subseteq \mathcal{M}$ tal que $\mu(\Omega - A) < \varepsilon$ y $\bar{g}_{uvq|A} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}|_A$ en A .

Demostración: Supongamos que las funciones con valores difusos \bar{g} y (\bar{g}_{uvq}) están definidas en todas partes en Ω y consideremos que $\bar{g}_{uvq}(y) \xrightarrow{pS_3} \bar{g}(y)$ para todo $y \in \Omega$. Ahora, para cualquier $t, k, l, p \in \mathbb{N}$, observemos que el conjunto

$$W = \{y \in \Omega : \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq \frac{1}{t}\}) < \frac{1}{t}\}$$

es medible. Entonces, la función $\sigma_{uvq}(y) = D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)), y \in \Omega$ es medible. Ahora, sea

$$E_{uvq} = \sigma_{uvq}^{-1}([\frac{1}{t}, \infty)).$$

Para todo $y \in \Omega$, tenemos que $y \in W$ si y solo si $\frac{1}{klp} \sum_{u=1}^k \sum_{v=1}^l \sum_{q=1}^p \chi_{E_{uvq}}(y) <$

$$\frac{1}{t}.$$

Dado que $g = \frac{1}{klp} \sum_{u=1}^k \sum_{v=1}^l \sum_{q=1}^p \chi_{E_{uvq}}(y)$ es medible, tenemos que $W = g^{-1}((-\infty, \frac{1}{t}))$. Para

$m, n, j \in \mathbb{N}$, denotemos $\Upsilon_{t, nmj} = \{y \in \Omega : \forall k \geq n, l \geq m, p \geq j, \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq \frac{1}{t}\}) < \frac{1}{t}\}$. Así, teniendo en cuenta lo mencionado previamente, podemos decir que $\Upsilon_{t, nmj}$ es medible. Además, tenemos que $\Upsilon_{t, nmj} \subset \Upsilon_{t, n+1, m+1, j+1}$, para todo

$$n, m, j \in \mathbb{N} \text{ y } \Omega = \bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcup_{m=1}^{\infty} \bigcup_{j=1}^{\infty} Y_{t,nmj}.$$

En consecuencia, $\mu(\Omega) = \lim_{uvq \rightarrow \infty} \mu(Y_{t,nmj})$. Para todo $m, n, j \in \mathbb{N}$ y para todo $\varepsilon > 0$, definamos $n(t), m(t), j(t) \in \mathbb{N}$ tal que $\mu(\Omega - Y_{t,n(t)m(t)j(t)}) < \frac{\varepsilon}{2^t}$. Fijemos $A_0 = \bigcup_{t=1}^{\infty} (\Omega - Y_{t,n(t)m(t)j(t)})$. Entonces, tenemos que $\mu(A_0) \leq \sum_{t=1}^{\infty} \mu(\Omega - Y_{t,n(t)m(t)j(t)}) < \varepsilon$. Ahora, sea $A = \Omega - A_0 = \bigcap_{t=1}^{\infty} Y_{t,n(t)m(t)j(t)}$. Así, $\mu(\Omega - A) = \mu(A_0) < \varepsilon$. Por lo tanto, tenemos que para todo $t \in \mathbb{N}$, para todo $k \geq n(t), l \geq m(t), p \geq j(t)$ y para todo $y \in A$, $\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq \frac{1}{t}\}) < \frac{1}{t}$. Esto prueba que $\bar{g}_{uvq|A} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}|_A$ en A .

Corolario 0.1 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida finita, y consideremos que \bar{g} y (\bar{g}_{uvq}) son medibles y definidas en casi todas partes en Ω . Entonces, $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}$ en casi todas partes en Ω si y solo si existe una sucesión (A_n) de conjuntos de \mathcal{M} tal que $\bar{g}_{uvq|A_n} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}|_{A_n}$ en A_n para todo n y $\mu(\Omega - \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n) = 0$.

Demostración: Supongamos que \bar{g} y (\bar{g}_{uvq}) son medibles y definidas en casi todas partes en Ω . Además, consideremos que $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}$ en casi todas partes en Ω . Entonces, la prueba se sigue si consideramos $\varepsilon = \frac{1}{n}$ para todo $n \in \mathbb{N}$ en el Teorema 0.1.

Ahora, supongamos que $\bar{g}_{uvq|A_n} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}|_{A_n}$ en A_n para todo n . Entonces, tenemos que $\bar{g}_{uvq|A_n} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}|_{A_n}$ en A_n para todo n . Por lo tanto, concluimos que $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}$ en casi todas partes en Ω .

Teniendo en cuenta el Teorema 0.1 y el Corolario 0.1, se mostró que la clásica versión estadística del teorema de Ergovod se puede extender a sucesiones triples de funciones con valores difusos en un espacio de medida finita $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$. Estos resultados también fueron estudiados para sucesiones dobles por (Hazarika et al., 2020).

A continuación, procedemos a definir, estudiar y extender las nociones de convergencia estadística externa e interna en la medida para sucesiones triples de funciones con valores difusos. Además, se demuestra que estas dos nociones son equivalentes. Para conocer más detalles sobre la mensurabilidad de integrales de funciones con valores difusos, ver ((Kim & Ghil, 1997) y (Zhang, 2001)).

Definición 0.4 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida. Supongamos que \mathcal{L}^0 es el conjunto de todas las las funciones medibles con valor difuso definidas en casi todas partes en Ω . Consideremos que $(\bar{g}_{uvq}), \bar{g} \in \mathcal{L}^0$. La externa convergencia estadística en medida de una triple sucesión de funciones medibles con valores difusos (\bar{g}_{uvq}) a una función medible con valor de difuso \bar{g} , se define como

$$\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \mu(\{y \in \Omega : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq t\}) \geq \tau\}) \geq \eta\}) \rightarrow 0 \text{ si } k, l, p \rightarrow \infty \tag{2}$$

para cualquier $q, \tau, \eta > 0$. Esto lo denotaremos como $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\delta_3, \mu} \bar{g}$. Si le cambiamos el orden a 2, obtenemos la interna convergencia estadística en medida de una triple sucesión de funciones medibles con valores difusos (\bar{g}_{uvq}) a una función medible con valor de difuso \bar{g} , la cual se define como

$$\mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq t\}) \geq \tau\}) \geq \eta\}) \rightarrow 0 \text{ si } k, l, p \rightarrow \infty$$

Esto lo denotaremos como $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu, \delta_3} \bar{g}$.

Teorema 0.2 Sea $(\omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida y supongamos que $\bar{g}, (\bar{g}_{uvq}) \in \mathcal{L}^0$. Entonces, los siguientes enunciados se satisfacen:

1. Si $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\delta_3, \mu} \bar{g}$, entonces $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu, \delta_3} \bar{g}$.
2. Si $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu, \delta_3} \bar{g}$, entonces $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\delta_3, \mu} \bar{g}$ donde $\mu(\Omega) < \infty$.

Demostración: Dado que $\delta_{klp} : P_1 \rightarrow [0, 1] (k, l, p \in \mathbb{N})$ es una medida de probabilidad, $\mu \times \delta_{klp}$ es una medida producto sobre la álgebra producto $\mathcal{M} \otimes P_1$ de subconjuntos de $\Omega \times (\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N})$. Ahora, para un $q > 0$, tenemos que $S_q = \{(y, (u, v, q)) \in \Omega \times (\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}) : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{y}) \geq q\}$. Definamos una función $\phi : \Omega \times (\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}) \rightarrow \mathbb{R}$ donde $\phi((y, (u, v, q))) = D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)), (y, (u, v, q)) \in \Omega \times (\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N})$ es $\mathcal{M} \otimes P_1$ -medible. Por lo tanto, $S_q \in \mathcal{M} \otimes P_1$. Ahora, para cualquier $B \subset \Omega \times (\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N})$, definamos $B(y) = \{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : (y, (u, v, q)) \in B\}$ si $y \in \Omega$, y $B(u, v, q) = \{y \in \Omega : (y, (u, v, q)) \in B\}$ si $(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}$.

1. Para probar (1), debemos probar que

$$\forall \varepsilon, \eta > 0, \exists k_0, l_0, p_0 \in \mathbb{N}, \forall k \geq k_0, l \geq l_0, p \geq p_0, \mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q(y)) \geq \eta\}) < \varepsilon \tag{3}$$

para $\eta > 0$ y $\varepsilon > 0$. Dado que $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu, \delta_3} \bar{g}$, para un $k_0, l_0, p_0 \in \mathbb{N}$ y para todo $k \geq k_0, l \geq l_0$ y $p \geq p_0$, tenemos que.

$$\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \mu(S_q(u, v, q)) \geq 1\}) < \frac{\eta}{3} \tag{4}$$

y

$$\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \mu(S_q(u, v, q)) \geq \frac{\eta \varepsilon}{6}\}) < \frac{\eta \varepsilon}{6}. \tag{5}$$

Ahora, consideremos que $E = \{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \mu(S_q(u, v, q)) < 1\}$. Entonces, de (4) tenemos que $\delta_{klp}(\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} - E) < \frac{\eta}{3}$, para todo $k \geq k_0, l \geq l_0$ y $p \geq p_0$. Por lo tanto, para todo $k \geq k_0, l \geq l_0$ y $p \geq p_0$ tenemos que

$$\begin{aligned} &\mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q(y)) \geq \eta\}) \\ &\leq \mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q(y) \cap E) \geq \frac{\eta}{3}\}) + \mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q(y) - E) \geq \frac{\eta}{3}\}) \\ &\leq \mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q(y) \cap E) \geq \frac{\eta}{3}\}). \end{aligned}$$

Ahora, sea $S_q^* = S_q \cap (\Omega \times E)$. De esto obtenemos que, $S_q^*(y) = S_q(y) \cap E$ (para $y \in \Omega$) y $S_q^*(u, v, q) = S_q(u, v, q)$ (para $(u, v, q) \in E$).

Para obtener la relación de (3), es suficiente si probamos que para todo $k \geq k_0, l \geq l_0$ y $p \geq p_0$,

$$\mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q^*(y)) \geq \frac{\eta}{3}\}) < \varepsilon. \tag{6}$$

Para el conjunto $S_q^* \subset \Omega \times E$ y para todo $k, l, p \in \mathbb{N}$, aplicando el teorema de Fubini para la función característica de S_q^* de una medida finita $\mu \times \delta_{klp}$. En consecuencia,

$$S_q^* = \bigcup_{(u,v,q) \in E} (\{(u, v, q)\} \times S_q(u, v, q)), \text{ donde } \mu(S_q(u, v, q)) < 1 \text{ para todo } (u, v, q) \in E \text{ y}$$

$$\delta_{klp}(\{(u, v, q)\}) = 0 \text{ para todo } u > k, v > l \text{ y } q > p. \text{ Así, } \int \int \int_E \mu(S_q^*(u, v, q)) dudvdq =$$

$$(\mu \times \delta_{klp})(S_\eta^*) = \int_\Omega \delta_{klp}(S_\eta^*(y)) dy.$$

Asumiendo k_0, l_0 y p_0 tal que $k \geq k_0, l \geq l_0$ y $p \geq p_0$, tenemos que

$$\begin{aligned} \frac{\eta \varepsilon}{3} &> \frac{\eta \varepsilon}{6} + \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \mu(S_q(u, v, q)) \geq \frac{\eta \varepsilon}{6}\}) \\ &\geq \int \int \int_{\{(u,v,q) \in E : \mu(S_q(u,v,q)) < \frac{\eta \varepsilon}{6}\}} \mu(S_q(u, v, q)) dudvdq \\ &\quad + \int \int \int_{\{(u,v,q) \in E : \mu(S_q(u,v,q)) < \frac{\eta \varepsilon}{6}\}} 1 dudvdq \\ &\geq \int \int \int_E \mu(S_q(u, v, q)) dudvdq \\ &= \int \int \int_E \mu(S_q^*(u, v, q)) dudvdq \\ &= \int_\Omega \delta_{klp}(S_q^*(y)) dy \\ &\geq \int_{\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q^*(y)) \geq \frac{\eta}{3}\}} \delta_{klp}(S_q^*(y)) dy \\ &\geq \frac{\eta}{3} \mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q^*(y)) \geq \frac{\eta}{3}\}), \end{aligned}$$

y esto muestra que la estricta desigualdad (6) es verdadera.

- Supongamos que $\mu(\Omega) < \infty$. Para $q > 0$. Para probar (2), necesitamos mostrar que para todo $\varepsilon, \eta > 0$, existe $k_0, l_0, p_0 \in \mathbb{N}$ para todo $k \geq k_0, l \geq l_0$ y $p \geq p_0$, $\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \mu(S_q(u, v, q)) \geq \eta\}) < \varepsilon$.

Dado que $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu, \delta_3} \bar{g}$, donde $k_0, l_0, p_0 \in \mathbb{N}$ para todo $k \geq k_0, l \geq l_0$ y $p \geq p_0$, tenemos que $\mu(\{y \in \Omega : \delta_3^{klp}(S_q(y)) \geq \frac{\eta \varepsilon}{3\mu(\Omega)}\}) < \frac{\eta \varepsilon}{3}$, para todo $\varepsilon > 0$ y $\eta > 0$ dados.

Aplicando el teorema de Fubini para la función característica de $S_q \subset \Omega \times (\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N})$, tenemos que $\int_\Omega \delta_{klp}(S_q(y)) dy = (\mu \times \delta_{klp})(S_q) = \int \int \int_{\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}} \mu(S_q(u, v, q)) dudvdq$.

Ahora, asumiendo $k_0, l_0, p_0 \in \mathbb{N}$ para todo $k \geq k_0, l \geq l_0$ y $p \geq p_0$, obtenemos que.

$$\begin{aligned} \eta \varepsilon &> \frac{\eta \varepsilon \mu(\Omega)}{3\mu(\Omega)} + \mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(S_q(y)) \geq \frac{\eta \varepsilon}{3\mu(\Omega)}\}) \\ &\geq \int_\Omega \delta_{klp}(S_q(y)) dy \\ &= \int \int \int_{\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}} \mu(S_q(u, v, q)) dudvdq \\ &\geq \int \int \int_{\{(u,v,q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \mu(S_q(u,v,q)) \geq \eta\}} \mu(S_q(u, v, q)) dudvdq \\ &\geq \eta \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : \mu(S_q(u, v, q)) \geq \eta\}). \end{aligned}$$

Esto completa la demostración.

El Teorema 0.2 muestra que las convergencias de la Definición 0.4 son equivalentes si Ω es un espacio de medida finito. Por lo tanto, considerando el espacio de medida finito Ω , definimos la convergencia en medida como lo muestra la Definición 0.5.

Definición 0.5 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida finita. Consideremos que $\bar{g}_{uvq}, \bar{g} \in \mathcal{L}^0$. Una triple sucesión de funciones medibles con valores difusos (\bar{g}_{uvq}) es convergente en medida a una función medible con valores difusos \bar{g} si $\mu(\{y \in \Omega : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq q\}) \geq q$ converge a 0 para todo $q > 0$. Esto lo denotaremos como $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu} \bar{g}$.

Definición 0.6 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida finita. Consideremos que $\bar{g}_{uvq}, \bar{g} \in \mathcal{L}^0$. Una triple sucesión de funciones medibles con valores difusos (\bar{g}_{uvq}) es estadísticamente convergente en medida a una función medible con valores difusos \bar{g} si $\mu(\{y \in \Omega : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq q\})$ es estadísticamente convergente a cero para todo $q > 0$. Esto lo denotaremos como $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu S_3} \bar{g}$.

Proposición 0.1 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida finita y consideremos que $\bar{g}_{uvq}, \bar{g} \in \mathcal{L}^0$. Entonces $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu S_3} \bar{g}$ implica $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu} \bar{g}$.

Demostración: Es consecuencia directa de las definiciones 0.2 y 0.6.

Teorema 0.3 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida y sea $(\bar{g}_{uvq}), \bar{g} \in \mathcal{L}^0$. Si la triple sucesión de funciones con valores difusos (\bar{g}_{uvq}) converge puntualmente estadísticamente a una función con valores difusos \bar{g} casi en todas partes sobre Ω , entonces $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{\mu S_3} \bar{g}$.

Demostración: Supongamos que $\bar{g}_{uvq}(y) \xrightarrow{pS_3} \bar{g}(y)$ casi en todas partes sobre Ω . Del Teorema 0.2 podemos inferir que $\bar{g}_{uvq}(y) \xrightarrow{\mu, \delta_3} \bar{g}(y)$ es equivalente a $\bar{g}_{uvq}(y) \xrightarrow{\mu S_3} \bar{g}(y)$. Así, para probar el resultado, vamos a probar que $\bar{g}_{uvq}(y) \xrightarrow{\mu, \delta_3} \bar{g}(y)$.

Supongamos que para todo $\varepsilon > 0$ y $q > 0$. Por el Teorema 0.1 tenemos que $A \subset \mathcal{M}$ tal que $\bar{g}_{uvq|A} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}|_A$ y $\mu(\Omega - A) < \varepsilon$. Ahora, para indexaciones m, n e i , tenemos que $\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq q\}) < q$ para todo $k \geq m, l \geq n$ y $p \geq i$, e $y \in A$. Así, para todo $k \geq m, l \geq n$ y $p \geq i$, tenemos que $\{y \in \Omega : \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq q\}) \geq q\} \subset \Omega - A$. Por lo tanto, para todo $k \geq m, l \geq n$ y $p \geq i$, $\mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq q\}) \geq q\}) < \varepsilon$.

Teorema 0.4 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida finita y consideremos que $\bar{g}_{uvq}, \bar{g} \in \mathcal{L}^0$. Si $\bar{g}_{uvq} \xrightarrow{pS_3} \bar{g}$ casi en todas partes sobre Ω , entonces $\bar{g}_{uvq}(y) \xrightarrow{\mu S_3} \bar{g}(y)$.

Demostración: Para $q, \varepsilon > 0$ dados y por el Teorema 0.1, existe un $A \subset \Omega$ tal que $(\bar{g}_{uvq|A} \xrightarrow{eS_3} \bar{g}|_A)$ sobre A y $\mu(\Omega - A) < \varepsilon$. Ahora, consideremos $m, n, i \in \mathbb{N}$ tal que $\delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq q\}) < q$, para todo $k \geq m, l \geq n$ y $p \geq i$, y $y \in A$. En consecuencia, $\{y \in \Omega : \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq q\}) \geq q\} \subset \Omega - A$, para todo $k \geq m, l \geq n$ y $p \geq i$. Por lo tanto, concluimos que $\mu(\{y \in \Omega : \delta_{klp}(\{(u, v, q) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} : D(\bar{g}_{uvq}(y), \bar{g}(y)) \geq q\}) \geq q\}) < \varepsilon$.

Corolario 0.2 Sea $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ un espacio de medida finita y consideremos que $\bar{g}_{uvq}, \bar{g} \in \mathcal{L}^0$. Si $\bar{g}_{uvq}(y) \xrightarrow{\mu S_3} \bar{g}(y)$, entonces existe una sub-sucesión $(\bar{g}_{u_m v_n q_i})$ de (\bar{g}_{uvq}) tal que $\bar{g}_{u_m v_n q_i}(y) \xrightarrow{pS_3} \bar{g}(y)$ casi en todas partes sobre Ω .

Demostración: Supongamos que $\bar{g}_{uvq}(y) \xrightarrow{\mu S_3} \bar{g}(y)$, así, cualquier sub-sucesión $(\bar{g}_{u_m v_n q_i})$ de (\bar{g}_{uvq}) converge estadísticamente en medida a \bar{g} . Por lo tanto, (\bar{g}_{uvq}) tiene una sub-sucesión que converge estadísticamente en medida a \bar{g} casi en todas partes sobre Ω . Esto significa que $\bar{g}_{u_m v_n q_i}(y) \xrightarrow{pS_3} \bar{g}(y)$ casi en todas partes sobre Ω .

Conclusión

En este artículo, probamos la versión estadística del teorema de Egorov para secuencias triples de funciones con valores difusos definidas en un espacio de medida finita $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$. Además, definimos las nociones de convergencia estadística externa e interna para sucesiones triples de funciones medibles con valores difusos y se demostró que estos dos tipos de convergencia estadística son equivalentes si la medida es finita. Por otra parte, introdujimos una nueva noción de convergencia estadística en medida para sucesiones triples de funciones medibles con valores difusos sobre espacios de medida finita y obtuvimos algunos resultados interesantes.

Por otro lado, como continuación del presente artículo, se puede definir la noción de convergencia uniformemente estadística en medida y estudiar algunas relaciones entre las nociones introducidas en este documento. Adicionalmente, se puede extender el estudio de las convergencias definidas y estudiadas en este artículo sobre la convergencia lacunary estadística (Fridy & Orhan, 1993), espacios de ideales teniendo en cuenta los estudios realizados sobre convergencia de ideales para sucesiones triples (ver (Kostyrko et al., 2000/2001); (Sahiner & Tripathy, 2008)), espacios normados neutrosóficos (Granados & Dhital, 2021), sucesiones inciertas complejas (Das et al., 2021) y como aplicación para los investigadores que estudian la teoría de aproximación y la teoría de sumabilidad estadística, pueden aplicar teoremas de aproximación de tipo de Korovkin para funciones de tres variables utilizando los métodos de convergencia definidos en este artículo.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

Agradecimientos

El autor agradece a los revisores y al editor por sus comentarios sobre el artículo que mejoraron la presentación del artículo.

References

- Balcerzak, M., Dems, K., & Komisarski, A. (2007). Statistical convergence and ideal convergence for sequences of functions. *J. Math. Anal. Appl.*, **328**(), 715–729.
- Canak, I., Totur, U., & Önder, Z. (2017). A tauberian theorem for $(c, 1, 1)$ summable double sequences of fuzzy numbers. *Iran. J. Fuzzy Syst.*, **14**(1), 61–75.
- Das, B., Tripathy, B. C., Debnath, P., & Bhattacharya, B. (2021). Statistical convergence of complex uncertain triple sequence. *Communications in Statistics - Theory and Methods*(), .
- Esi, A., & Necdet, M. (2014). Almost convergence of triple sequences. *Global Journal of Mathematical Analysis*, **2**(1), 6–10.
- Fast, H. (1951). Statistical convergence and ideal convergence for sequences of functions. *Coll. Math.*, **2**(), 241–244.
- Fridy, J. (1985). On statistical convergence. *Analysis*, **5**(4), 301–313.
- Fridy, J., & Orhan, C. (1993). Lacunary statistical convergence. *Pacific Journal of Mathematics*, **160**(1), 43–51.
- Gong, Z., Zhang, L., & Zhu, X. (2015). The statistical convergence for sequences of fuzzy-number-valued functions. *Inf. Sci.*, **295**(), 182–195.
- Granados, C. (2021). New notions of triple sequences on ideal spaces in metric spaces. *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and its Application*, **5**(3), 363–368.
- Granados, C., & Dhital, A. (2021). Statistical convergence of double sequences in neutrosophic normed spaces. *Neutrosophic Sets and Systems*, **42**(), 334–344.

- Hazarika, B., Alotaibi, A., & Mohiuddine, S.** (2020). Statistical convergence in measure for double sequences of fuzzy valued functions. *Soft Computing*, **24**(6), 6613–6622.
- Ilkhan, M., & Kara, E.** (2018). A new type of statistical cauchy sequence and its relation to bourbaki completeness. *Cogent. Math. Stat.*, **5**(1), 1–9.
- Kim, Y., & Ghil, B.** (1997). Integrals of fuzzy-number-valued functions. *Fuzzy Sets Syst.*, **86**(1), 213–222.
- Kostyrko, P., Salat, T., & Wilczynski, W.** (2000/2001). *i*-convergence. *Real Anal. Exchange*, **26**(1), 669–689.
- Kumar, P., Kumar, V., & Bhatia, S.** (2012). Multiple sequences of fuzzy numbers and their statistical convergence. *Mathematical Sciences*, **6**(2), 1–7.
- Mohiuddine, S., Alotaibi, A., & Mursaleen, M.** (2012). Statistical convergence of double sequences in locally solid riesz spaces. *Abstr. Appl. Anal.*, **2012**(9), 719–729.
- Mohiuddine, S., Asiri, A., & Hazarika, B.** (2019). Weighted statistical convergence through difference operator of sequences of fuzzy numbers with application to fuzzy approximation theorems. *Int. J. Gen. Syst.*, **48**(5), 492–506.
- Mursaleen, M., & Mohiuddine, S.** (2009). Statistical convergence of double sequences in intuitionistic fuzzy normed spaces. *Chaos Solitons Fractals*, **41**(5), 2414–2421.
- Negoita, C., & Ralescu, D.** (1975). *Applications of fuzzy sets to systems analysis*. Wiley, New York.
- Nuray, F., & Savas, E.** (1995). Statistical convergence of sequences of fuzzy numbers. *Math. Slovaca*, **45**(3), 269–273.
- Pringsheim, A.** (1900). Zur theorie der zweifach unendlichen zahlenfolgen. , **53**(1), 289–321.
- Sahiner, A., Gurdal, A., & Duden, K.** (2007). Triple sequences and their statistical convergence. *Selcuk J. Appl. Math.*, **8**(2), 49–55.
- Sahiner, A., & Tripathy, B. C.** (2008). Some *i*-related properties of triple sequences. *Selcuk J. Appl. Math.*, **9**(2), 9–18.
- Salát, T.** (1980). On statistically convergent sequences of real numbers. *Math. Slovaca*, **30**(1), 139–150.
- Savas, E.** (1996). A note on double sequences of fuzzy numbers. *Turkish J. Math.*, **20**(2), 175–178.
- Savas, E., & Mursaleen, M.** (2004). On statistically convergent double sequences of fuzzy numbers. *Inf. Sci.*, **162**(3–4), 183–192.
- Schoenberg, I.** (1959). The integrability of certain functions and related summability methods. *Am. Math. Monthly.*, **66**(3), 361–375.
- Talo, , & Bayazit, F.** (2017). Tauberian theorems for statistically convergent double sequences of fuzzy numbers. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, **32**(3), 2617–2624.
- Zadeh, L.** (1965). Fuzzy sets. *Inf. Control*, **8**(3), 338–353.
- Zhang, B.** (2001). On measurability of fuzzy-number-valued functions. *Fuzzy Sets Syst.*, **120**(1), 505–509.
- Zygmund, A.** (1935). *Trigonometrical series, vol. 5 of monografías de matemáticas*. Warszawa-Lwow.
- Önder, Z., Çanak, I., & Totur, U.** (2017). Tauberian theorems for statistically $(c, 1, 1)$ summable double sequences of fuzzy numbers. *Open Math.*, **15**(1), 157–178.

Artículo de revisión

El reto de reemplazar el cristalino

The challenge of replacing the crystalline lens

✉ María S. Millán

Facultad de Óptica y Optometría de Terrassa, Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech, Barcelona, España

Artículo de posesión para admisión de María S. Millán, como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

La catarata o pérdida de transparencia del cristalino es un trastorno de la visión muy invalidante que ha sufrido la humanidad a lo largo de la historia. En las últimas décadas se trata con éxito mediante la sustitución de la lente natural por una lente artificial intraocular. Este estudio se centra en los aspectos ópticos, desde el diseño del implante a los efectos en el sistema visual, y en dos temas relacionados con la formación de imágenes de gran interés actualmente: a) los diseños de lentes intraoculares que, además de eliminar la catarata, corrigen parcialmente la presbicia, y b) la calidad de una lente intraocular evaluada por dos vías metodológicas distintas: una óptica (*in vitro*), en el laboratorio, y otra visual (*in vivo*) mediante el examen clínico de pacientes con implante. Las métricas que correlacionan ambos métodos buscan una predictibilidad más ajustada de los resultados posoperatorios. Ante la gran variedad de lentes intraoculares existente en la actualidad, con propiedades ópticas notablemente diferentes, se hace necesaria una selección personalizada del implante que mejor se adapte a las características del paciente y tenga en cuenta su estilo de vida.

Palabras clave: Lente intraocular; Óptica visual; Calidad de formación de imágenes; Función de transferencia de modulación; Aberraciones ópticas; Cirugía de cataratas.

Abstract

Cataract, which involves a loss of transparency of the crystalline lens, is a very disabling vision disorder that has afflicted mankind throughout our history. In recent decades, it has been successfully treated by replacing the natural lens with an artificial intraocular lens. This paper focuses on the optical aspects, from the design of the implant to the effects on the visual system and considers two imaging issues of great interest currently: (a) intraocular lens designs that, besides eliminating cataract, partially correct presbyopia and b) the quality of an intraocular lens evaluated by two different methodological ways: one, optical (*in vitro*) in the laboratory, and the other visual (*in vivo*) by clinical examination of implanted patients. The metrics correlating both methods aim at better predictability of postoperative results. Given the wide variety of intraocular lenses currently available with markedly different optical properties, a personalized selection of the implant that best suits the patient's characteristics and takes into account their lifestyle is necessary.

Keywords: Intraocular lens; Visual optics; Imaging quality; Modulation transfer function; Optical aberrations; Cataract surgery.

Citación: Millán MS. El reto de reemplazar el cristalino. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1022-1038, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1522>

Editor: Román Eduardo Castañeda Sepúlveda

***Correspondencia:** María S. Millán m.millan@upc.edu

Recibido: 22 de julio de 2021

Aceptado: 3 de septiembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Introducción

La pérdida de transparencia del cristalino, la lente natural situada en el interior del ojo, se conoce como catarata y es una causa común del deterioro de la visión en todo el mundo. Aunque la formación de cataratas puede tener diversos orígenes, aparece por lo general a edades avanzadas y no es extraño que llegue a producir la ceguera. Hablamos de un trastorno muy invalidante que ha sufrido la humanidad a lo largo de su historia y que

en las últimas décadas se trata con éxito mediante la sustitución de la lente natural por una lente artificial o lente intraocular (*intraocular lens*, IOL). Los avances científicos y técnicos han propiciado que en la actualidad la intervención quirúrgica sea ambulatoria, de rápida recuperación y una de las más practicadas en el mundo, aunque con indicadores muy diferentes según la situación socioeconómica (Wang, *et al.*, 2016), pues en los países desarrollados la tasa es de 4.000 a 10.000 por millón de habitantes al año y raramente la catarata llega a producir la ceguera, en tanto que en los países en vías de desarrollo la tasa está entre 500 y 2.000. Los pacientes se someten a esta cirugía cuando la catarata se encuentra en las primeras fases, mucho antes de que madure y sus efectos limiten su actividad, autonomía y estilo de vida. Más allá de la sustitución del cristalino, el implante de una lente intraocular se está utilizando también como un método de cirugía para corregir errores refractivos (por ejemplo, en el caso de miopías elevadas).

Al contemplar el fascinante proceso evolutivo de la cirugía de cataratas surgen varias preguntas: ¿cómo se ha llegado hasta aquí? ¿Qué disciplinas de la ciencia y la técnica han intervenido y cuáles son sus principales aportaciones? ¿Qué características debe tener la lente artificial implantada para sustituir funcionalmente al cristalino?

En los apartados que siguen se abordan los aspectos generales del problema y se dan las claves para un estudio más detallado. En este contexto, el artículo se centra en los aspectos relacionados con la óptica, tanto el diseño óptico del implante como sus efectos en el sistema visual humano, prestando especial atención a dos temas relacionados con la formación de imágenes que hoy suscitan gran interés: a) los diseños de lentes intraoculares que permiten enfocar a varias distancias, lo que, además de eliminar la catarata, compensa parcialmente la presbicia, y b) la calidad de una lente intraocular en su doble vertiente: la calidad óptica, medida en el laboratorio, y la calidad visual, medida en la clínica a través del examen visual de los pacientes con implante. La búsqueda de métricas que correlacionen ambos métodos de análisis de calidad aspira a lograr una predictibilidad más ajustada de los resultados posoperatorios. Por último, se presentan las conclusiones más relevantes y se añaden algunas reflexiones sobre el desarrollo del tema en un futuro próximo.

Orígenes y evolución de la cirugía de catarata

Los restos arqueológicos de la civilización del antiguo Egipto aportan las referencias más antiguas de los efectos de la catarata en las personas mayores (2.500 años AC) y de la primera técnica para su tratamiento (1.200 años AC), el *couching*, o abatimiento del cristalino (Ascaso & Huerva, 2013). Las similitudes encontradas en las descripciones más remotas de esta técnica apuntan a un origen común, que podría situarse en Egipto o India, y su posterior introducción en el mundo conocido de la época (Leffler, *et al.*, 2020). El *couching* consistía en introducir una aguja para desprender y abatir el cristalino opaco, abriendo paso a la luz tras la pupila y dejando la catarata en el interior de la cavidad ocular (Figura 1). Se aplicaba sin anestesia y con la participación de un ayudante que sostenía la cabeza del paciente. Con esta técnica se conseguía una mejora instantánea de la visión. No obstante, el éxito en el inmediato posoperatorio por lo general se frustraba a los pocos días debido a la aparición de infecciones y otras complicaciones que derivaban a menudo en la ceguera. En el siglo XVII se alcanzó un mayor conocimiento del sistema óptico del ojo y se identificó la catarata con la opacidad de la lente del cristalino (Spalton, 2019). El abatimiento del cristalino se utilizó de manera predominante hasta bien entrado el siglo XVIII y se practicó a los miembros de la aristocracia europea y a numerosas personalidades. Por ejemplo, cabe citar al famoso compositor Johann Sebastian Bach, intervenido en 1750, y también a George Frideric Händel; ninguno de ellos pudo librarse de la ceguera, sin embargo (Ascaso & Huerva, 2013; Spalton, 2019). El *couching* era un método arriesgado e inefectivo que, en el mejor de los casos, restauraba una visión degradada y, con más frecuencia, acababa en ceguera.

La extracción del cristalino sin la cápsula que lo envuelve (extracapsular) fue practicada por Jacques Daviel en 1747 (Ascaso & Huerva, 2013; Spalton, 2019) (Figura 1). La extracción completa, incluida la cápsula (intracapsular), mediante una gran incisión limbal

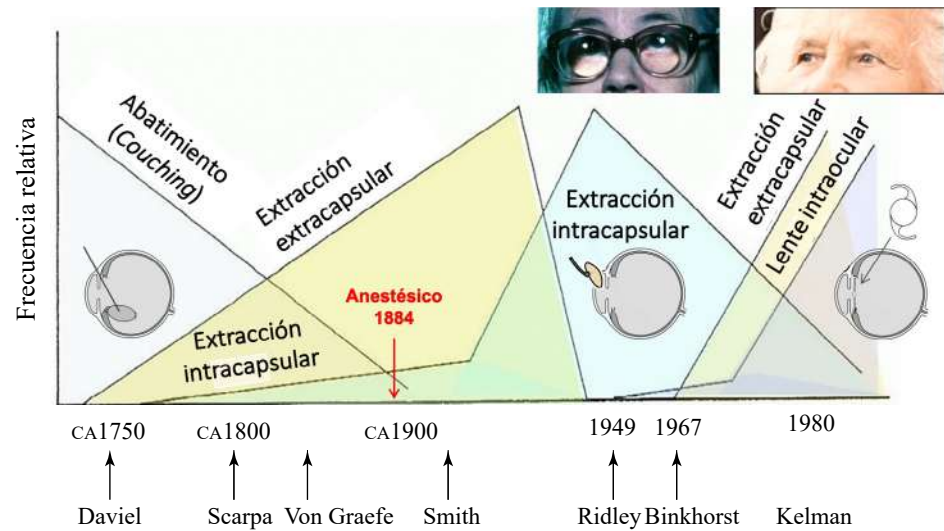


Figura 1. Origen y evolución de la cirugía de catarata. Figura adaptada de Spalton, D. (2019)

fue documentada por Samuel Sharp en 1753 (Davis, 2016). Ambas técnicas representaban un avance significativo con respecto al método tradicional y coexistieron hasta las últimas décadas del siglo XX con mayor o menor preferencia por parte de los cirujanos. La aplicación de anestesia local en 1884 (Spalton, 2019), las técnicas de esterilización y otras mejoras en los procedimientos quirúrgicos incrementaron el éxito de la operación y redujeron las tasas de ceguera. Para extraer el cristalino se practicaba una incisión en la córnea relativamente grande (no inferior a 10 mm), lo que ralentizaba la recuperación del paciente y podía inducir astigmatismo, entre otras complicaciones. Una de ellas, inevitable, era la afaquia, caracterizada por una disminución significativa de la potencia refractiva del ojo tras la pérdida del cristalino, lo que da lugar a una visión muy borrosa.

Para aliviar la visión afáquica se prescribía el uso de unas gafas especiales, con unas lentes muy gruesas, de una potencia no inferior a las 10 D (dioptrías). Estas lentes presentaban ciertos inconvenientes, como el aumento y la distorsión de la imagen, la limitación del campo visual, el peso excesivo y el aspecto claramente antiestético. Era inusual una corrección basada en las lentes de contacto debido al riesgo de intolerancia y las complicaciones corneales que producían en muchos pacientes.

La solución que abrió una nueva era consistió en introducir una lente de potencia refractiva adecuada en lugar del cristalino extraído (Ascaso & Huerva, 2013; Davis, 2016). Harold Ridley fue el oftalmólogo que propuso y desarrolló la idea de implantar una lente intraocular artificial de material inerte (polimetilmetacrilato, PMMA) a los pacientes de cataratas, procedimiento que llevó a cabo con éxito en 1950, si bien no suscitó el interés sino el rechazo de la comunidad médica de la época. Ridley, sus colaboradores y otros oftalmólogos continuaron refinando la técnica quirúrgica para implantar una lente intraocular y superar las complicaciones posoperatorias. La cirugía de cataratas para extraer el cristalino y sustituirlo por un implante de lente intraocular fue ganando aceptación gradualmente hacia finales de la década de 1960. Para la extracción del cristalino se prefería el método extracapsular, que permitía conservar la cápsula en la que se instalaría el implante. La facoemulsificación y el agente viscoelástico fueron dos mejoras muy relevantes (Ascaso & Huerva, 2013; Davis, 2016). Charles Kelman introdujo en 1967 la facoemulsificación, consistente en utilizar una aguja y ultrasonidos para emulsionar y aspirar la catarata con una incisión considerablemente menor (3 o 4 mm). La incisión lateral en la córnea se fue reduciendo progresivamente hasta el punto de no requerir sutura. El agente viscoelástico, introducido en 1972, es similar a un gel que se inyecta en la cámara anterior para asegurar el espacio suficiente, proteger las estructuras oculares y estabilizar el ojo durante las

fases de la operación. La extracción del cristalino se realiza mediante un corte en la parte anterior de la cápsula (capsulorrexis) que crea una ventana circular a través de la cual se realiza la facoemulsificación y absorción de la lente. La cápsula restante, o saco capsular, sirve para alojar la lente intraocular que se implanta. En 1980 llegó la primera lente intraocular plegable o enrollable, de material flexible, que se inserta en la cápsula mediante un inyector (Davis, 2016). Esta técnica requiere una incisión todavía más pequeña, que actualmente está en torno a los 2,2 mm.

Hoy no se concibe una operación de catarata sin la sustitución del cristalino por una lente intraocular. Millones de pacientes se someten anualmente a esta intervención en todo el mundo. Podemos decir que las últimas décadas, finales del siglo XX y principios del XXI, constituyen la edad de oro de la oftalmología y las ciencias de la visión, en buena parte por los grandes avances conseguidos en la cirugía de cataratas.

La lente intraocular. Aspectos ópticos de un problema multidisciplinario

La moderna cirugía de cataratas con el implante de una lente intraocular en el saco capsular recoge el fruto de diversos avances experimentados en múltiples disciplinas. Entre ellos cabe resaltar un conocimiento más profundo del sistema visual humano, del órgano del ojo y las enfermedades asociadas, una mayor precisión de las técnicas de biometría ocular en vivo, un desarrollo refinado de las técnicas quirúrgicas, un diseño óptico con elevada potencia de cálculo y unas simulaciones matemáticas más precisas, así como nuevos materiales ópticos biocompatibles y una ingeniería de fabricación y control de alta tecnología aplicada a la medicina.

Por el otro lado, los cambios demográficos, con un incremento notable en la esperanza de vida, han acelerado el desarrollo de la cirugía de cataratas. En muchos países, amplios sectores de la población mantienen un estilo de vida activo y autónomo al que no quieren renunciar cuando sienten los efectos del envejecimiento del cristalino. La demanda visual de estos pacientes es un estímulo constante para el desarrollo de nuevos diseños de lentes intraoculares.

Entre las múltiples disciplinas involucradas, esta revisión se centra en la óptica. También aquí el ámbito de trabajo es amplio y abarca diversos aspectos de la lente intraocular: el material y su transmitancia espectral; el diseño de los hápticos y el perfil del borde; el cálculo de la potencia; la compensación de aberraciones; la compensación de la presbicia para recuperar la visión de cerca; la calidad óptica en el laboratorio (*in vitro*), y la calidad visual en la clínica (*in vivo*).

Además de biocompatibilidad y flexibilidad, las características ópticas del material de la lente influyen de forma determinante en su diseño. El índice de refracción, por lo general entre 1,46 y 1,55, es más alto que el del cristalino humano, cuyo índice de refracción equivalente suele aproximarse a 1,42 (en realidad, el cristalino no tiene un índice constante, sino que es mayor en el centro que en la periferia) (Atchison & Smith, 2000). Un índice más alto facilita alcanzar la potencia necesaria (unas 20 D) con lentes más delgadas. Por otra parte, la variación del índice de refracción con la longitud de onda (representada generalmente por el número de Abbe) es la causa de la dispersión cromática del material. La dispersión de la lente intraocular, junto con la que producen los demás medios oculares, da lugar a las aberraciones cromáticas que presentan las imágenes en la retina, como se ampliará en un apartado posterior.

La curva de transmitancia espectral varía de unos modelos de lentes intraoculares a otros, pero, en general, filtran la luz ultravioleta. Algunos modelos filtran también parte de la luz azul, lo cual les confiere un aspecto amarillento. Entre las razones para filtrar la luz azul están la mayor protección de la retina contra la degeneración macular asociada con la edad y el mantenimiento de una visión más parecida a la que corresponde al paciente por su edad (Yang & Afshari, 2014). Además, el filtro azul reduce el impacto de la aberración cromática, de cierta importancia en algunos diseños de lentes.

A diferencia de los materiales rígidos utilizados al principio (como el PMMA), los materiales blandos desarrollados posteriormente (silicona, acrílico hidrofílico y acrílico hidrofóbico) permiten enrollar la lente intraocular y realizar la inserción mediante una aguja, practicando una pequeña incisión que no requiere sutura y es menos traumática (Zeng & Fang, 2018).

Un problema que pueden presentar los materiales hidrofóbicos es la formación de microvacuolas en la lente. Son conocidas como “glistenings” por su apariencia brillante en la observación clínica con lámpara de hendidura. En función de su tamaño, distribución y densidad, así como de los índices de refracción de las vacuolas y del material de la lente, se puede producir un incremento notable de la luz parásita y del esparcimiento de la luz (scattering) en el interior del ojo. Ambos efectos son la causa, a su vez, de una disminución del contraste en la imagen retiniana que afectaría la calidad visual del paciente (Van der Mooren, *et al.*, 2013). Los estudios sobre este tema han llevado a los fabricantes a desarrollar materiales resistentes al glistening para los nuevos modelos de lentes.

Los hápticos aseguran una posición estable de la lente en el saco capsular. Aunque no forman parte de la zona óptica de la lente intraocular, su diseño es importante para minimizar el riesgo de desplazamientos axiales o laterales e inclinaciones, lo que contribuiría al incremento de aberraciones que deterioran la imagen retiniana (Zeng & Fang, 2018). En el caso de las lentes tóricas, utilizadas en los pacientes que requieren compensar su astigmatismo corneal, la estabilidad de la lente es aún más crítica. Por la asimetría propia del astigmatismo, es preciso evitar la rotación en el plano de la lente para lograr una solución efectiva con una lente tórica.

La proliferación de células epiteliales que se adhieren a la lente una vez implantada puede opacificar la parte posterior de la cápsula. En tal caso, se hace necesario un recorte de la cápsula en una intervención posoperatoria adicional que se efectúa mediante láser de Nd:Yag. Se ha comprobado que si los bordes de la lente son de perfil rectangular y abruptos, y no redondeados, se reduce el riesgo de opacificación de la cápsula (Cheng, *et al.*, 2007).

Formación de la imagen óptica y compensación de las aberraciones

En el cálculo de la potencia de la lente intraocular se consideró, inicialmente, la fórmula de las lentes delgadas para la formación de imágenes en aproximación de primer orden u óptica paraxial (Fyodorov, 1967). La potencia de la lente intraocular (P_{IOL}) es la diferencia entre la vergencia del haz emergente o haz imagen (X') y la del haz incidente o haz objeto (X), $P_{IOL} = X' - X$. Esta expresión se puede reescribir en función del poder refractivo de la córnea (K), la distancia entre su vértice anterior y la lente intraocular, llamada posición efectiva de la lente (ELP), y la longitud axial del ojo (ALX), que es la distancia entre el vértice anterior de la córnea y la retina (Figura 2). La expresión resultante para la potencia de la lente intraocular es:

$$P_{IOL} = \frac{n_v}{ALX - ELP} - \frac{n_q}{\left(\frac{n_q}{K}\right) - ELP}, \quad (1)$$

donde n_v , n_q son los índices de refracción de los humores acuoso y vítreo, respectivamente. En la Ec. 1 se asume que K y ALX se miden para cada paciente de forma preoperatoria y que la ELP se puede predecir con suficiente precisión. Esta sencilla fórmula ha presentado, sin embargo, numerosas dificultades en su aplicación práctica por las insuficiencias relacionadas con las técnicas de biometría *in vivo* y los modelos matemáticos del ojo humano, la variabilidad entre unos ojos y otros y la diversidad en los diseños de las lentes.

La incorporación de métodos estadísticos ha permitido desarrollar nuevas fórmulas -clasificadas por generaciones- a partir del análisis de regresión de un gran número de pacientes evaluados. Estas fórmulas incluyen constantes de optimización que varían en función del tipo de lente, los parámetros biométricos, la técnica quirúrgica, etc. La predicción del resultado posoperatorio ha mejorado de manera constante en las últimas décadas

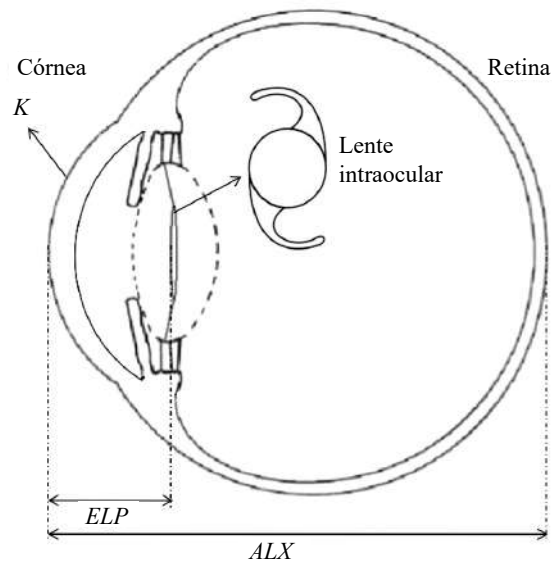


Figura 2. Sección de un ojo implantado con una lente intraocular en sustitución del cristalino (línea - - -). K, poder refractivo de la córnea; ELP, posición efectiva de la lente intraocular; ALX, longitud axial

gracias a una mayor precisión en cuatro aspectos decisivos: la medida preoperatoria de los parámetros oculares, la técnica quirúrgica, el seguimiento clínico del paciente (antes y después de la cirugía) y el cálculo de la potencia con optimización de constantes.

Las técnicas de biometría láser permiten medir la longitud axial con una precisión de $\pm 0,02$ mm (Goel, *et al.*, 2004), lo que supera en un orden de magnitud a la técnica basada en ultrasonidos. La potencia corneal (keratometría) es algo más que un simple número, se trata de un mapa de dicha potencia. Su interpretación es más laboriosa, sobre todo cuando existen aberraciones corneales o se ha practicado una cirugía refractiva previa (Yeu & Cuozzo, 2020). El procedimiento quirúrgico se ha refinado y estandarizado considerablemente, de modo que la incisión corneal ($< 3,0$ mm) y la capsulotomía que se practican actualmente tienen una baja incidencia en la predicción del resultado posoperatorio.

Hay una variedad de fórmulas para el cálculo de la potencia de la lente que incorporan constantes de optimización para predecir con más exactitud el resultado posoperatorio y reducir el error (Melles, *et al.*, 2018). Algunas fórmulas de cálculo son pública; entre las más establecidas, cabe mencionar las de Haigis, Hoffer Q, Holladay 1+2, y Sanders-Retzlaff-Kraff SRK/T. Otras fórmulas, sin embargo, no han sido publicadas y están protegidas, como es el caso de las de Barrett Universal II, EVO, Kane y Olsen. Su uso es accesible por internet y administrado por sus propietarios. Algunas de las fórmulas más recientes se basan en el trazado de rayos (Olsen, Barrett) y otras incorporan nuevos métodos estadísticos o de inteligencia artificial (EVO, Kane). Las fórmulas de cálculo modernas proporcionan mejores resultados que las de primera generación. En el estudio de Melles, *et al.* (2018), con las siete fórmulas (Barrett Universal II, Haigis, Hoffer Q, Holladay 1, Holladay 2, Olsen, y SRK/T) utilizadas en más de 18.000 implantes, se registra cómo en más del 95 % de los casos estudiados con cualquiera de ellas, el error en el equivalente esférico resultante estaba dentro de un rango de $\pm 1,00$ D de la predicción, y que, en más del 70 % ese error se reducía a $\pm 0,50$ D, un valor frecuentemente aceptado para indicar la independencia de gafas.

Sin embargo, el debate sobre qué fórmula se ajusta mejor a la predicción refractiva posoperatoria sigue abierto, ya que hoy no existe una única fórmula que cubra con precisión elevada todo el rango de variación de las características oculares. Por ello, no se descarta el uso de fórmulas distintas en función de la dimensión ocular y otros parámetros.

A instancias de la revista *American Journal of Ophthalmology*, el IOL Power Club publicó en el 2015 los protocolos para cuantificar la exactitud y precisión de las fórmulas así como de los métodos e instrumentos utilizados para el cálculo de la potencia de las lentes intraoculares (**Hoffer, et al., 2015**). La entidad recomendaba su seguimiento en los estudios comparativos que se realizan en este campo. Esta guía protocolaria fue revisada y actualizada en el 2020 (**Hoffer & Savini, 2020**) y allí se llegó a proponer un índice de calidad (formula performance index, FPI) para ordenar las fórmulas por su exactitud. El FPI se calcula matemáticamente a partir del error de predicción (diferencia entre la refracción prevista y la resultante en dioptrías).

Los primeros modelos teóricos del ojo consideraban que las superficies oculares se podían describir mediante esferas que operaban en aproximación paraxial, también llamada óptica de Gauss o de primer orden. A pesar de sus simplificaciones, el modelo de **Gullstrand (1909)**, compuesto por la asociación de cuatro superficies esféricas, se ha utilizado con profusión para explicar la formación de imágenes en el ojo y, en ese contexto, también se utilizó inicialmente como referencia para el ojo implantado con una lente intraocular (ojo pseudofáquico). Es posible compensar las aberraciones de bajo orden más frecuentes y graves, como el desenfoque y el astigmatismo, mediante superficies esféricas y tóricas.

La primera superficie corneal de un ojo normal presenta una asfericidad que se ajusta habitualmente por una curva cónica. Las aberraciones de alto orden que la córnea humana introduce de manera natural en el sistema óptico del ojo (**Schwiergerling & Greivenkamp, 1997**), aberración esférica y coma, principalmente, se pueden caracterizar a partir de las medidas de la topografía corneal mediante la técnica de trazado de rayos. Estas aberraciones se compensan parcialmente por los componentes internos (**Artal, et al., 2006**), aunque con el envejecimiento del cristalino, la compensación puede llegar a desaparecer. Tal observación llevó a diseñar lentes intraoculares asféricas que, a imitación del cristalino joven, tuvieran un efecto compensatorio sobre las aberraciones introducidas por la córnea (**Guirao, et al., 2002**) o, al menos, un efecto neutro (**Altmann, 2005**). En diversos estudios basados en predicciones teóricas (**Piers, et al., 2007**) y resultados clínicos (**Montés-Micó, et al., 2009**), se han comparado los ojos implantados con lentes esféricas y asféricas. La mayor nitidez de imagen se consigue con las lentes que compensan la aberración esférica, pero, por otro lado, estas presentan una menor tolerancia a los errores de enfoque, posicionamiento y alineación. En la actualidad se fabrica una gran variedad de lentes intraoculares asféricas, desde las que compensan totalmente la aberración esférica media inducida por la córnea hasta las que tienen un efecto neutro. Todo apunta a la posibilidad de seleccionar, de manera personalizada y preoperatoria, la lente asférica que mejor se adapte a las características corneales del paciente. Con las lentes intraoculares ajustables mediante un patrón de irradiación luminosa ultravioleta, existe la opción de modificar las propiedades ópticas de la lente una vez implantada (**Schwartz, et al., 2004**). De este modo, se contempla la posibilidad de compensar posibles errores refractivos tras la operación, así como de inducir una cierta aberración controlada para aumentar la profundidad de foco y mejorar la visión de cerca (**Villegas, et al., 2014**).

Las aberraciones cromáticas también han recibido gran atención en el diseño de las lentes intraoculares. Conviene recordar que la aberración cromática está presente en la formación de imágenes retinianas de manera natural y con magnitud elevada (2 D de variación de potencia, aproximadamente, entre los extremos rojo y azul del espectro visible) (**Thibos, et al., 1992**). Sin embargo, el sistema visual humano dispone de mecanismos propios para atenuar los efectos de la aberración cromática natural en la visión: el cristalino y el pigmento macular filtran en gran medida la luz azul y, además, los conos sensibles a cortas longitudes de onda (rango azul) tienen una baja densidad relativa en comparación con la densidad de fotorreceptores sensibles a las longitudes de onda medias (rango verde) y largas (rango rojo) (**Navarro, 2009**) (**Artal, 2014**). La adaptación natural de la visión humana a la aberración cromática explica el escaso interés clínico por su medición y compensación, a pesar de que la agudeza visual espacial binocular se vería beneficiada con una corrección bilateral de las aberraciones esférica y cromática (**Artal, et al., 2010**). La

aberración cromática y su compensación cobran un nuevo interés con el desarrollo de las lentes intraoculares multifocales (multifocal intraocular lens, MIOL) de perfil difractivo (Millán, *et al.*, 2016; Millán & Vega, 2017), a las que se refiere la sección siguiente.

Lentes intraoculares que compensan la presbicia

La lente intraocular monofocal es la que se ha venido implantando en mayor medida. Al tener una potencia o poder refractivo determinado, solamente proporciona una visión nítida de los objetos situados a una distancia concreta. La profundidad de campo es muy limitada, sobre todo cuando la iluminación es moderada (nivel mesópico), lo que requiere un incremento del tamaño pupilar.

Habitualmente, el cálculo de la potencia de la lente intraocular se ajusta para que el paciente tenga buena visión de lejos, pero puede ajustarse a otras distancias. No es extraño aumentar ligeramente la potencia de lejos (miopización) para favorecer la visión de los objetos situados a distancias intermedias, tan frecuentes en la actividad cotidiana de ciertos pacientes, lo cual se logra a costa de sacrificar una visión óptima de lejos.

La acomodación, mecanismo natural que regula la potencia del cristalino mediante la actuación del músculo ciliar, el cual modifica la curvatura de sus superficies y su grosor, es el recurso del que dispone el sistema visual para observar con nitidez los objetos situados a diferentes distancias. El envejecimiento del ojo reduce paulatinamente la amplitud de acomodación hasta quedar en un sistema de potencia fija. Este proceso progresivo se conoce como presbicia (o, popularmente, vista cansada) y llega a ser completo en la sexta década de vida (Atchison & Smith, 2000) (Duane, 1912). Esta es la situación que tienen también, si no la experimentaban ya, los pacientes con implante de lentes intraoculares monofocales, que necesitan lentes auxiliares o gafas para ver con nitidez en un rango de distancias que abarque de lejos a cerca.

La creciente demanda de los pacientes para prescindir del uso de gafas una vez operados ha propiciado el desarrollo de lentes intraoculares que permiten la visión nítida en un rango de distancias. Las soluciones actualmente más relevantes realizan una distribución de la energía más allá de un único plano de imagen y consisten en una multiplicidad de focos o en la extensión del segmento focal (lentes multifocales y lentes de foco extendido) (Figura 3) (Zeng & Fang, 2018). Otra solución intenta recuperar en lo posible el mecanismo de acomodación con la ayuda del músculo ciliar (lentes acomodativas) (Figura 4). Unas y otras se describen a continuación.

Las lentes multifocales operan con dos o más potencias que distribuyen la energía en el espacio de la imagen, lo que resulta en una formación simultánea de imágenes sobre la retina. La imagen enfocada, ya sea de un objeto lejano o cercano, aparece superpuesta a otras réplicas desenfocadas. Los mecanismos neuronales de la función cerebral permiten centrar la atención sobre la imagen nítida de interés. Bajo este principio de visión simultánea se han desarrollado lentes multifocales que cubren la visión de lejos y cerca (bifocales) o que añaden, incluso, un tercer foco para la visión intermedia (trifocales) (Figura 3). Aunque las lentes bifocales están diseñadas para proporcionar buena agudeza visual de lejos y de cerca, la discontinuidad entre ambos focos conlleva una serie de efectos indeseados: degradación de la visión intermedia, reducción de la sensibilidad al contraste y aparición de disforopsias (halos y deslumbramientos) (Alba-Bueno, *et al.*, 2014; 2018).

Los diseños multifocales se clasifican, principalmente, en refractivos y difractivos (Figura 4). Los diseños refractivos consisten en una partición de la apertura de la lente en varios sectores con potencia distinta (de lejos y cerca) para conseguir la multifocalidad. Se han propuesto dos geometrías básicas para estos sectores: simétrica (anular, concéntrica) o asimétrica, con efectos distintos en cuanto a las variaciones del tamaño pupilar que ocurren no solo al cambiar la intensidad de iluminación, sino también al enfocar a diferentes distancias (constricción acomodativa). Los diseños multifocales refractivos se han visto superados por los diseños difractivos. Estos últimos están basados, en realidad, en una combinación refractiva-difractiva de superficies (Cohen, 1993): sobre una de las superficies de la lente refractiva convencional de potencia base (P) se graba un perfil difractivo que

corresponde a una lente de potencia de adición (Pad). El conjunto opera, por lo menos, con dos órdenes de difracción: uno, para la potencia de lejos (PD) y otro para la potencia de cerca (PN) (**Figura 3**). La geometría de los anillos de difracción y la zona que ocupan en la apertura de la lente intraocular aportan nuevos grados de libertad para controlar el incremento de potencia de la visión de cerca, el número de focos, la distribución energética entre ellos y su variación con el tamaño pupilar. El perfil difractivo permite, además, actuar sobre la aberración cromática y reducirla en uno o más focos. En este sentido cabe señalar que la aberración cromática longitudinal de una lente biconvexa refractiva producida por

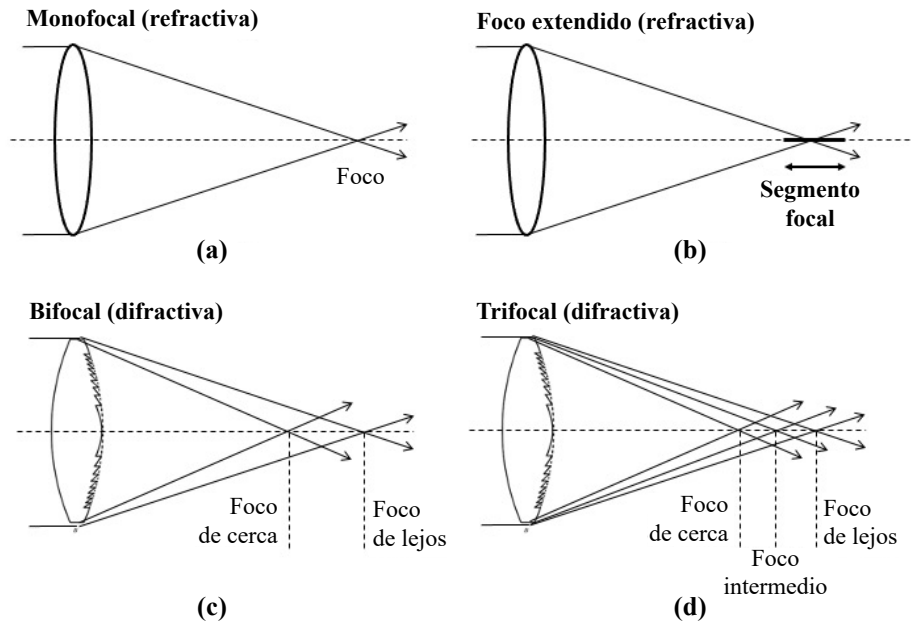


Figura 3. Lente monofocal (a), lente con extensión de foco (b), lente (c), y trifocal (d) para la corrección de la presbicia. Nota: la figura muestra esquemas muy simplificados

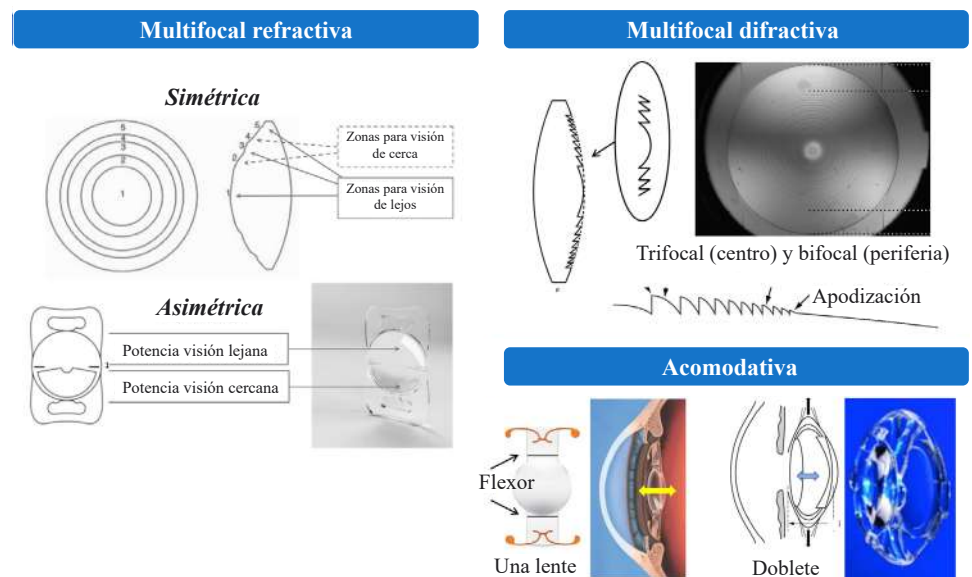


Figura 4. Lentes intraoculares correctoras de la presbicia clasificadas según el principio en el que se basan y algunos ejemplos (véase el texto)

la dispersión del medio (caracterizada por el número de Abbe), puede ser compensada por la aberración cromática de una lente difractiva, eligiendo adecuadamente el orden de difracción y las longitudes de onda de diseño (**Ravikumar, et al., 2014**). Esta propiedad, ya utilizada en el diseño de sistemas ópticos formadores de imagen, se ha tenido en cuenta en el diseño de lentes intraoculares.

Los diseños difractivos iniciales utilizaban perfiles parabólicos de módulo π que operaban con el orden cero y el primer orden de difracción para lograr que $PD=P$ y $PN=P+Pad$ con la misma eficiencia energética (41,5 %) (**Cohen, 1993; Castignoles, et al., 2010**). Al reducir la altura de los anillos de difracción del centro a la periferia (apodización) (**Davison & Simpson, 2006**), se consigue favorecer la eficiencia energética en la visión de lejos cuando el tamaño pupilar aumenta (**Vega, et al., 2011**), lo que a su vez permite reducir la molesta percepción de halos en ciertas actividades como, por ejemplo, la conducción nocturna de vehículos.

Los diseños trifocales se basan principalmente en la combinación de dos perfiles parabólicos de distinta adición (**Gatinel, et al., 2011**) en la utilización de un perfil sinusoidal (**Vega, et al., 2021**), con distintas características topográficas que condicionan su fabricación y control, así como distinto comportamiento óptico en los focos de lejos, intermedio y cerca. El uso de perfiles multiorden ($1,5 \pi$), que operan con mayor eficiencia en órdenes de difracción distintos del cero, se han propuesto para una reducción conjunta de la aberración cromática y la esférica (**Weeber & Piers, 2012**) en los focos de lejos e intermedio, si bien la eficiencia energética varía muy considerablemente de uno a otro extremo del espectro visible en cada foco (**Millán & Vega, 2017**).

Las discontinuidades en la calidad de la visión de uno a otro foco, así como la presencia de halos, ha llevado a desarrollar un tipo de lentes intraoculares refractivas, las llamadas lentes EDOF o de extensión de foco, que proporcionan un segmento focal continuo (**Figura 3b**). Estas lentes se basan en un control de la curvatura de la superficie de la lente -más suave que el perfil difractivo- que proporciona una profundidad de foco suficiente para ver con nitidez en un rango de distancias que puede abarcar desde la visión de lejos a la visión intermedia, con un mínimo de 0,5 D (equivalente al rango de distancias de 2 a 6 m), según la declaración consensuada por la *American Academy of Ophthalmology* (**McRae, et al., 2017**). Con este rango de visión útil se asume que el paciente con implante podría realizar la mayoría de sus actividades habituales, requiriendo únicamente la ayuda de lentes auxiliares (gafas) para las tareas de precisión en visión de cerca. No son todavía concluyentes los resultados que muestran una tendencia de las lentes EDOF a generar menos quejas por halos y otras disfunciones (**Breyer, et al., 2017**).

Para el diseño óptico de los elementos EDOF se han utilizado diversas estrategias, como las máscaras de fase previamente desarrolladas para los sistemas formadores de imagen. Entre ellas, pueden citarse las máscaras de fase propuestas por **Zalevsky, et al., 2006; Zhou, et al., 2009** y las descritas en diversas revisiones del tema, como la realizada por **Ojeda-Castañeda & Gómez-Sarabia, 2015**. Las aplicaciones en óptica visual consideran tanto elementos con simetría de revolución en torno al eje óptico como componentes asimétricos. Entre los primeros se encuentran, por ejemplo, los axicones (**Ares, et al., 2005**), los perfiles de estructura fractal (**Remón, et al., 2018**), la combinación de superficies esféricas (**Fernández, et al., 2013**) o de aberraciones esféricas de cuarto y sexto orden (**Bernard, et al., 2010**); entre los asimétricos cabe mencionar la llamada “espada de luz” (**Kolodziejczyk, et al., 1990; Petelczyc, et al., 2019**) y el “ojo de pavo” (**Romero, et al., 2012**). No es posible citar todas las contribuciones relevantes porque se trata de un campo de investigación en rápido crecimiento, con muchos estudios comparativos (**Barbero, 2021**), y difusión continua de nuevos aportes.

Todas estas estrategias de diseño óptico han permitido el florecimiento de una gran variedad de lentes intraoculares que pueden ser implantadas y convenientemente enrolladas en el inyector mediante incisiones muy pequeñas (2,3 mm, aprox.).

Otra opción, que no se detalla aquí, para cubrir la visión de lejos y cerca consiste en aplicar soluciones distintas en cada ojo (**Zheng & Fang, 2018; Yeu & Ciozzo, 2020**): desde la de implantar una lente de apertura muy pequeña (diámetro $<1,5$ mm) en el ojo

no dominante hasta la de implantar lentes con potencia ligeramente distinta en cada ojo (mini-monovisión). Estas soluciones pueden resultar adecuadas en algunos pacientes, pero no siempre son bien toleradas, y pueden afectar la visión estereoscópica y aumentar las aberraciones, entre otras molestias.

Las lentes intraoculares acomodativas (**Figura 4**) se alejan del principio de visión simultánea, con lo que desaparecen los problemas de halos y reducción de sensibilidad al contraste, y vuelven al concepto de lente monofocal con la formación de una única imagen para cada condición de enfoque. La acomodación se produce mediante un desplazamiento axial de la lente intraocular, un cambio en su curvatura o en su índice de refracción, que repercute en una variación de la potencia total del ojo, ajustándose a la distancia de observación y formando una única imagen nítida en la retina. Una primera aproximación consiste en situar en el saco capsular una lente de potencia constante con hápticos flexibles. Con la contracción del músculo ciliar, la elasticidad de los hápticos permite un ligero desplazamiento axial de la lente hacia la córnea. Un desplazamiento de 1 mm, por ejemplo, incrementaría la potencia del ojo en 2 D, aproximadamente, lo que permitiría enfocar los objetos que se encuentran a 0,5 m del observador (**Alió, et al., 2017**). Sin embargo, en la práctica los logros alcanzados son muy modestos y se van reduciendo tras la intervención, llegando a perderse incluso en uno o dos años (**Charman, 2014**). Los resultados clínicos obtenidos con este diseño de lente ‘acomodativa’ no son muy alentadores a pesar de apoyarse en una hipótesis teórica correcta, ya que los posibles cambios en la geometría y la posición de la lente que esta modalidad exige para satisfacer la demanda acomodativa, así como la aparición de complicaciones posoperatorias, derivan en una pérdida paulatina de las propiedades del implante. No parecen más afortunados los diseños basados en insertar en el saco capsular una combinación de dos lentes montadas sobre un resorte flexible que transmite la actividad del músculo ciliar sobre la distancia que separa ambas lentes. Aunque puede recuperarse cierta función ‘acomodativa’ tras la operación, la mayor limitación posoperatoria radica en la fibrosis y contracción que experimenta el saco capsular tras la extracción de la catarata, lo que reduce en pocos meses la efectividad de la lente implantada. En los últimos años se han desarrollado diseños que afrontan esta dificultad situando el implante fuera de la cápsula, en el sulcus ciliar, una zona situada entre el iris y el saco capsular donde todavía es operativa la actividad del músculo ciliar (**Charman, 2014; Zheng & Fang, 2018**). Como ejemplo cabe destacar el diseño dual (**Simonov, et al., 2006**) basado en la lente de **Álvarez (1967)**, en el que la variación de potencia se efectúa por el desplazamiento lateral de sus dos componentes. Se han desarrollado diseños que aprovechan la fuerza mecánica del músculo ciliar para modificar la curvatura superficial y grosor de una lente compuesta por un gel o fluido líquido, imitando el mecanismo de acomodación del cristalino natural (**Zheng & Fang, 2018**). Al margen del músculo ciliar, otro diseño ‘acomodativo’, todavía experimental, modifica la potencia de la lente induciendo una variación en su índice de refracción (**Zheng & Fang, 2018**). Se basa en el efecto electroóptico que presentan algunos materiales, como los cristales líquidos, y en el uso de sensores fotovoltaicos situados a ambos lados de la lente intraocular, los cuales responden a las variaciones del tamaño pupilar que suceden en el proceso de acomodación.

Un serio inconveniente común a los diseños basados en dobletes y otros todavía en desarrollo, es el incremento de la incisión requerida para efectuar el implante. Estas incisiones, en ocasiones de hasta 9 o 10 mm, pueden producir astigmatismos y aumentos de otras aberraciones como ya se ha comentado.

Calidad óptica, calidad visual y métricas de relevancia clínica

Con la diversidad de lentes intraoculares se hace imprescindible establecer métodos objetivos de medición de la calidad para evaluar sus propiedades y establecer comparaciones. Esta tarea no es inmediata, ya que se trata de un componente óptico que se introduce en el ojo y, por lo tanto, pasa a formar parte de un sistema visual en el que también interviene la función neuronal del cerebro. Existen dos metodologías de trabajo: una, la medición *in*

in vitro de la calidad óptica de la imagen y la otra, su medición *in vivo* en los pacientes una vez implantada la lente. Ambas metodologías se utilizan, pero tienen métricas distintas, por lo que sus resultados no son directamente comparables.

La calidad óptica de la imagen formada por una lente intraocular se evalúa en el laboratorio, mediante un modelo de ojo construido en banco óptico (Norrby, *et al.*, 2007; Alba-Bueno, *et al.*, 2011; Vega, *et al.*, 2011) (Figura 5) conforme a las directrices establecidas por las normas estándar (ISO 11979-2:2014; ANSI Z80.35-2018), que han ido evolucionando en las últimas décadas con la aparición de nuevos diseños de lentes. Las métricas para evaluar la calidad óptica se basan, como otros sistemas ópticos formadores de imágenes, en la imagen de un punto (*point spread function*, PSF) y su transformada de Fourier en el espacio de frecuencias espaciales, la función de transferencia óptica (*optical transfer function*, OTF) (Goodman, 2017). Esta última se utiliza mucho en su valor absoluto, la conocida función de transferencia de modulación (*modulation transfer function*, MTF). También se utilizan métricas basadas en la caracterización del frente de ondas, la eficiencia energética, el esparcimiento (*scattering*) y las luces parásitas (*stray light*). Las medidas se suelen hacer tanto para una longitud de onda de diseño (546 ± 10 nm, ISO 11979-2:2014) como para luz blanca o policromática.

La calidad visual se mide principalmente en el entorno clínico, a partir de exámenes visuales previos y posteriores a la operación de pacientes sometidos a la cirugía de cataratas con implante de lente intraocular. La métrica más habitual es la agudeza visual en pruebas de alto contraste, seguida por las medidas de sensibilidad al contraste, la caracterización del frente de ondas (aberrometría) y el índice de esparcimiento objetivo. Es habitual acompañar las medidas con la información del nivel de iluminación (fotópico, mesópico) o el tamaño pupilar. Al tratarse de exámenes individuales, la variabilidad suele ser elevada. Los estudios requieren el reclutamiento de grupos de pacientes, el cumplimiento de exigencias éticas (Declaración de Helsinki) y la aplicación de métodos estadísticos para la obtención de resultados significativos.

Siguiendo la recomendación ANSI Z80.35-2018, los estudios clínicos suelen centrarse en la variación de la agudeza visual con la distancia de enfoque (curvas de desenfoque). También se aplican pruebas para la detección de disfotopsias (efectos indeseados como halos y deslumbramientos) y encuestas de satisfacción. Ha habido una evolución

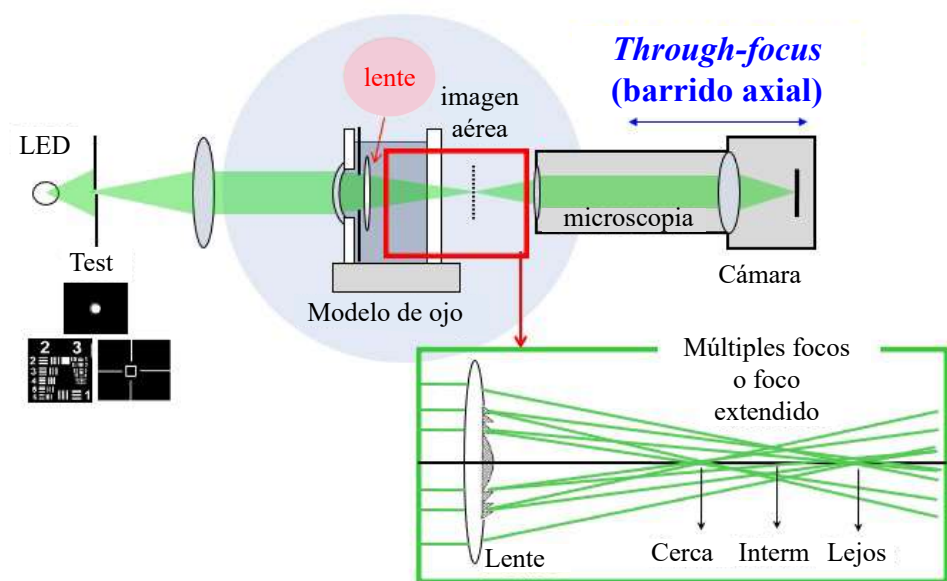


Figura 5. Esquema óptico del dispositivo experimental utilizado para la evaluación de las lentes intraoculares *in vitro*. Obsérvese el modelo de ojo en el centro

en la definición de las cartas homologadas, los optotipos y las condiciones de medida, pero se hace necesario seguir avanzando en este sentido para que los resultados puedan ser comparables.

Los recientes simuladores ópticos permiten reproducir de manera virtual el efecto óptico de diversos diseños de lentes intraoculares (Vinas, *et al.*, 2019; Millán, *et al.*, 2017). Alguno de estos dispositivos (Vinas, *et al.*, 2019) se adapta a la cabeza del paciente y antes de la cirugía como tal, simula su estado visual con un determinado implante.

Se ha avanzado en la definición de métricas de calidad de imagen óptica evaluadas *in vitro* que ayuden a interpretar los resultados clínicos posoperatorios de los pacientes con implantes de lentes intraoculares. Ya existían métricas basadas en la integración de la MTF en un rango de frecuencias ponderada por una función de sensibilidad neuronal (Campbell & Green, 1965), que permitían explicar en un alto porcentaje (>70 %) las variaciones en la agudeza visual de alto contraste de un observador promedio (Marsack, *et al.*, 2004; Thibos, 2004). En la última década se han propuesto diversas expresiones matemáticas basadas en las medidas *in vitro* del área bajo la curva de la MTF (MTFa) para distintos grados de desenfoque (curvas *through-focus*) (Felipe, *et al.*, 2010; Alarcón, *et al.*, 2016; Vega, *et al.*, 2018; Armengol, *et al.*, 2020) que alcanzan una buena correlación con los resultados clínicos *in vivo* de la agudeza visual (curvas de desenfoque) del paciente promedio con implante (Figura 6).

Los resultados con diversos diseños de lentes muestran que existe un valor de techo en la MTFa por encima del cual, aunque se incremente la calidad óptica de la lente intraocular, no se obtienen mejoras en la agudeza visual del paciente. Este hecho explica, asimismo, que los pacientes con lentes intraoculares bifocales alcancen, en promedio, una agudeza

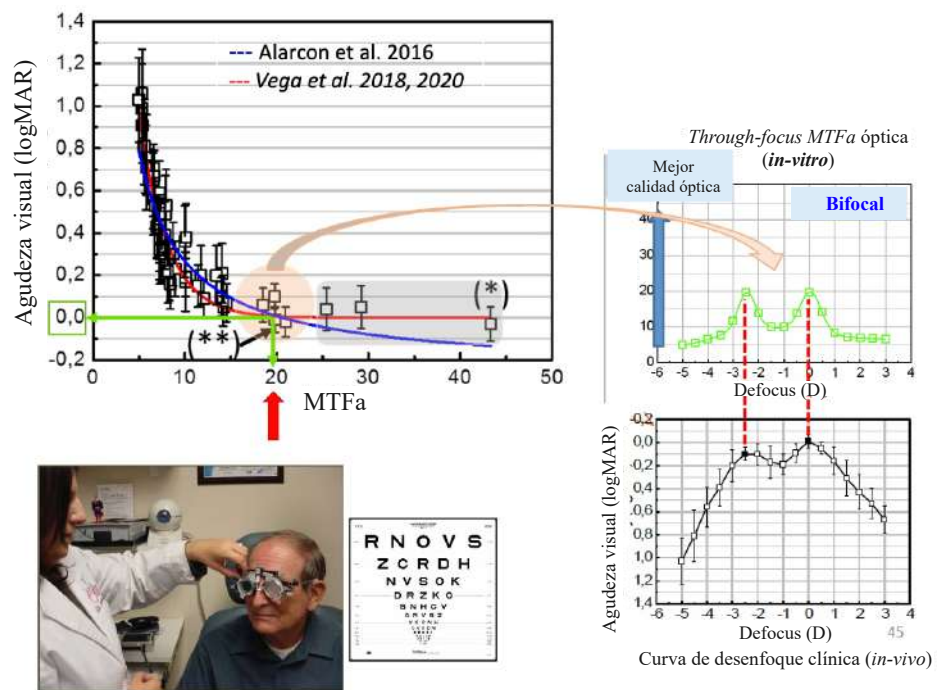


Figura 6. Correlación de la métrica óptica MTFa (*in-vitro*) con la agudeza visual de alto contraste medida *in vivo* en la clínica. Ajustes matemáticos obtenidos en las referencias (Alarcon, *et al.*, 2016; Vega, *et al.*, 2018; Armengol, *et al.*, 2020). El ejemplo (derecha) muestra el caso de una lente intraocular bifocal con la coincidencia de los dos máximos de MTFa a las distancias de enfoque de lejos y cerca con los dos máximos de agudeza visual medidos en la clínica tras el implante. Obsérvese que los máximos de MTFa alcanzan el valor umbral MTFa=20 a.u., que corresponde a una agudeza visual normal (0,0 logMAR) en la gráfica (arriba, a la izquierda)

visual de lejos similar a la de los pacientes con lentes monofocales (**Figura 6**), aunque la calidad óptica de la imagen que las lentes bifocales proporcionan en el modelo de ojo *in vitro* pierda contraste y sea menor que la calidad de las lentes monofocales (**Cardona, et al., 2018**). Estudios muy recientes que consideran la luz policromática en las medidas de la MTFa y de la eficiencia energética han permitido elevar el valor de correlación ($R^2 > 0,90$) (**Armengol, et al., 2020**). Cuando el grado de correlación encontrado es elevado, tales métricas se convierten en métricas preclínicas. Esto quiere decir que las medidas obtenidas *in vitro* con la lente intraocular en el modelo de ojo del laboratorio sirven para predecir la agudeza visual esperable del paciente tras el implante y la variación de esa agudeza visual con la distancia de observación. Esta información, interpretada adecuadamente por el especialista, constituye una valiosa ayuda para comparar las lentes intraoculares y seleccionar la que mejor se adapte a las características del paciente y su estilo de vida entre los modelos disponibles.

Consideraciones finales

Está ampliamente aceptado que en torno al 80 % de la información sensorial nos llega a través de la visión y, probablemente, el uso creciente de dispositivos electrónicos interconectados esté elevando ese porcentaje en los últimos tiempos. La formación de cataratas degrada seriamente la visión y es una afección muy invalidante, sobre todo cuando degenera hasta producir la ceguera. A lo largo de las secciones precedentes, limitadas casi exclusivamente a los aspectos ópticos, se plantea que el reemplazo del cristalino ha sido y sigue siendo un reto. Aunque los avances conseguidos en las últimas cinco décadas marcan una diferencia abismal con las soluciones aportadas a lo largo de miles de años, no podemos pensar que la cirugía de cataratas y el implante de una lente intraocular se reduce al simple recambio de una lente natural por otra artificial que restituye la funcionalidad perdida. Nuestro conocimiento del sistema visual y de los cambios que se producen con el envejecimiento del ojo es aún incompleto, por lo que hay que seguir investigando para proponer nuevas soluciones y desarrollar las técnicas que las hagan viables y mejores que las ya existentes. Así, por ejemplo, si el problema radicase exclusivamente en el medio que constituye la lente natural, en lugar de reemplazarla se podría optar por un vaciado del núcleo y córtex del cristalino y un relleno con un material sustitutivo adecuado, procedimiento conocido como phaco-ersatz (**Charman, 2014**). Aunque se han obtenido algunos resultados prometedores, los ensayos llevados a cabo con animales no confirman una restauración duradera de la acomodación.

En la actualidad existe una gran variedad de diseños de lentes intraoculares con propiedades diferentes. Es imprescindible, por lo tanto, una cuidadosa selección de la lente que se implante finalmente en un determinado paciente. Los criterios para efectuar esta selección habrán de tener en cuenta diversos aspectos del paciente, unos objetivos y otros subjetivos. Entre los objetivos cabe mencionar la historia clínica, el estado de salud del ojo, en particular de la superficie corneal y de la mácula, la potencia y el astigmatismo, la pupila, la biometría y otros datos relevantes de la historia ocular como, por ejemplo, una posible cirugía refractiva corneal previa. Entre los aspectos subjetivos conviene conocer las expectativas del propio paciente, que incluyen su estilo de vida, sus preferencias sobre el uso o no de corrección visual adicional (gafas), y su personalidad, profesión y aficiones. Cuando el especialista está bien informado y tiene en cuenta todos estos aspectos, puede realizar una selección personalizada de la lente intraocular a implantar y el paciente puede tener una expectativa razonable de obtener la solución que mejor se adapte a su caso particular (**Yeu & Cuzzo, 2020**). Sin embargo, se debe estar alerta porque la información destinada al especialista y la orientada al paciente son un aspecto delicado, susceptible de influencias comerciales y objeto de campañas publicitarias agresivas. Es necesario que la información disponible sobre el diseño de las lentes intraoculares y sus propiedades sea suficiente, veraz y contrastada, además de estar presentada clara y adecuadamente para su correcta interpretación.

Agradecimientos

A los compañeros más próximos en esta línea de investigación (Fidel Vega, Elisabet Pérez y Jesús Armengol), y a los colaboradores y los estudiantes de doctorado. A la Agencia Estatal de Investigación del gobierno de España por la financiación del proyecto (PID2020-114582RB-I00 / AEI / 10.13039/501100011033).

Referencias

- Alarcon, A., Canovas, C., Rosen, R., Weeber, H., Tsai, L., Hileman, K., Piers, P.** (2016). Preclinical metrics to predict through-focus visual acuity for pseudophakic patients. *Biomed Opt Express*. **7** (5): 1877-1888.
- Alba-Bueno, F., Vega, F., Millán, M.S.** (2011). Design of a Test Bench for Intraocular Lens Optical Characterization. *J. Phys.: Conf. Ser.* **274**: 012105.
- Alba-Bueno, F., Vega, F., Millán, M.S.** (2014). Halos and multifocal intraocular lenses: Origin and interpretation. *Arch Soc Española Oftalmología (English)*. **89**: 397.
- Alba-Bueno, F., Garzón, N., Vega, F., Poyales, F., Millán, M.S.** (2018). Patient-Perceived and Laboratory-Measured Halos Associated with Diffractive Bifocal and Trifocal Intraocular Lenses. *Curr Eye Res*. **43** (1): 35-42.
- Alió, J.L., Alió del Barrio, J.L., Vega-Estrada, A.** (2017). Accommodative intraocular lenses: where are we and where we are going. *Eye and Vision*. **4**: 16.
- Altmann, G.E.** (2005). Aspheric lenses and lens family. U.S. Patent US2005/0203619 A1.
- Álvarez, L.W.** (1967). Two-element variable-power spherical lens. U.S. patent 3,305,294 (February 21, 1967).
- American National Standards Institute, ANSI Z80.35-2018.** (2019). Extended depth of focus intraocular lenses. Alexandria, VA U.S.A.: The Vision Council.
- Ares, J., Arines, J., Bara, S., Jaroszewicz, Z.** (2005). Presbyopia compensation with a quartic lens axicon. *Optom. Vis. Sci.* **82** (12): 1071-1078.
- Armengol, J., Garzón N, Vega F, Altemir I, M.S. Millán.** (2020). Equivalence of two optical quality metrics to predict the visual acuity of multifocal pseudophakic patients. *Biomed Opt Express*. **11** (5): 2818-2829.
- Artal, P., Benito, A., Tabernero, J.** (2006). The human eye is an example of robust optical design. *J Vis.* **6**: 1-7.
- Artal, P., Manzanera, S., Piers, P., Weeber, H.** (2010). Visual effect of the combined correction of spherical and longitudinal chromatic aberrations. *Opt Express*. **18** (2): 1637-1648.
- Artal, P.** (2014). Optics of the eye and its impact in vision: a tutorial. *Adv Opt Photonics*. **6** (3): 340-367.
- Ascaso, F.J. & Huerva, V.** (February 7th, 2013). The History of Cataract Surgery, *Cataract Surgery*, Farhan Husain Zaidi, IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/42710>. Doi: 10.5772/19243
- Atchison, D. A. & Smith, G.** (2000). Optics of the human eye. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Barbero, S.** (2021). Smooth multifocal wavefronts with prescribed mean curvature for visual optics applications. *Applied Optics*. **60** (21): 6147-6154.
- Bernard, Y., Lopez-Gil, N., Legras, R.** (2010). Subjective depth of field in presence of 4th-order and 6th-order Zernike spherical aberration using adaptive optics technology. *J Cataract. Refract. Surg.* **36**: 2129-2138.
- Breyer, D., Kaymak, H., Ax, T., Kretz, F., Auffarth, G., Hagen, Ph.** (2017). Multifocal intraocular lenses and extended depth of focus intraocular lenses. *Asia-Pac J Ophthalmol.* **6** (4): 339-349.
- Campbell, F. W. & Green, D. G.** (1965). Optical and retinal factors affecting visual resolution. *J Physiol.* **181** (3): 576-593.
- Cardona, G., Vega, F., Gil, M.A., Varón, C., Buil, J.A., Millán, M.S.** (2018). Visual acuity and image quality in 5 diffractive intraocular lenses. *Eur J Ophthalmol.* **28** (1): 36-41.
- Castignoles, F., Flury, M., Lepine, T.** (2010). Comparison of the efficiency, MTF and chromatic properties of four diffractive bifocal intraocular lens designs. *Opt Express*. **18**: 5245-5256.
- Charman, W. N.** (2014). Developments in the correction of presbyopia II: surgical approaches. *Ophthalmic Physiol Opt.* **34**: 397-426.
- Cheng, J.-W., Wei, R.-L., Cai, J.-P., Xi, G.-L., Zhu, H., Li, Y., Ma, X.-Y.** (2007). Efficacy of different intraocular lens materials and optic edge designs in preventing posterior capsular opacification: a metanalysis. *Am J Ophthalmol.* **143**: 428-436.

- Cohen, A.L.** (1993). Diffractive Bifocal Lens Designs. *Optom Vis Sci.* **70** (6): 461-468.
- Davis, G.** (2016). The evolution of cataract surgery. *Mo Med.* **113** (1): 58-62.
- Davison, J.A. & Simpson, M.J.** (2006). History and development of the apodized diffractive intraocular lens. *J Cataract Refract Surg.* **32**: 849-858.
- Duane, A.** (1912). Normal values of the accommodation at all ages, *J. Am. Med. Assoc.* **59** (12): 1010-1013.
- Felipe, A., Pastor, F., Artigas, J. M., Diez-Ajenjo, A., Gené, A., Menezo, J. L.** (2010). Correlation between optics quality of multifocal intraocular lenses and visual acuity. Tolerance to modulation transfer function decay. *J Cataract Refr Surg.* **36** (4): 557-562.
- Fernández, D., Barbero, S., Dorrnsoro, C., Marcos, S.** (2013). Multifocal intraocular lens providing optimized through-focus performance. *Opt. Lett.* **38** (24): 5303-5306.
- Fyodorov, S.N. & Kolonko, A.I.** (1967). Estimation of optical power of the intraocular lens (*Russian*). *Vestnik Oftalmologic (Moscow).* **4**: 27-31.
- Gatinel, D., Pagnouille, Ch., Houbrechts, Y., Gobin, L.** (2011). Design and qualification of a diffractive trifocal optical profile for intraocular lenses. *J Cataract Refr Surg.* **37**: 2060-2067.
- Goel, S., Chua, C., Butcher, M., Jones, C.A., Bagga, P., Kotta, S.** (2004) Laser vs ultrasound biometry—a study of intra-and interobserver variability. *Eye.* **18**: 514-518.
- Goodman J.** Introduction to Fourier Optics. 4th ed., United States: WH Freeman, 2017.
- Guirao, A., Redondo, M., Geraghty, E., Piers, P., Norrby, S., Artal, P.** (2002). Corneal optical aberrations and retinal image quality in patients in whom monofocal intraocular lenses were implanted. *Arch Ophthalmol.* **120**: 1143-1151.
- Gullstrand A.** (1909). Appendix II: Procedure of rays in the eye. Imagery -laws of the first order. En *Helmholtz's Handbuch der Physiologischen Optik*, vol.1, 3rd ed. (traducción inglesa editada por J.P. Southall, Optical Society of America, 1924).
- Hoffer, K.J., Aramberri, J., Haigis, W., Olsen, Th., Savini, G., Shammas, H.J., Bentow, S.** (2015). Protocols for studies of intraocular lens formula accuracy. *Am J Ophthalmol.* **160** (3): 403-405.
- Hoffer K.J. & Savini G.** (2020). Update on intraocular lens power calculation study protocols. *Ophthalmology*; Jul 9; S0161-6420 (30638-2) (Online Epub ahead of print). <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2020.07.005>
- International Organization for Standardization.** (2014). ISO 11979-2:2014. Ophthalmic Implants - Intraocular Lenses -Part 2: Optical Properties and Test Methods. Geneva; ISO.
- Kolodziejczyk, A., Bara, S., Jaroszewicz, Z., Sypek, M.** (1990). The light sword optical element—a new diffractive structure with extended depth of focus. *J. Mod. Opt.* **37**: 1283-1286.
- Leffler, C.T., Klebanov, A., Samara, W.A., Grzybowski, A.** (2020). “The history of cataract surgery: from couching to phacoemulsification”, *Annals of Translational Medicine.* **8** (22): 1551.
- Marsack, J. D., Thibos, L. N., Applegate, R. A.** (2004). Metrics of optical quality derived from wave aberrations predict visual performance. *J Vis.* **4**: 322-328,
- Masket, S., Rorer, E., Stark, W., Holladay, J.T., MacRae, S., Eydelman, M.** (2017). Special Report: American Academy of Ophthalmology Task Force Consensus Statement for Extended Depth of Focus Intraocular Lenses. *Ophthalmology.* **124** (1): 139-141.
- Melles, R.B., Holladay, J.T., Chang, W.J.** (2018). Accuracy of intraocular lens calculation formulas. *Ophthalmology.* **125**: 169-170.
- Millán, M.S., Vega, F., Ríos-López, I.** (2016). Polychromatic image performance of diffractive bifocal intraocular lenses: Longitudinal chromatic aberration and energy efficiency. *Investig Ophthalmol Vis Sci.* **57** (4): 2021-2028.
- Millán M.S., Vega, F.** (2017). Extended depth of focus intraocular lens: chromatic performance. *Biomed Opt Express.* **8** (9): 4294-4309.
- Millán M.S., Pérez, E., Vega, F.** (2017). System and method for characterizing, designing and/or modifying optical properties of a lens. Patent No. PCT/IB2017/000044.
- Montés-Micó, R., Ferrer-Blasco, T., Cerviño, A.** (2009). Analysis of the possible benefits of aspheric intraocular lenses: review of the literature. *Journal of Cataract and Refractive Surgery.* **35**: 172-181.
- Navarro, R.** (2009). The optical design of the human eye: a critical review. *Journal of Optometry.* **2** (1): 3-18.
- Navarro, R.** (2009). Letter to the editor. *Journal of Optometry.* **2**: 163-164.
- Norrby, S., Piers, P., Campbell, Ch., van der Mooren, M.** (2007). Model eyes for evaluation of intraocular lenses,” *Applied Optics.* **46** (26): 6595-6605.
- Ojeda-Castañeda, J. & Gómez-Sarabia, C.** (2015). Tuning field depth at high resolution by pupil engineering. *Advances in Optics and Photonics.* **7**: 814-880.

- Petelczyc, K., Byszewska, A., Chojnacka, E., Jaroszewicz, Z., Kakarenko, K., Mira-Agudelo, A., Ostrowska-Spaleniak, A., Skłodowska, A., Kołodziejczyk, A., Rekas, M.** (2019). The Light Sword Lens - A novel method of presbyopia compensation: Pilot clinical study. *PLoS ONE*. **142**: e0211823.
- Piers, P.A., Weeber, H.A., Artal, P., Norrby S.** (2007). Theoretical comparison of aberration-correcting customized and aspheric intraocular lenses. *Journal of Refractive Surgery*. **23**: 374-384.
- Ravikumar, S., Bradley, A., Thibos, L.N.** (2014). Chromatic aberration and polychromatic image quality with diffractive multifocal intraocular lenses. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*. **40**: 1192-1204.
- Remón, L., García-Delpech, S., Udaondo, P., Ferrando, V., Monsoriu, J.A., Furlan, W.D.** (2018). Fractal-structured multifocal intraocular lens. *PLoS ONE*. **13** (7): e0200197.
- Romero, L.A., Millán, M.S., Jaroszewicz, Z., Kołodziejczyk, A.** (2012). Double peacock eye optical element for extended focal depth imaging with ophthalmic applications. *J. Biomed. Opt.* **17** (4): 046013.
- Schwartz, D.M., Sandstedt, C.A., Chang, S.H., Kornfield, J.A., Grubbs, R.H.** (2004). Light-adjustable lens: development of in vitro nomograms. *Trans. Am. Ophthalmol. Soc.* **102**: 67-74.
- Schwiergerling, J. & Greivenkamp, J.E.** (1997). Using corneal height maps and polynomial decomposition to determine corneal aberration. *Optom Vis Sci.* **74**: 906-916.
- Simonov, A. N., Vdovin, G., Rombach, M. C.** (2006). Cubic optical elements for an accommodative intraocular lens. *Optics Express*. **14** (17): 7757-7775
- Spalton, D.** (2019). The origins of cataract surgery. Heritage Lecture ESCRS Congress, Paris (16th Sep 2019). <https://player.escrs.org/featured/escrs-heritage-lecture-2019-the-origins-of-cataract-surgery-david-spalton>
- Thibos, L.N., Ye, M., Zhang, X., Bradley, A.** (1992). The chromatic eye: a new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans. *Appl. Opt.* **31** (19): 3594-3600.
- Thibos, L.N., Hong, X., Bradley, A., Applegate, R.A.** (2004). Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations. *J Vis.* **4**: 329-351.
- Van der Mooren, M., Franssen, L., Piers, P.** (2013). Effects of glistenings in intraocular lenses. *Biomed Opt Express*. **4** (8): 1294-1304.
- Vega, F., Alba-Bueno, F., Millán, M.S.** (2011). Energy distribution between distance and near images in apodized diffractive multifocal intraocular lenses. *Investig Ophthalmol Vis Sci.* **52** (8): 5695-5701.
- Vega, F., Millán, M.S., Garzón, N., Altemir, I., Poyales, F., Larrosa, J. M.** (2018). Visual acuity of pseudophakic patients predicted from in-vitro measurements of intraocular lenses with different design. *Biomed Opt Express*. **9** (10): 4893-4906.
- Vega, F., Valentino, M., Rigato, F., Millán, M.S.** (2021). Optical design and performance of a trifocal sinusoidal diffractive intraocular lens. *Biomed Opt Express*. **12** (6): 3338-3351.
- Villegas, E.A., Alcón, E., Mirabet, S., Yago, I., Marín, J.M., Artal, P.** (2014). Extended depth of focus with induced spherical aberration in light-adjustable intraocular lenses. *American Journal of Ophthalmology*. **157** (1): 142-149.
- Vinas, M., Benedi-García, C., Aissati, S., Pascual, D., Akondi, V., Dorronsoro, C., Marcos, S.** (2019). Visual simulators replicate vision with multifocal lenses. *Sci Rep*. **9**: 1539.
- Wang, W., Yan, W., Fotis, K., Prasad, N.M., Lansingh, V.Ch., Taylor, H.R. Finger, R.P., Facciolo D., He, M.** (2016). Cataract surgical rate and socioeconomics: a global study. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* **57**: 5872-5881.
- Weeber, H.A. & Piers, P.A.** (2012). Theoretical performance of intraocular lenses correcting both spherical and chromatic aberration. *J Refract Surg.* **28** (1): 48-52.
- Yang, H. & Afshari NA.** (2014). The yellow intraocular lens and the natural ageing lens. *Curr Opin Ophthalmol.* **25** (1): 40-3.
- Yeu E. & Cuozzo S.** (2020) Matching the Patient to the Intraocular Lens: Preoperative Considerations to Optimize Surgical Outcomes. *Ophthalmology*. 2020 Aug 31:S0161-6420(20)30843-5.
- Zalevsky, Z., Shemer, A., Zlotnik, A., Eliezer, E.B., Marom, E.** (2006). All-optical axial super resolving imaging using a low-frequency binary-phase mask. *Optics Express*. **14**: 2631-2643.
- Zeng, L. & Fang, F.** (2018). Advances and challenges of intraocular lens design. *Appl Opt.* **57** (25): 7363-7376.
- Zhou, F., Ye, R., Li, G., Zhang, H., Wang, D.** (2009). Optimized circularly symmetric phase mask to extend the depth of focus. *Journal of the Optical Society of America.* **26**: 1889-1895.

Original article

Complex system properties in the spreading of COVID-19 pandemic

Propiedades de sistema complejo en la propagación de la pandemia del COVID-19

 Carlos Quimbay

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

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

Abstract

The objective of the present study was to show that the spread of the COVID-19 pandemic around the world shows complex system properties such as lognormal laws, temporal fluctuation scaling, and time correlation. First, the daily cumulative number of confirmed cases and deaths is distributed among countries as lognormals such that the time series exhibit a temporal fluctuation scaling. Second, the daily return time series of cases and deaths per day have associated Levy stable distributions and they have time correlation. The idea was to draw attention to the fact that the spread of the COVID-19 pandemic can be seen as a complex system, and, thus, contribute to the identification of the structural properties of this system, which is relevant as it is expected that future stochastic models describing the spread of the COVID-19 pandemic from a microscopic dynamics perspective should be able to explain the emergence of the structural properties identified here.

Keywords: COVID-19 pandemic; Spread; Time series; Lognormal and Levy stable distributions; Temporal fluctuation scaling; Time correlation.

Resumen

El principal objetivo de este trabajo fue mostrar que la propagación de la pandemia de COVID-19 alrededor del mundo exhibe propiedades de sistema complejo tales como leyes lognormales, escalamiento de la fluctuación temporal y correlación en el tiempo. Primero, el número acumulado diario de casos confirmados y de muertes se distribuye entre los países del mundo como lognormales, de tal manera que estas series de tiempo exhiben la propiedad de escalamiento de la fluctuación temporal. Segundo, se muestra que las series de tiempo de retornos diarios de casos confirmados y de muertes por día están asociadas con distribuciones de Levy estables, y que presentan la propiedad de correlación temporal. La principal motivación del trabajo fue llamar la atención sobre el hecho de que la propagación de la pandemia de COVID-19 puede verse como un sistema complejo y contribuir a determinar las propiedades estructurales de este sistema, lo que es relevante dado que se espera que los futuros modelos estocásticos que describan la propagación de la pandemia desde la perspectiva de una dinámica microscópica deberían poder explicar, en principio, el surgimiento de las propiedades estructurales establecidas en este trabajo.

Palabras clave: Pandemia de COVID-19; Propagación; Series de tiempo; Distribuciones lognormales y de Levy estables; Escalamiento de la fluctuación temporal; Correlación temporal.

Citation: Quimbay C. Complex system properties in the spreading of COVID-19 pandemic. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1039-1052, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1459>

Editor: Luis Fernando García

Corresponding autor:

Carlos Quimbay;
cjquimbayh@unal.edu.co

Received: April 27, 2021

Accepted: August 22, 2021

Published: December 15, 2021



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

Introduction

Throughout human history, several pandemics have significantly reduced world population (Hays, 2005; Huremović, 2019). For instance, a century ago the world was afflicted by the Spanish flu epidemic (H1N1), which began and peaked in 1918 and persisted until 1920 (Hays, 2005; Huremović, 2019). This pandemic was one of the first in which data and statistics (from 48 countries) allowed health authorities to estimate that 40.1 million

people died, i.e., 2.1% of the world's population at that time (**Barro, et al., 2020**). On the other hand, the COVID-19 coronavirus disease (SARS-Cov-2) pandemic is the first with data available in real-time (**Dong, et al., 2020**) on the time series of the total confirmed cases, confirmed cases per day, total deaths, deaths per day, active cases, total test results, etc., for each country (**Worldometers, 2021**). The availability of time series for confirmed cases and deaths (**GitHub, 2021**) from January 1, 2020, to September 15, 2021, allowed us to detect some properties also found in a wide variety of complex systems.

Recently, different aspects of the spread of the COVID-19 pandemic have been studied from the point of view of complex systems (**Holovatch, et al., 2017**). Just to mention a few of these studies, researchers analyzed the spatial evolution of the Covid-19 pandemic around the world based on the coronavirus cases time series per country using a particular type of neural network called self-organizing maps to show that it has behaved similarly in certain groups of countries (**Melin, et al., 2020**). In another study, time series of daily infections per country were analyzed using a methodology developed to study network problems showing that there are groups of countries with differentiated contagion dynamics (**Álvarez, et al., 2020**). Moreover, by using a toy model for social networks and the so-called small-world network, researchers explained why most COVID-19 infection curves are linear (**Thurner, et al., 2020**). On the other hand, three clusters of countries and territories with similar profiles of standardized COVID-19 time dynamics were identified by using a machine learning technique (**António, et al., 2021**). Besides, times series of active and cumulative cases from three countries were analyzed in the context of a continuous effective model based on a modified diffusion equation under Lifshitz scaling to describe some aspects of the SARS-Cov-2 virus diffusion and to reproduce the spreading of the pandemic between two cities of Brazil (**Anacleto, et al., 2020**). Additionally, based on confirmed cases in the US distributed across more than 2,000 counties, researchers found that the right tail of this distribution exhibited a power law with Pareto exponent close to one (**Beare & Toda, 2020**). Furthermore, the formalism of the propagation of a wave packet in a dispersive medium was used to describe the spreading of the COVID-19 pandemic in Italy (**Feoli, et al., 2020**). Finally, a mathematical framework was developed to study the economic impact of pandemics like the COVID-19 by integrating epidemiological dynamics with a kinetic model of wealth exchange (**Dimarco, et al., 2020**).

As a result of the first stage into a research program in progress about the spreading of the COVID-19 pandemic based on the analysis of empiric data from January 2020 to September 2021, it is evident that the COVID-19 pandemic has spread around the world exhibiting complex system properties such as lognormal laws, temporal fluctuation scaling, and time correlation. In contrast with **Beare & Toda's** results (2020), where the cumulative confirmed cases distributed among the US counties exhibited a power law, in the present study, the daily cumulative numbers of confirmed cases and deaths distributed among the countries of the world exhibited lognormal laws. In this respect, it should be mentioned that lognormal laws emerge in a wide variety of complex systems in different science fields (**Limpert, et al., 1991**) because of the presence of stochastic multiplicative processes in them (**Mitzenmacher, 2004**). It is also clear in this paper that temporal fluctuation scaling (TFS) behaves as a power-law relation between the standard deviation and the mean when these are calculated for the daily cumulative number of confirmed cases and deaths distributed among countries in the world. With respect to this property, from a general perspective, fluctuation scaling affirms the existence of a power-law relation between the standard deviation and the mean of a time series (**Eisler & Kertész, 2006; Eisler, et al., 2008; Fronczac & Fronczac, 2010**). Fluctuation scaling can be seen in two different forms (**Eisler, et al., 2008**): The ensemble fluctuation scaling and the TFS (**Eisler & Kertész, 2006; Fronczac & Fronczac, 2010**). Since the discovery of the fluctuation scaling by Smith (1938) and Taylor (1961), this property has been found in complex systems in areas such as social science, life science, ecology, economics, financial markets, climatology, city traffic, complex networks, physics, etc. (**Eisler, et al., 2008; Fronczac & Fronczac, 2010**). On the other hand, temporal fluctuation scaling has also been observed in the daily

return time series of cases and deaths per day in the world, but this time following the Lévy alpha-stable distribution. The time correlation for these daily return time series has been detected by calculating the Hurst exponents. Regarding this property, it is important to mention that time correlation means that the autocovariance function decays exponentially by a spectral that tends to infinity (Stanley, 1971; Mantegna & Stanley, 2000; Grau-Carles, 2000) in such a way that, at the critical point, the said exponential decay turns into a power-law decay (Varotsos, *et al.*, 2002). It should be emphasized that time series associated with different types of complex systems exhibit time correlations as evidenced in nucleotide sequences, neuron activity, cardiac interbeat intervals, earthquake processes, variation of daily maximum temperatures, literary texts, stock index variations, electric signals, etc. (Martín-Montoya, *et al.*, 2015). It is important to insist that time correlation is detected by calculating the Hurst exponent (Martín-Montoya, *et al.*, 2015), a property also detectable if the time series is not large enough (Sánchez-Granero, *et al.*, 2008; Trinidad-Segovia, *et al.*, 2012). Power-law correlations in time can be measured by a scaling parameter or fractal dimension, but if the time series is self-similar, this fractal dimension is related to the Hurst exponent (Feder, 1994; Chen, *et al.*, 2008).

The present study showed that the daily cumulative number of confirmed cases and deaths in world countries from March 31, 2020 to September 15, 2021 followed lognormal distributions with two parameters using a similar methodology to that developed to fit the gamma probability density function to wealth distributions obtained in the context of a non-conservative kinetic model of wealth exchange with production saving (Quevedo & Quimbay, 2020). As for the daily cumulative numbers of confirmed cases and deaths among world countries for a given period, it was evident that the standard deviations and the means were related as power laws, which implies the existence of TFS in the system using an analogous procedure to that presented by Abril & Quimbay (2021) to show that the TFS and the temporal evolution of its exponent in some financial time series can be described by using the path-integral formalism.

In the second part of the paper, the same procedure was used to show that the TFS is also observed in the daily return time series of cases and deaths per day, but this time with a Lévy stable distribution. For these daily return time series, which are not large enough, the existence of time correlation was detected by calculating the Hurst exponents using a modification of the classical R/S method as in Martín-Montoya, *et al.* (2015) in their calculation of the Hurst exponents for seismic time series in Colombia given that they were not large enough.

It is important to emphasize that at this stage, the present study does not aspire to explain why the complex system properties identified emerged, as that is the objective of later phases of the research program. In the future, then, the hope is to formulate stochastic models aimed at explaining from a microscopic perspective the emergence of those properties. It is also relevant to mention that the second stage of the aforementioned research program will aim at showing how the properties identified in the spread of COVID-19 in the world also express themselves at the country level, or that such properties exist inside countries when the spread is considered at this level.

Data related to the COVID-19 pandemic spreading in the world

The starting point of this work is the data from confirmed cases and deaths by COVID-19 available in GitHub (2021). Thus, the cumulative number of confirmed cases per country has been organized daily starting on January 1, 2020, with 27 confirmed cases in China and ending on September 15, 2021, with 226.477.919 confirmed cases in 193 countries and 721 confirmed cases in an international zone. The cumulative number of deaths per country were also organized daily, starting on January 11, 2020, with one death in China and ending on September 15, 2021, with 4.666.083 deaths in 186 countries and 15 deaths in the international zone. On the other hand, the number of new confirmed cases per day was also daily organized per country starting on January 2, 2020, with no confirmed new cases in China and ending on September 15, 2021, with 563.272 confirmed cases in 160

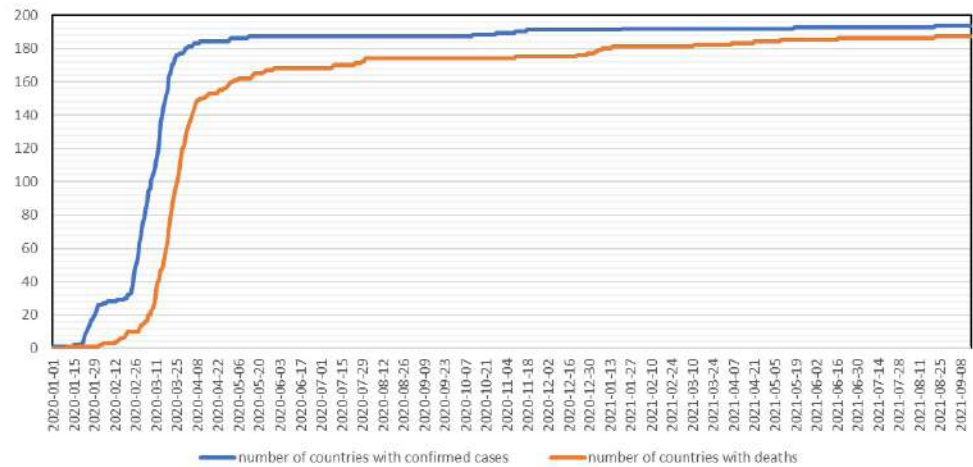


Figure 1. Evolution of the number of countries with confirmed cases and deaths by COVID-19

countries. Finally, the number of new deaths was daily organized per country starting on January 12, 2020, with no confirmed new deaths in China and ending on March 15, 2021, with 10.358 new deaths in 132 countries.

Figure 1 shows that the increase in the number of countries with confirmed cases of COVID-19 (curve in blue color) was large for the period between January 1, 2020, and March 31, 2020, increasing from 1 to 180 (179 countries and 1 international zone) while it was much smaller between April 1, 2020, and September 15, 2021, from 180 to 194. Likewise, the number of countries with deaths by COVID-19 (curve in orange color) passed from one on January 11, 2020, to 127 on March 30, 2020 (126 countries and 1 international zone) while it increased from 130 on April 1, 2020, to 187 on September 15, 2021. **Figure 1** also shows a similar behavior for both curves except for a threshold of an approximate average of 18 days: the blue curve grew from 32 on February 22, 2020, to 148 on March 17, 2020, while the orange curve grew from 27 on March 10, 2020, to 147 on April 7, 2020.

As shown in **figure 1**, the spread of the COVID-19 pandemic had a vertiginous progress in the world as the number of countries with confirmed cases and deaths grew strongly from January 1, 2020 to March 30, 2020. During this period, the daily evolution of the number of countries had an analogous behavior to the time evolution of the entropy in the case of a close economical system when states are out of equilibrium (**Drăgulescu & Yakovenko, 2000**). The economic system described with the kinetic model of money exchange by **Drăgulescu & Yakovenko (1990)** reaches the Boltzmann-Gibbs distribution of money only when the entropy is at a maximum and the system is in equilibrium. It has been proven that from January 1, 2020 to March 30, 2020 the daily distributions of cumulative numbers of confirmed cases and deaths among world countries do not fit by using any of the probability density functions. Moreover, in the next section it will be evident that only after March 30, 2020 these daily distributions were very well fitted to lognormals.

Temporal fluctuation scaling

The daily cumulative numbers of confirmed cases and deaths in the world distributed among countries fitted by lognormal distributions with two parameters of the form

$$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right)}{x\sigma\sqrt{2\pi}}$$

where σ is the shape parameter and μ the location parameter. The goodness of fit was checked in all the cases by the following significance tests: Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, and Chi-square. In all cases, the goodness of fit was very good from March 31, 2020 on. According to the significance tests, it should be noted that these fits to lognormal distributions were not completely valid for the period before March 31, 2020 possibly because before this day the system was in a non-equilibrium state as suggested by the results in **figure 1**.

Table 1 presents the results of the fit parameters to lognormal distributions of two parameters for daily cumulative numbers of confirmed cases and deaths in the world by taking their distributions among the countries and shows the values of the fit parameters to lognormal distributions σ and μ for 36 days. As already mentioned, for all cases, the goodness of the fit was very good. The daily values of the mean (M) and the standard deviation (SD) are also shown in the Table.

This system presents TFS because SD and M are related as a power law of the form

$$SD(M) = C \times M^D,$$

where C is a factor and D is the TFS exponent. Using the SD and M values in **table 1**, for the 15 data from the period between March 31, 2020 and October 31, 2020, the fit parameters to the power law for cumulative numbers of confirmed cases were $C=5.2073$ and $D=0.9839$, with a coefficient of determination $R^2=0.9981$, while for the cumulative number of deaths they were $C=7.0154$ and $D=0.9281$ with $R^2=0.9984$. Additionally, for the 9 data from the period between November 15, 2020 and March 15, 2021, the fit parameter to power law for the cumulative numbers of confirmed cases were $C=2.4953$ and $D=1.0369$ with $R^2=0.9973$, while these parameters for the cumulative numbers of deaths were $C=3.0786$ and $D=1.0107$ with $R^2=0.9984$. Finally, for the 12 data from the period between March 31, 2021 to September 15, 2021, the fit parameter to power law for the cumulative numbers of confirmed cases were $C=21.556$ and $D=0.8732$ with $R^2=0.9905$, while for the cumulative numbers of deaths they were $C=11.667$ and $D=0.8733$ with $R^2=0.9951$. It can be seen that for the first period (March 31, 2020-October 31, 2020), the TFS exponents were less than one for both cases, for the second period (November 15, 2020-March 15, 2021) they were greater than one, and for the third period (March 31, 2021-September 15, 2021) they were less than one.

Astonishingly, this system presents another temporal property, but in this case, the location parameter μ of the fit to a lognormal distribution and the mean (M) are related also as a power law of the form

$$\mu(M) = E \times M^F,$$

where E is a factor and F is the exponent. For the first period (March 31, 2020- October 31, 2020), the fit parameters to the power law for the cumulative numbers of confirmed cases were $E=1.4442$ and $F=0.1561$ with $R^2=0.9782$ while for the cumulative numbers of deaths they were $E=0.4382$ and $F=0.2979$ with $R^2=0.9982$. For the second period (November 15, 2020-March 15, 2021), the fit parameters to the power law for the cumulative numbers of confirmed cases were $E=2.7213$ and $F=0.1017$ with $R^2=0.9917$, while for the cumulative numbers of deaths they were $E=1.7543$ and $F=0.1419$ with $R^2=0.9755$. For the third period (March 31, 2021-September 15, 2021), the fit parameter to the power law for the cumulative numbers of confirmed cases were $E=2.2306$ and $F=0.1167$ with $R^2=0.9823$, while for the cumulative numbers of deaths they were $E=0.8404$ and $F=0.2172$ with $R^2=0.9713$.

For periods of half a month (T), the standard deviations (SD) and the means (M) calculated daily both for the cumulative numbers of confirmed cases and deaths in the world (cumulative numbers that are distributed among the countries) were related as power laws of the form

$$SD(M) = C(T) \times M^{D(T)},$$

where $C(T)$ is the factor depending on the period T and $D(T)$ is the TFS exponent depending on T . This power law relation means that for periods of half a month this system also

Table 1. Fit parameters to lognormal distributions for 36 days, and means and standard deviations for the cumulative numbers of confirmed cases and deaths

Day	Cumulative number of confirmed cases				Cumulative number of deaths			
	σ	μ	M	SD	σ	μ	M	SD
31/03/2019	2.916	5.087	4868	20116	2.242	2.546	352	1490
15/04/2020	2.670	6.167	11318	53948	2.447	3.357	949	4068
30/04/2020	2.672	6.741	17729	85711	2.563	3.802	1516	6656
15/05/2020	2.655	7.169	24331	114147	2.556	4.148	1966	8604
31/05/2020	2.618	7.597	33096	14493	2.575	4.362	2327	9983
15/06/2020	2.634	7.900	43011	177739	2.566	4.645	2739	11211
30/06/2020	2.600	8.199	55930	231135	2.525	4.922	3191	12443
15/07/2020	2.610	8.452	72558	309640	2.535	5.097	3613	13800
31/07/2020	2.597	8.705	94140	412085	2.572	5.239	4093	15582
15/08/2020	2.576	8.926	114871	504236	2.527	5.445	4629	17498
31/08/2020	2.576	9.108	136402	595951	2.483	5.618	5147	19348
15/09/2020	2.588	9.259	158270	690979	2.480	5.749	5649	21009
30/09/2020	2.609	9.407	181879	791157	2.459	5.876	6117	22595
15/10/2020	2.692	9.523	207270	885885	2.465	5.989	6608	24078
31/10/2020	2.782	9.685	24415	994757	2.466	6.130	7177	25604
15/11/2020	2.910	9.802	287600	1139732	2.508	6.248	7852	27196
30/11/2020	2.979	9.908	33205	1315768	2.597	6.356	8715	29353
15/12/2021	3.006	10.041	385597	1538143	2.552	6.508	9683	32338
31/12/2020	3.007	10.172	437894	1768852	2.614	6.567	10625	35620
01/01/2021	2.984	10.313	492266	2019684	2.752	6.547	11461	39042
31/01/2021	3.058	10.376	536884	221070	2.725	6.679	12701	43321
15/02/2021	3.036	10.465	56916	2331830	2.694	6.780	13700	46832
28/02/2021	3.029	10.532	594961	241284	2.681	6.847	14419	49338
15/03/2021	3.000	10.616	626440	2501671	2.701	6.883	15081	51656
31/03/2021	2.995	10.709	671621	2621873	2.654	6.978	15989	54412
15/04/2021	3.000	10.789	724650	2775073	2.672	7.024	16874	57130
30/04/2021	2.971	10.880	788838	3003525	2.704	7.064	17872	60020
15/05/2021	2.965	10.946	846772	3261210	2.720	7.101	18831	63026
31/05/2021	3.029	10.965	884902	3437211	2.689	7.183	19827	66280
15/06/2021	3.010	11.025	915537	3539547	2.679	7.244	20685	69229
30/06/2021	2.999	11.084	944355	3614917	2.691	7.275	21242	71121
15/07/2021	2.997	11.150	979219	3686200	2.666	7.346	21887	72777
31/07/2021	2.994	11.229	1025572	3793871	2.656	7.433	22692	74432
15/08/2021	2.976	11.308	1074355	3926953	2.630	7.503	23453	75964
31/08/2021	3.044	11.338	1122840	4090524	2.631	7.542	24173	77801
15/09/2021	3.009	11.412	1167411	4244528	2.563	7.622	24920	79817

presented TFS. The fit parameters to the power law are presented in **table 2**; it is evident that the R^2 in all the cases is remarkably close to 1 indicating an excellent fit to a power law in all the cases. For the case of cumulative numbers of confirmed cases, the smallest TFS exponent (D -cases) was 0.5344 for the period July-I-21 while the largest was 1.1704

for the period May-I-21. On the other hand, in the case of cumulative numbers of deaths, the smallest TFS exponent (D -deaths) was 0.6192 for the period July-II-21 while the larger was 1.1943 for the period January-I-21.

Figure 2 shows the time evolution of the TFS exponents for cumulative numbers of confirmed cases (D -cases) and those of deaths (D -deaths) from the values in **table 2**: TFS exponents for cumulative numbers of confirmed cases (curve in blue color) had five peaks

Table 2. Power-law fit parameters C and D , and R^2 associated with the TFS of the cumulative numbers of confirmed cases and deaths for periods of half a month

Period	Cumulative # of confirmed cases			Cumulative # of deaths		
	C	D	R^2	C	D	R^2
April-I-20	1.316	1.1396	0.9956	3.390	1.0338	0.9999
April-II-20	3.469	1.0340	0.9998	2.819	1.0598	0.9994
May-I-20	18.163	0.8660	0.9998	5.793	0.9630	0.9987
May-II-20	48.645	0.7687	0.9999	12.733	0.8598	0.9993
June-I-20	39.896	0.7875	0.9998	40.246	0.7114	0.9994
June-II-20	3.129	1.0252	0.9992	47.871	0.6892	0.9996
July-I-20	0.959	1.1333	0.9998	12.790	0.8524	0.9955
July-II-20	1.497	1.0937	0.9999	5.459	0.9558	0.9927
August-I-20	3.573	1.0176	1	5.886	0.9475	0.9994
August-II-20	5.446	0.9814	0.9999	5.234	0.9614	0.9996
September-I-20	5.194	0.9855	0.9999	14.360	0.8434	0.9939
September-II-20	6.638	0.9651	0.9998	8.345	0.9065	0.9995
October-I-20	26.273	0.8517	0.9996	14.649	0.8419	0.9995
October-II-20	117.040	0.6960	0.9998	35.966	0.7398	0.9991
November-I-20	22.808	0.8606	0.9978	65.053	0.6729	0.9991
November-II-20	4.133	0.9967	0.9995	34.273	0.7444	0.9997
December-I-20	3.168	1.0178	0.997	6.563	0.9264	0.9996
December-II-20	1.226	1.0918	0.9998	2.479	1.0324	0.9982
January-I-21	0.899	1.1159	0.9998	0.554	1.1943	0.9956
January-II-21	2.664	1.0330	0.9988	2.869	1.0183	0.9996
February-I-21	14.757	0.9033	0.9996	2.245	1.0443	0.9996
February-II-21	83.190	0.7728	0.9999	2.398	1.0372	0.9997
March-I-21	261.680	0.6867	0.9997	2.302	1.0414	0.9957
March-II-21	285.310	0.6801	0.9998	11.268	0.8763	0.9992
April-I-21	98.633	0.7592	0.9996	7.759	0.9149	0.9941
April-II-21	6.985	0.9552	0.9986	13.542	0.8576	0.9979
May-I-21	0.376	1.1704	0.9999	5.319	0.9529	0.9980
May-II-21	0.769	1.1183	0.993	3.346	0.9999	0.9996
June-I-21	33.975	0.8417	0.999	2.450	1.0314	0.9990
June-II-21	409.060	0.6605	0.9979	7.695	0.9165	0.9898
July-I-21	2318.300	0.5344	0.9994	37.612	0.7573	0.9993
July-II-21	570.170	0.6360	0.9984	149.440	0.6192	0.9993
August-I-21	86.507	0.7722	0.9989	125.610	0.6365	0.9991
August-II-21	9.326	0.9325	0.9982	21.157	0.8135	0.9973
September-I-21	7.332	0.9498	0.9981	18.661	0.8259	0.9961

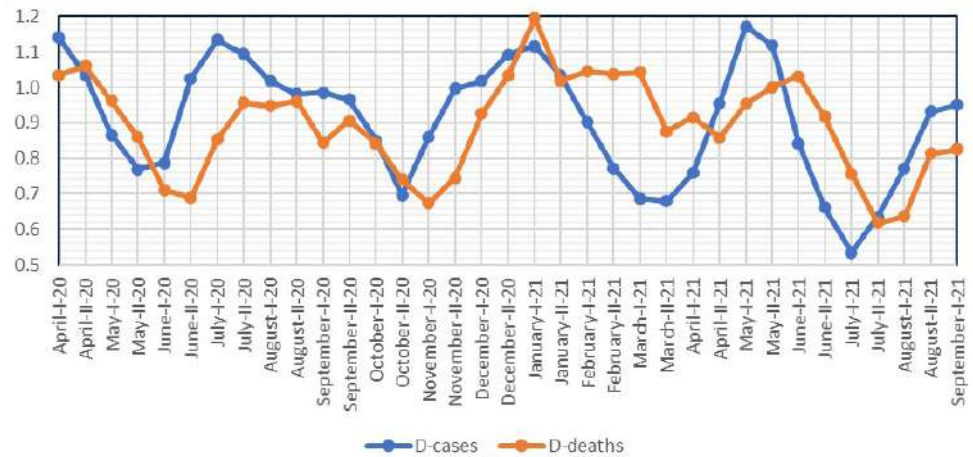


Figure 2. Time evolution of TFS exponents for the cumulative numbers of confirmed cases and deaths in periods of a-half month

in the periods April-I-20, July-I-20, January-I-21, May-I-21, and September-I-21 and those for cumulative numbers of deaths (curve in orange color) also had five peaks but in the periods April-II-20, August-II-20, January-I-21, June-I-21, and September-I. It should be noted that these peaks were associated with the COVID-19 pandemic peaks registered until now considering the time series of confirmed cases per day and deaths per day in the world (GitHub, 2021). Based on these time series, the following procedure was applied to each of the time series: (i) The average of the data for 20 consecutive days served to construct the average time series; (ii) then, these were normalized with respect to their maximum value (normalized average time series), and finally, (iii) attention was focused on these normalized average times series for cases per day and deaths per day. For the cases per day, it was evident that the peaks were on April 13, 2020, July 30, 2020, January 8, 2021, May 6, 2021, and September 1, 2021, while for deaths per day, the peaks were on April 24, 2020, August 16, 2020, January 29, 2021, May 9, 2021, and September 3, 2021.

The correlation coefficient between the TFS exponents represented in the two curves in figure 2 is 0.421. If it is assumed that the orange curve has a one-period lag with respect to the blue curve, then the correlation coefficient is 0.727, which suggests that the behavior of confirmed cases per day would be reflected approximately 15 days after in the behavior of the deaths per day and, therefore, the existence of a 14-day lag between the times series of confirmed cases per day and the deaths per day may be confirmed. To do so, the correlation coefficients are calculated as a function of the lag in the number of days for the original time series of confirmed cases per day and deaths per day (curve in blue color in figure 3), and for the normalized average time series of confirmed cases per day and deaths per day (curve in orange color in figure 3). In figure 3 the correlation coefficient shows a maximum value in both cases with a 14-day lag so the maximum value for the time series of confirmed cases per day is 0.871 while that for the normalized average time series of confirmed cases per day is 0.924. It is clear that the correlation coefficients calculated for the time series of confirmed cases per day and deaths per day exhibit an oscillating behavior with a 7-day period.

Time correlation

Considering the time series of confirmed cases per day and deaths per day in the world (GitHub, 2021), the daily return times series of confirmed cases per day $CD(t)$ and deaths per day $DD(t)$ were constructed by defining the daily return of confirmed cases per day ($DRCD$) in the following form: $DRCD(t+1) = [CD(t+1) - CD(t)] / CD(t)$; similarly, the daily

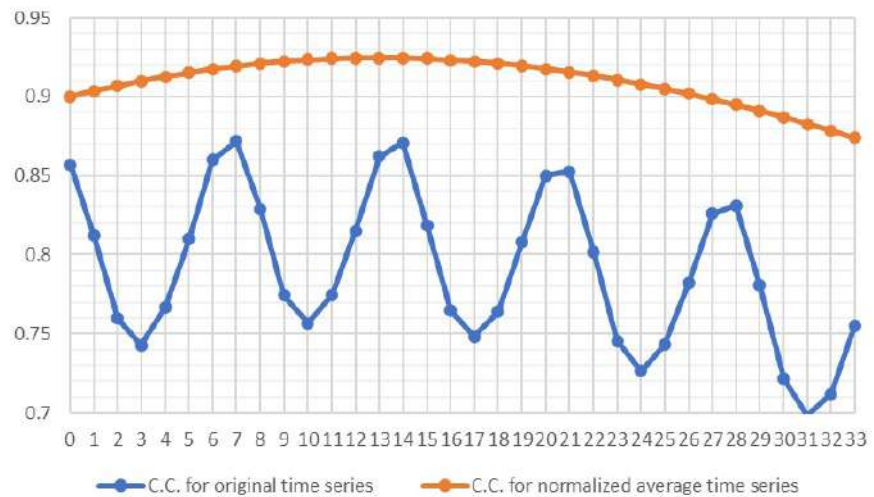


Figure 3. Correlation coefficients as a function of the lag in the number of days both for the original time series of confirmed cases per day and deaths per day and for the normalized average time series of confirmed cases per day and deaths per day

return of deaths per day (*DRDD*) was expressed as $DRDD(t+1)=[DD(t+1)-DD(t)]/DD(t)$. These definitions implied that the daily return represented the percentage change of the respective quantity between two successive days: $t + 1$ and t . In the next step, January 22, 2020, was defined for both daily return time series as the first date and September 15, 2021, as the last date, each with a total of 603 data. Starting from these daily return time series, time subseries having different numbers of data were constructed for each case so that for all the time subseries, the first data was on January 22, 2020. The number of data of the first daily return time subseries was 60, corresponding to the period from January 22, 2020, to March 21, 2020. The second daily return time subseries had 75 data, corresponding to the period from January 22, 2020, to April 5, 2020, which meant that the increase in the number of data between two consecutive time subseries was 15. Thus, the third time subseries had 90 data, corresponding to the period between January 20, 2020 and April 20, 2020. Taking the possible increments of 15 data, the total number of time subseries that could be constructed was 37. For instance, the time subseries number 36 had 585 data corresponding to the period from January 22, 2020 to October 28, 2021, and the last one had 603 data corresponding to the period from January 16, 2020 to September 15, 2021, which matched the original daily return time series.

For each one of the time subseries of confirmed cases per day and deaths per day, the following quantities were calculated: (i) mean; (ii) standard deviation; (iii) the four fit parameters to a Lévy distribution notated as α , β , μ , and σ , and (iv) the Hurst exponent (H) calculated by using a modification of the classical R/S method as in **Martín-Montoya, et al.** (2015). The results of these calculations are presented in **table 3**.

The existence of another type of TFS is apparent given that $SD(t)$ and $M(t)$ are related as a power law of the form

$$SD(t) = K \times M(t)^L,$$

where K is a factor and L is the TFS exponent. Using the values of $SD(t)$ and $M(t)$ shown in **table 3**, the fit parameters to the power law for daily returns of confirmed cases per day were $K=5.2595$ and $L=0.5372$, with $R^2=0.9997$, while these parameters for daily returns of deaths per day were $K=6.0527$ and $L=0.5159$, with $R^2=0.9997$.

Astonishingly, this system had another TFS because the standard deviation of the daily returns of deaths per day $SDDRD(t)$ and the mean of the daily returns of confirmed cases per day $DMRCC(t)$ were related as a power law of the form

$$SDDRD(t) = P \times MDRCC(t)^Q,$$

where P is a factor and Q is the TFS exponent. Using the values of $SDDRD(t)$ and $MDRCC(t)$ in **table 3**, the following fit parameters to this power law were obtained: $P=10.905$ and $Q=0.5225$, with $R^2=0.9994$. The reason for this result is that $SDDRD(t)$ and the standard deviation of daily returns of confirmed cases per day $SDDRCC(t)$ had a linear relation of

Table 3. Results of the calculation of the mean, the standard deviation, the fit parameters to a Lévy distribution, and the Hurst exponent for each one of the time subseries of confirmed cases per day and deaths per day defined by each period

Daily return time subseries of confirmed cases per day									
Per.	From	Until	St. Dev.	Mean	alpha	beta	mu	sigma	Hurst
1	2020-01-22	2020-03-21	0.7844	4.5739	1.1321	0.2129	0.3166	0.2441	0.4852
2	2020-01-22	2020-04-05	0.6407	4.0949	0.9976	0.0200	-0.8735	0.1848	0.4751
3	2020-01-22	2020-04-20	0.5383	3.7421	0.9984	0.0074	-0.4302	0.1716	0.5140
4	2020-01-22	2020-05-05	0.4622	3.4668	0.9877	0.1635	-1.1301	0.1383	0.5301
5	2020-01-22	2020-05-20	0.4070	3.2445	0.9881	0.1569	-0.9681	0.1201	0.5280
6	2020-01-22	2020-06-04	0.3644	3.0601	0.9897	0.1768	-1.0067	0.1142	0.4646
7	2020-01-22	2020-06-19	0.3308	2.9040	1.1476	0.2250	0.1345	0.1122	0.4995
8	2020-01-22	2020-07-04	0.3018	2.7698	1.1799	0.2608	0.1194	0.1008	0.5004
9	2020-01-22	2020-07-19	0.2776	2.6526	1.1919	0.3038	0.1167	0.1029	0.4939
10	2020-01-22	2020-08-03	0.2565	2.5492	1.2257	0.3271	0.1015	0.1006	0.4981
11	2020-01-22	2020-08-18	0.2397	2.4570	1.2566	0.3347	0.0899	0.0993	0.5204
12	2020-01-22	2020-09-02	0.2246	2.3741	1.2734	0.2974	0.0762	0.0966	0.5299
13	2020-01-22	2020-09-17	0.2113	2.2992	1.3115	0.2782	0.0643	0.0957	0.5406
14	2020-01-22	2020-10-02	0.1990	2.2309	1.3354	0.3201	0.0626	0.0946	0.5608
15	2020-01-22	2020-10-17	0.1892	2.1684	1.3561	0.2684	0.0537	0.0934	0.5491
16	2020-01-22	2020-11-01	0.1805	2.1109	1.3774	0.2665	0.0507	0.0936	0.5934
17	2020-01-22	2020-11-16	0.1723	2.0578	1.4029	0.2607	0.0473	0.0936	0.5838
18	2020-01-22	2020-12-01	0.1650	2.0085	1.4349	0.2553	0.0439	0.0939	0.5992
19	2020-01-22	2020-12-16	0.1603	1.9638	1.4204	0.2504	0.0441	0.0942	0.6073
20	2020-01-22	2020-12-31	0.1540	1.9210	1.4319	0.2413	0.0421	0.0943	0.6129
21	2020-01-22	2021-01-15	0.1480	1.8809	1.4396	0.2144	0.0388	0.0939	0.6012
22	2020-01-22	2021-01-30	0.1413	1.8433	1.4791	0.2213	0.0359	0.0943	0.5890
23	2020-01-22	2021-02-14	0.1351	1.8080	1.4791	0.1909	0.0319	0.0957	0.6152
24	2020-01-22	2021-03-01	0.1305	1.7745	1.4927	0.2259	0.0326	0.0959	0.6164
25	2020-01-22	2021-03-16	0.1275	1.7429	1.4926	0.2795	0.0358	0.0963	0.6139
26	2020-01-22	2021-03-31	0.1243	1.7128	1.5092	0.3072	0.0368	0.0967	0.6347
27	2020-01-22	2021-04-15	0.1209	1.6842	1.5251	0.3422	0.0374	0.0971	0.6392
28	2020-01-22	2021-04-30	0.1173	1.6570	1.5272	0.3611	0.0374	0.0958	0.6296
29	2020-01-22	2021-05-15	0.1131	1.6311	1.5331	0.3806	0.0364	0.0949	0.6174
30	2020-01-22	2021-05-30	0.1104	1.6075	1.5185	0.3739	0.0358	0.0949	0.6424
31	2020-01-22	2021-06-14	0.1069	1.5839	1.5297	0.3837	0.0344	0.0946	0.6391
32	2020-01-22	2021-06-29	0.1045	1.5613	1.5419	0.4019	0.0346	0.0947	0.6192
33	2020-01-22	2021-07-14	0.1024	1.5396	1.5567	0.4021	0.0341	0.0948	0.6258
34	2020-01-22	2021-07-29	0.1003	1.5188	1.5662	0.3648	0.0322	0.0949	0.6482
35	2020-01-22	2021-08-13	0.0986	1.4991	1.5692	0.3242	0.0309	0.0957	0.6613
36	2020-01-22	2021-08-28	0.0961	1.4803	1.5572	0.3001	0.0296	0.0964	0.6639
37	2020-01-22	2021-09-15	0.0943	1.4589	1.5441	0.3296	0.0306	0.0975	0.6665

Daily return time subseries of deaths per day									
Per.	From	Until	St. Dev.	Mean	alpha	beta	mu	sigma	Hurst
1	2020-01-22	2020-03-21	2.4080	9.4464	1.0129	0.3799	5.1485	0.2737	0.5286
2	2020-01-22	2020-04-05	1.9430	8.4868	0.9007	0.2479	-0.2688	0.2039	0.5480
3	2020-01-22	2020-04-20	1.6233	7.7723	0.9705	0.3077	-1.2154	0.1884	0.6107
4	2020-01-22	2020-05-05	1.3944	7.2124	1.0336	0.3261	1.1189	0.1774	0.6132
5	2020-01-22	2020-05-20	1.2208	6.7586	1.0781	0.3865	0.5342	0.1676	0.6294
6	2020-01-22	2020-06-04	1.0951	6.3816	1.1013	0.3929	0.4097	0.1667	0.6530
7	2020-01-22	2020-06-19	0.9896	6.0608	1.1223	0.4774	0.3849	0.1613	0.6554
8	2020-01-22	2020-07-04	0.8995	5.7843	1.1468	0.4709	0.2962	0.1549	0.6862
9	2020-01-22	2020-07-19	0.8262	5.5423	1.1638	0.4976	0.2635	0.1493	0.6973
10	2020-01-22	2020-08-03	0.7643	5.3285	1.1875	0.5079	0.2247	0.1468	0.6876
11	2020-01-22	2020-08-18	0.7129	5.1374	1.1885	0.5284	0.2216	0.1413	0.6916
12	2020-01-22	2020-09-02	0.6659	4.9658	1.1917	0.5353	0.2084	0.1362	0.7016
13	2020-01-22	2020-09-17	0.6273	4.8108	1.1867	0.5467	0.2129	0.1347	0.6966
14	2020-01-22	2020-10-02	0.5919	4.6691	1.2051	0.5222	0.1846	0.1361	0.6883
15	2020-01-22	2020-10-17	0.5607	4.5393	1.2216	0.5446	0.1722	0.1348	0.6987
16	2020-01-22	2020-11-01	0.5323	4.4197	1.2489	0.5673	0.1577	0.1371	0.7130
17	2020-01-22	2020-11-16	0.5083	4.3090	1.2772	0.6053	0.1499	0.1389	0.7325
18	2020-01-22	2020-12-01	0.4868	4.2062	1.2891	0.6343	0.1489	0.1389	0.7418
19	2020-01-22	2020-12-16	0.4659	4.1106	1.3058	0.6426	0.1394	0.1386	0.7540
20	2020-01-22	2020-12-31	0.4467	4.0213	1.3102	0.6601	0.1379	0.1379	0.7568
21	2020-01-22	2021-01-15	0.4297	3.9376	1.3139	0.6676	0.1359	0.1378	0.7641
22	2020-01-22	2021-01-30	0.4136	3.8591	1.3181	0.6662	0.1315	0.1375	0.7710
23	2020-01-22	2021-02-14	0.3977	3.7853	1.3347	0.6659	0.1236	0.1406	0.7692
24	2020-01-22	2021-03-01	0.3845	3.7153	1.3486	0.6809	0.1199	0.1415	0.7736
25	2020-01-22	2021-03-16	0.3725	3.6491	1.3637	0.6953	0.1168	0.1428	0.7767
26	2020-01-22	2021-03-31	0.3607	3.5862	1.3746	0.6993	0.1123	0.1421	0.7854
27	2020-01-22	2021-04-15	0.3496	3.5265	1.3769	0.7042	0.1105	0.1412	0.7837
28	2020-01-22	2021-04-30	0.33877	3.4697	1.3861	0.7049	0.1056	0.1399	0.7776
29	2020-01-22	2021-05-15	0.32817	3.4155	1.3929	0.7013	0.1003	0.1379	0.7862
30	2020-01-22	2021-05-30	0.31784	3.3639	1.3895	0.7039	0.0985	0.1357	0.8142
31	2020-01-22	2021-06-14	0.30939	3.3147	1.3882	0.7251	0.1001	0.1357	0.8183
32	2020-01-22	2021-06-29	0.30098	3.2674	1.3919	0.7295	0.0986	0.1345	0.8158
33	2020-01-22	2021-07-14	0.29289	3.222	1.4	0.7211	0.0932	0.1327	0.8337
34	2020-01-22	2021-07-29	0.28764	3.1794	1.3953	0.6972	0.0917	0.1323	0.8338
35	2020-01-22	2021-08-13	0.28034	3.1377	1.3978	0.7004	0.0899	0.1311	0.8402
36	2020-01-22	2021-08-28	0.2731	3.0975	1.3994	0.7052	0.0883	0.1299	0.832
37	2020-01-22	2021-09-15	0.26617	3.0514	1.4038	0.7149	0.0884	0.1305	0.8348

the form $SDDRED(t) = 2.062 * SDDRCC(t) + 0.0581$, with $R^2=0.9999$. This implies that the correlation coefficient between the standard deviations $SDDRED(t)$ and $SDDRCC(t)$ in **table 3** should be 1 and, effectively, this correlation coefficient was 0.9999718. This result implies that the behavior of the daily returns of deaths per day was highly correlated to the behavior of the daily returns of confirmed cases per day as validated by the fact that



Figure 4. Evolution on time for Hurts exponents of the daily returns of confirmed cases per day (blue color curve) and the daily returns of deaths per day (orange color curve).

the mean of the daily returns of deaths per day $MDRD(t)$ was related with the mean of the daily returns of confirmed cases $MDRCC(t)$ through the linear relation $MDRD(t) = 3.074 * MDRCC(t) - 0.0226$, with $R^2 = 0.9999$.

On the other hand, the Hurts exponents of the daily returns of confirmed cases per day and those of the daily returns of deaths per day in **table 3** are represented in **figure 4** where the evolution on time for the Hurts exponents of the daily returns of confirmed cases per day (blue color curve) and for those of the daily returns of deaths per day (orange color curve) are shown. The time correlation behavior as anti-persistent ($H < 0,5$) was detected for the daily returns of confirmed cases per day in the following periods: January 22, 2020, to March 21, 2020; January 22, 2020, to April 5, 2020; January 22, 2020, to June 4, 2020; January 22, 2020, to June 19, 2020; January 22, 2020, to July 19, 2020, and January 22, 2020, to August 3, 2020. The behavior of the time correlation was persistent ($H > 0,5$) for the other 31 periods. This persistent behavior grew continuously on time as the Hurst exponent for the period between January 22, 2020, and August 18, 2020, was 0.5204 while between January 22, 2020, and September 15, 2021, it was 0.6665. Additionally, the behavior of the short-long correlation in time was persistent ($H > 0,5$) only for the daily returns of deaths per day for the 37 periods, a behavior that grew continuously with time as the Hurst exponent for the period from January 22, 2020, to March 31, 2020 was 0.5286 and from January 22, 2020 to September 15, 2021 it was 0.8348.

Conclusions

The availability of the time series of confirmed cases and deaths (**GitHub, 2021**) from January 1, 2020, to September 15, 2021, allowed for the detection of complex system properties such as lognormal laws, temporal fluctuation scaling, and time correlation in the spreading of the COVID-19 pandemic around the world.

During the period from January 1, 2020, to March 31, 2020, the spread of the COVID-19 pandemic had vertiginous progress in the world as the number of countries with confirmed cases and deaths increased. Besides, during the period from January 1, 2020, to March 30, 2020, the daily distributions of cumulative numbers of confirmed cases and deaths among countries did not fit any probability density function because the system behaved as if it were in a non-equilibrium state. Consequently, only after March 30, 2020, these daily distributions perfectly fitted lognormals of two parameters as the system behaved in an equilibrium state.

For periods of half a month, the standard deviations and the means calculated daily both for the cumulative numbers of confirmed cases and for those of deaths in the world were related as power laws as a manifestation of the TFS. Specifically, the values of the TFS exponents depended on the period considered and their values were between 0.53 and 1.19. Moreover, the TFS exponents for cumulative numbers of confirmed cases showed five peaks in the periods April-I-20, July-I-20, January-I-21, May-I-21, and September-I-21 and the TFS exponents for cumulative numbers of deaths also had five peaks but in the periods April-II-20, August-II-20, January-I-21, June-I-21, and September-I and they were associated with the five peaks that the COVID-19 pandemic around the world had had until September 15, 2021.

Starting from the daily return times series of confirmed cases and deaths per day and taking all the possible increments of 15 data between two successive time subseries for each case, the total number of daily returns time subseries constructed was 37. For all these daily return time subseries, the mean, the standard deviation, the fit parameters to a Lévy distribution and the Hurst exponent were calculated. It should be mentioned that the Hurst exponents were calculated by using a modification of the classical R/S method used when the time series is not large enough. The standard deviations and the means of all the daily returns time subseries for confirmed cases and deaths per day were related as power laws indicating the existence of another type of TFS in the system. Also, the standard deviations of the daily returns of deaths and the means of those of confirmed cases per day were related as a power law meaning that the daily returns of deaths per day were highly correlated to those of confirmed cases per day.

The presence of complex system properties in the spreading of the COVID-19 pandemic at world level was determined by considering the world as constituted by countries, although they were also found when smaller regions were considered. In another study in progress, it has been shown that these properties are also present at country level considering countries as constituted by states and, similarly, they are present as well at state level when it is assumed these are constituted by counties indicating that the properties identified here are invariant when the spatial scale changes.

These results are consistent with the stochastic nature of the spread of the COVID-19 pandemic around the world. Consequently, a stochastic model aimed at explaining it should lead to the emergence of the complex system properties identified in this paper.

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest that may affect the content of this article.

References

- Abril F. S. & Quimbay C. J.** (2021). Temporal fluctuation scaling in nonstationary time series using the path integral formalism. *Physical Review E*. **103**: 042126. Doi: 10.1103/PhysRevE.103.042126
- Álvarez, E., Brida, J. G., Linas, E.** (2020). Comparisons of COVID-19 dynamics in the different countries of the World using time-series clustering. medRxiv preprint. Doi: 10.1101/2020.08.18.20177261
- Anacleto, M. A., Brito, F. A., de Queiroz, A. R., Passos, E., Santos, J. R. L.** (2020). Diffusive process under Lifshitz scaling and pandemics scenarios. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. **559**: 125092. Doi: 10.1016/j.physa.2020.125092
- Antônio, N., Rita, P., Saraiva, P.** (2021). COVID-19: Worldwide profiles during the first 250 days. *Applied Sciences*. **11**: 3400. Doi: 10.3390/app11083400
- Barro, R. J., Ursúa, J. F., Weng, J.** (2020). The Coronavirus and the Great Influenza Pandemic: Lessons from the “Spanish Flu” for the Coronavirus’s potential effects on mortality and economic activity. Working Paper 26866. National Bureau of Economic Research. Doi: 10.3386/w26866
- Beare, B. K. & Toda, A. A.** (2020). Diffusive process under Lifshitz scaling and pandemics scenarios. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. **412**: 132649. Doi: 10.1016/j.physd.2020.132649

- Chen, C. C., Lee, Y. T., Chang, Y. F.** (2008). A relationship between Hurst exponents of slip and waiting time data of earthquakes. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. **387** (18): 4643-4648. Doi: 10.1016/j.physa.2007.08.063
- Dimarco, G., Pareschi, L., Toscani, G., Zanella, M.** (2020). Wealth distribution under the spread of infectious diseases. *Physical Review E*. **102**: 022303. Doi: 10.1103/PhysRevE.102.022303
- Dong, E., Du, H., Gardner, L.** (2020). An interactive web-based dashboard to track COVID-19 in real time. *Correspondence*. **20** (5): 533-534. Doi: 10.1016/S1473-3099(20)30120-1
- Drăgulescu, A. & Yakovenko, V. M.** (2000). Statistical mechanics of money. *The European Physical Journal B*. **17**: 723-729. Doi: 10.1007/s100510070114
- Eisler, Z. & Kertész, J.** (2006). Scaling theory of temporal correlations and size-dependent fluctuations in the traded value of stocks. *Physical Review E*. **73**: 046109. Doi: 10.1103/PhysRevE.73.046109
- Eisler, Z., Bartos, I., Kertész, J.** (2007). Fluctuation scaling in complex systems: Taylor's law and beyond. *Advances in Physics*. **57** (1): 89-142. Doi: 10.1080/00018730801893043
- Feoli, A., Lannella, A. L., Benedetto, E.** (2020). Spreading of COVID-19 in Italy as the spreading of a wave packet. *The European Physical Journal Plus*. **135**: 644. Doi: 10.1140/epjp/s13360-020-00663-7
- Fronczak, A. & Fronczak, P.** (2010). Origins of Taylor's power law for fluctuations scaling in complex systems. *Physical Review E*. **81**: 066112. Doi: 10.1103/PhysRevE.81.066112
- GitHub.** (2021). COVID-19 Data. Accessed on: September 16, 2021. Available from: [covid-19-data/public/data](https://github.com/covid19-data/public/data) at master · owid/covid-19-data · GitHub.
- Grau-Carles, P.** (2000). Empirical evidence of long-range correlations in stock returns. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. **287** (3-4): 396-404. Doi: 10.1016/S0378-4371(00)00378-2
- Hays, J. N.** (2005). *Epidemics and pandemics: their impact on human history*. ABC-Clio, Inc. Santa Barbara, California, Pgs. 23, 41, 171, 193, 385.
- Holovatch, Y., Kenna, R., Thurner S.** (2017). Complex systems: physics beyond physics. *European Journal of Physics*. **38**: 023002. Doi: 10.1088/1361-6404/aa5a87
- Huremović, D.** (2019). Brief History of Pandemics (Pandemics Throughout History). In: Huremović D. (eds) *Psychiatry of Pandemics*. Springer, Cham. Doi: 10.1007/978-3-030-15346-5_2
- Limpert, E., Stahel, W. A., Abbt M.** (2001). Log-normal distributions across the sciences: keys and clues. *BioSciences*. **51**: 341-352. Doi: 10.1641/0006-3568(2001)051[0341:LNDATS]2.0.CO;2
- Mantegna, R. N. & Stanley, H. E.** (2000). *An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. Cambridge University Press, Cambridge. p. 48.
- Melin, P. & Castillo, O.** (2020). Analysis of spatial spread relationships of Coronavirus (COVID-19) pandemic in the world using self-organizing maps. *Chaos, Solitons & Fractals*. **138**: 109917. Doi: 10.1016/j.chaos.2020.109917
- Martín-Montoya, L. A., Aranda-Camacho, N. M., Quimbay, C. J.** (2015). Long-range correlations and trends in Colombian seismic time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. **421**: 124-133. Doi: 10.1016/j.physa.2014.10.073
- Mitzenmacher, M.** (2004). A brief history of generative models for power law and lognormal distributions. *Internet Mathematics*. **1**: 226-251. Doi: 10.1080/15427951.2004.10129088
- Quevedo, D. S. & Quimbay, C. J.** (2020). Non-conservative kinetic model of wealth exchange with saving of production. *The European Physical Journal B*. **93**: 186. Doi: 10.1140/epjb/e2020-10193-3
- Sánchez-Granero, M. A., Trinidad-Segovia, J. E., García-Pérez, J.** (2008). Some comments on Hurst exponent and the long-memory processes on capital markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. **387**: 5543-5551. Doi: 10.1016/j.physa.2008.05.053
- Stanley, H. E.** (1971). *Introduction to phase transitions and critical phenomena*. Oxford University Press, London. p. 226.
- Thurner S., Klimek, P., Hanel, R.** (2020). A network-based explanation of why most COVID-19 infection curves are linear. *Proceedings of the National Academic of Sciences of the United States of America*. **117** (37): 22684-22689. Doi: 10.1073/pnas.2010398117
- Trinidad-Segovia, J. E., Fernández-Martínez, M., Sánchez-Granero, M. A.** (2012). A note on geometric method-based procedures to calculate the Hurst exponent. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. **391**: 2209-2214. Doi: 10.1016/j.physa.2011.11.044
- Varotsos, P. A., Sarlis, N. V., Skordas, E. S.** (2002). Long-range correlations in the electric signals that precede rupture. *Physical Review E*. **66**: 011902. Doi: 10.1103/PhysRevE.66.011902
- Worldometers.** (2021). "COVID-19 coronavirus pandemic". Accessed on: September 16, 2021. Available from: <https://www.worldometers.info/coronavirus>

Artículo de revisión

Nano-biointerface entre semiconductor y membrana celular: fenómenos fisicoquímicos implicados en la nanotoxicidad y la capacidad antifúngica de las nanopartículas de óxido de cinc

The semiconductor-cell membrane nano-biointerface: Physicochemical phenomena to consider in explaining the nanotoxicity and antifungal capacity of zinc oxide nanoparticles

✉ J. E. Rodríguez-Páez

Grupo CYTEMAC, Departamento de Física – FACNED, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

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

Resumen

La aplicación de la nanotecnología, específicamente de las nanopartículas en campos como la medicina, la remediación medioambiental y la agricultura pasa por conocer y entender las interacciones que ocurren entre estas y el sistema biológico, para lo cual es necesario abordar el estudio de la nano-biointerface. Con base en resultados obtenidos en el estudio de la capacidad antifúngica y antibacteriana de las nanopartículas de óxido de cinc (ZnO-NPs), se hizo una revisión de ciertos fenómenos fisicoquímicos que podrían ocurrir en la interface entre semiconductor y membrana celular y explicarían la acción de dichas nanopartículas. Concretamente, se analizaron los efectos de la naturaleza semiconductor del ZnO y la existencia de defectos puntuales en el sólido, así como de las interacciones de tipo entrópico, sobre un sistema biológico. Con base en estos procesos fisicoquímicos, se estructuraron modelos cualitativos de mecanismos que permitirían explicar los efectos de la presencia de las ZnO-NPs en cultivos de diversos hongos (*Omphalia* sp., *Colletotrichum* sp. y *Phoma* sp.), tales como la inhibición de su crecimiento y la alteración de su ultraestructura, y de la bacteria *Escherichia coli*, en la cual causarían la inhibición del crecimiento hasta en un ~70 % y una concentración mínima inhibitoria (CMI₅₀) de 30,40 µg/mL, sin incidencia de radiación UV.

Palabras clave: nano-biointerface; interacciones entrópicas; semiconductor; defectos puntuales; patógenos.

Abstract

The application of nanotechnology, specifically of nanoparticles (NPs), in fields such as medicine, environmental remediation, and agriculture, requires knowledge and understanding of the interactions occurring between biological systems and NPs. It is, therefore, necessary to undertake the study of the nano-biointerface. Based on the results obtained in studies on the antifungal and antibacterial capacity of the zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs), a review is presented of certain physicochemical phenomena that might occur at the semiconductor-cell membrane interface and that would allow explaining the action of these NPs. Specifically, analysis was made of the effects on a biological system of entropic-type interactions, the semiconductor nature of ZnO and the existence of specific defects in the solid. Based on these physicochemical processes, qualitative models were structured of mechanisms that would explain the effects of the presence of ZnO-NPs on cultures of various fungi (*Omphalia* sp., *Colletotrichum* sp., and *Phoma* sp.), their growth inhibition, and the alteration of their ultrastructure, as well as on *Escherichia coli* bacteria, whose growth was inhibited up to ~70% reaching an MIC₅₀ of 30.40 µg/mL without incidence of UV radiation.

Keywords: Nano-biointerface; Entropic interactions; Semiconductor; Point defects; Pathogens.

Citación: Rodríguez-Páez JE. Nano-biointerface entre semiconductor y membrana celular: fenómenos fisicoquímicos implicados en la nanotoxicidad y la capacidad antifúngica de las nanopartículas de óxido de cinc. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1053-1070, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1513>

Editor: Edgar Emir González

Correspondencia:

J. E. Rodríguez-Páez;
jnpaez@unicauca.edu.co

Recibido: 1 de julio de 2021

Aceptado: 6 de noviembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Introducción

En la naturaleza se presentan diferentes interfaces: principalmente sólido-sólido, sólido-líquido, sólido-gas y líquido-gas, en las que ocurren toda una serie de procesos fisicoquímicos de gran interés científico y tecnológico. El análisis y estudio de la interface sólido-gas han permitido el desarrollo de campos del conocimiento importantes, de gran interés tecnológico, como es el caso de la catálisis (**Suib**, 2013) y los sensores de gases (**Jaaniso & Tan**, 2013). Otras interfaces más específicas, como las de metal-metal, metal-semiconductor, semiconductor-semiconductor y metal-dieléctrico, entre otras, han contribuido al desarrollo de una gran variedad de dispositivos de importancia tecnológica (**Rhoderick**, 1980; **Sze & Ng**, 2007). En la actualidad hay gran interés por una interface muy particular denominada nano-biointerface o bio-nanointerface, dependiendo de cómo se la mire, que es la que se genera entre un nanomaterial, o una nanopartícula en particular, y un sistema biológico (**Nel, et al.**, 2009). Esta interface es importante cuando se estudia la interacción de las nanopartículas con los sistemas biológicos en la perspectiva de su potencial aplicación en la medicina (**Ciofani**, 2018), en la biología (**Salata**, 2004; **De, et al.**, 2008) y, específicamente, en la agricultura (**López-Valdez & Fernández-Luqueño**, 2018; **Faisal, et al.**, 2018). En esta biointerface ocurre una serie de interacciones fisicoquímicas dinámicas, así como intercambios cinéticos y termodinámicos, entre la superficie de los nanomateriales y la de los sistemas biológicos, incluidas las proteínas, la membrana celular, la pared celular, los fosfolípidos, las organelas, el ADN y los fluidos biológicos, entre otros. La comprensión e interpretación de las interacciones y los fenómenos que ocurren en esta interface facilitarían la aplicación de la nanotecnología a la biología. Comúnmente, estos estudios consideran que las nanopartículas se encuentran “inmersas” o “suspendidas” en un cultivo o medio biológico y se estudia su interacción con la membrana celular, las organelas o el citoplasma, considerando las fuerzas de interés para la fisicoquímica coloidal, dada la naturaleza de las nanopartículas, y la forma en que se modifican estas interacciones en presencia del sistema biológico (**Lyklema**, 1993; **Ohshima**, 2012).

Para entender los fenómenos y procesos que ocurren en la nano-biointerface, se deben tener en cuenta, principalmente, tres factores (**Nel, et al.**, 2009; **Pulido-Reyes, et al.**, 2017): 1) las características de la superficie del nanomaterial; 2) las características del medio donde esté inmerso o suspendido, y 3) las propiedades y el efecto del sistema o sistemas biológicos presentes. Con relación a la superficie del nanomaterial, sus características están determinadas por su composición química, su forma y tamaño, el valor de su superficie específica, su porosidad, los grupos funcionales y ligandos que determinan su naturaleza ácida o básica, así como su hidrofobicidad o su carácter hidrofílico, el tipo de estructura cristalina superficial y sus heterogeneidades y el estado de oxidación de los cationes superficiales, entre otros aspectos (**Nel, et al.**, 2009; **Pulido-Reyes, et al.**, 2017; **Verma & Stellaci**, 2010; **Pulido-Reyes, et al.**, 2015). El segundo factor que debe considerarse es externo al sólido, pero afecta las características y el comportamiento de las nanopartículas. Las características del medio donde estas se suspenden determinarían su tamaño hidrodinámico, su carga efectiva, la valencia de los cationes superficiales, así como su estado de agregación y su capacidad de disolución (**Pulido-Reyes, et al.**, 2017; **Brian, et al.**, 2011). La interacción del nanomaterial con el medio puede, además, promover la adsorción de iones, proteínas, compuestos orgánicos y surfactantes, así como la formación de una estructura de doble capa a su alrededor, o minimizar su energía libre superficial mediante la reestructuración o “relajación” de la superficie (**Nel, et al.**, 2009; **Min, et al.**, 2008).

Un tercer factor se relaciona con las características del sistema biológico que interactúa con el nanomaterial, las que estarían determinadas por su composición y su capacidad para afectar el entorno (**Pulido-Reyes, et al.**, 2017). El sistema biológico puede contener grandes moléculas orgánicas: proteínas, fosfolípidos, ácidos nucleicos y sacáridos, entre otras. Cuando la nanopartícula interactúa con estas biomoléculas pueden ocurrir tres procesos: 1) la adsorción de las biomoléculas sobre la superficie del nanomaterial; 2) la

reconstrucción y alteración de las funciones de las proteínas, y 3) las reacciones redox entre la nanopartícula y las especies reactivas (Tian, *et al.*, 2020). Estas nano biointeracciones no solo pueden afectar las características y funcionalidad de las nanopartículas sino, también, la función biológica celular (Liu, *et al.*, 2013).

La adsorción de las biomoléculas es un proceso crítico cuando el nanomaterial interactúa con el sistema biológico. Considerando específicamente la presencia de proteínas, su adsorción se ve favorecida si la superficie del nanomaterial está cargada y es hidrofóbica. Además, la adsorción de las proteínas por el nanomaterial está determinada por la afinidad del enlace proteína–nanomaterial, así como por las interacciones proteína–proteína, las cuales llevan a la conformación de un ensamble entre el nanomaterial y las proteínas adsorbidas denominado “corona nanomaterial–proteína” (Rahman, *et al.*, 2013). Esta corona de proteínas es una entidad dinámica en la que las proteínas se adsorben continuamente en la superficie de la nanopartícula; si estas no se adsorben a través de enlaces covalentes, se desorben y son reemplazadas, rápidamente, por otras proteínas (Pulido-Reyes, *et al.*, 2017). Esta corona de proteínas no es espacialmente homogénea (Cai, *et al.*, 2017), ya que presenta una capa interna, denominada “corona dura”, muy robusta y estable, constituida por proteínas que se adsorben fuertemente a la superficie de la nanopartícula a través de un mecanismo de naturaleza entrópica. En esta “corona dura”, las proteínas prolongan bastante el tiempo de residencia, y tienen un intercambio lento y grandes cambios de configuración. El modelo estructural y composicional de la corona nanopartícula-proteínas (Pulido-Reyes, *et al.*, 2017; Rahman, *et al.*, 2013; Cai, *et al.*, 2017) considera la presencia de otra capa sobre la “corona dura”, denominada “corona blanda”, constituida por proteínas débilmente ligadas, con baja afinidad entre ellas, y favorecidas termodinámicamente (Goppert & Muller, 2005), que presentan muy pocos cambios de configuración (Pulido-Reyes, *et al.*, 2017; Rahman, *et al.*, 2013). Esta “corona blanda” (externa) es más dinámica, por lo que las proteínas que la conforman presentan un rápido intercambio con las proteínas libres que se encuentran en el medio que rodea el nanomaterial. Es por ello que se considera el mapa proteómico de la corona blanda como la “antena comunicante” entre la nanopartícula y el sistema biológico (Cai, *et al.*, 2017), lo que indica que la cinética de asociación y disociación del sistema nanopartícula–proteínas, así como el intercambio con las proteínas libres en el medio, determinarían la interacción del nanomaterial con el sistema biológico correspondiente. Por lo tanto, para entender la interacción de las biomoléculas con la nanopartícula, es necesario considerar, además del tamaño y la forma de la partícula, la naturaleza fisicoquímica de su superficie: hidrofobicidad, radio de curvatura, carga eléctrica, y tipo de defectos, entre otros aspectos. Además, en la superficie pueden existir grupos funcionales o especies químicas que reflejen la historia previa de las nanopartículas y afectarían la cinética de adsorción de las proteínas (Nel, *et al.*, 2009). Estas especies químicas preexistentes tendrían su origen en el método de síntesis utilizado en la obtención de las nanopartículas, o en su exposición al medio ambiente.

La naturaleza eléctrica de los nanomateriales es una característica que habría que considerar al analizar su interacción con un sistema biológico. Aunque actualmente es de interés estudiar el efecto de las nanopartículas semiconductores en ciertos sistemas biológicos, principalmente su toxicidad (Yan, *et al.*, 2017), esta característica no se ha considerado. Un efecto importante que se generaría a partir de la interacción semiconductor-sistema biológico, es el propiciado por el potencial redox de las especies químicas que conforman dicho sistema y que afectaría la posición del nivel de Fermi del semiconductor, así como los bordes de sus bandas de conducción y de valencia, afectando el comportamiento eléctrico del material. Lo anterior ocasionaría que las bandas de energía del semiconductor se curvaran (Zhang & Yates, 2012), generando la transferencia de carga interface y, por lo tanto, una región de carga espacial cuya extensión dependería de la naturaleza y concentración de las impurezas presentes en la superficie del material (átomos metálicos o especies químicas adsorbidas), así como el tipo de defectos del nanomaterial. Tanto las impurezas como los defectos generan estados localizados en el interior de la brecha

de energía del semiconductor, originando niveles cuasi-Fermi que, al alinearse con los orbitales moleculares no llenos de las biomoléculas de la interface, propiciarían reacciones electroquímicas y, por lo tanto, la estimulación celular.

Si se consideran los fenómenos y procesos fisicoquímicos que ocurren en la biointerface semiconductor–membrana celular, estos permitirían justificar, en parte, el efecto de la presencia de nanopartículas de estos semiconductores, entre ellas las del óxido de zinc (ZnO), en los sistemas biológicos. El interés específico de esta revisión es señalar la importancia de ciertos fenómenos fisicoquímicos que pueden ocurrir en la nanobiointerface, con el fin de explicar el efecto antifúngico y nanotóxico de las ZnO-NPs reportado en la literatura científica y que se ilustra a continuación indicando, a la vez, algunos resultados experimentales obtenidos en nuestro laboratorio.

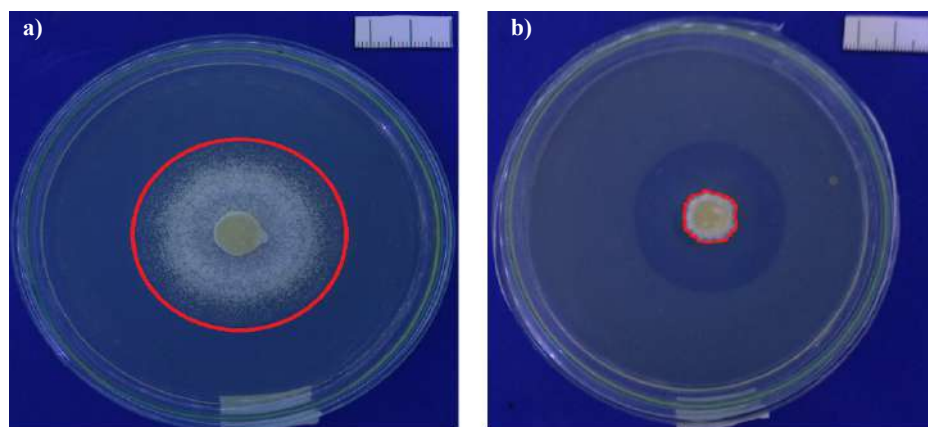
Resultados experimentales que evidencian la capacidad antifúngica y antibacteriana de las ZnO-NPs

Las interacciones y los diversos fenómenos fisicoquímicos que ocurren en la bio-interface nanomaterial-membrana celular, así como sus características, permiten explicar y justificar los efectos favorables o tóxicos que se generan al poner en contacto las nanopartículas de un cierto material, por ejemplo un óxido metálico, con un sistema biológico particular. Estos efectos están ampliamente registrados e ilustrados en la literatura científica mediante reportes que presentan los resultados de la evaluación de la toxicidad de las nanopartículas en general, es decir, la nanotoxicidad (Zhao, *et al.*, 2016), y la de las ZnO-NPs en particular (Singh, 2019; Demir, 2020). Existe un gran interés en evaluar la capacidad antifúngica de estas nanopartículas (Alghuthaymi, *et al.*, 2021), así como conocer su efecto antibacteriano (Gudkov, *et al.*, 2021; Sirelkhatim, *et al.*, 2015). El interés específico de nuestro grupo de investigación se ha centrado en evaluar la nanotoxicidad de las ZnO-NPs (Medina, *et al.*, 2018) y su efecto en los hongos que afectan los cultivos de café: *Cercospora* sp. (Patiño-Portela, *et al.*, 2021), *Mycena citricolor* (Arciniegas-Grijalba, *et al.*, 2019), *Colletotrichum* sp. (Mosquera-Sánchez, *et al.*, 2020), y *Erythrium salmolicolor* (Arciniegas-Grijalba, *et al.*, 2017), y en otros más comunes como *Aspergillus niger* y *Botrytis cinerea* (Erazo, *et al.*, 2019).

Para ilustrar el efecto de las ZnO-NPs en ciertos sistemas biológicos, se indican a continuación resultados obtenidos recientemente en nuestro laboratorio después de una rigurosa observancia de los protocolos establecidos para realizar los ensayos correspondientes, los cuales se describen detalladamente en los artículos publicados y en los trabajos referenciados. Además, las ZnO-NPs empleadas se sintetizaron en nuestro laboratorio siguiendo rutas químicas, como el método diol (Patiño-Portela, *et al.*, 2021; Arciniegas-Grijalba, *et al.*, 2019; Erazo, *et al.*, 2019), el sol-gel (Arciniegas-Grijalba, *et al.*, 2017), el complejo polimérico de Pechini (Vargas, *et al.*, 2021), o precipitación controlada (Rodríguez-Páez, 2013; Rodríguez-Páez, *et al.*, 2019).

En la **figura 1** se muestran las características del crecimiento micelial macroscópico del hongo *Omphalia* sp. a los 17 días de edad, considerando el testigo (**Figura 1a**) y una cepa sometida al tratamiento con ZnO-NPs (12) (**Figura 1b**). Según los resultados, a los 17 días de tratamiento con las ZnO-NPs en la concentración indicada, se observó la inhibición del crecimiento del hongo, efecto evidenciado por cambios morfológicos del área de su crecimiento, así como por el halo de inhibición que se observó en el medio de cultivo (**Figura 1b**).

En las micrografías obtenidas con microscopía electrónica de transmisión (**Figura 2**), se observan cortes transversales de muestras representativas de *Colletotrichum* sp. sin tratamiento (**Figura 2a**) y con tratamiento con ZnO-NPs (**Figura 2b**). En ellos se evidencia el efecto de la presencia de estas nanopartículas en la estructura de la hifa, caracterizada, principalmente, por la gran vacuolización en las muestras tratadas con el nanomaterial (**Figura 2b**). Por otro lado, en la pared celular se evidencia la acción de las ZnO-NPs: en la muestra de control (**Figura 2a**) la pared celular fue menos electrodensa



FORMA	
(a) Circular	(b) Irregular
MARGEN	
(a) Radial	(a) Radial
TEXTURA	
(a) Algodonosa	(b) Glabrosa
ÁREA DE CRECIMIENTO	
(a) 20,75 cm ²	(b) 1,616 cm ²

Figura 1. Crecimiento micelial macroscópico del hongo *Omphalia* sp. a los 17 días de edad: (a) testigo y (b) tratado con una concentración de 12 de nanopartículas de ZnO (Agredo-Trochez & Molano-Cabezas, 2020).

que en las hifas que crecieron en presencia de las ZnO-NPs (**Figura 2b**). Además, en estas últimas se formó una capa de apariencia fibrilar (indicada por la flecha delgada en la **figura 2b**) bastante electrodensa, lo que podría sugerir la adherencia de las ZnO-NPs a la capa externa de la pared celular (flecha gruesa), o su afectación del entorno de la capa celular. Se requiere un análisis más cuidadoso de esta zona (**Figura 2b**) para determinar la presencia de las nanopartículas en esta capa fibrilar.

En el estudio de Agredo-Trochez & Molano-Cabezas (2020) y en el de Mosquera-Sánchez (2021), las ZnO-NPs se sintetizaron utilizando el método diol y se obtuvieron partículas primarias esféricas entre 20 y 70 nm, con bajo nivel de aglomeración (Mosquera-Sánchez, *et al.*, 2020), no estequiométricas, en las que las vacancias de oxígeno fueron el defecto puntual más importante (Erazo, *et al.*, 2019; Agredo-Trochez & Molano-Cabezas, 2020).

Un resultado similar se obtuvo cuando se trató el hongo *Phoma* sp. con ZnO-NPs, tal como se observa en la **figura 3** (Arciniegas-Grijalba & Patiño-Portela, 2015). En ella es evidente un incremento en el número de vacuolas (V), y un aumento de la red fibrilar (R_p) que rodea la pared celular (P_c) de la célula. Para realizar este ensayo se utilizaron ZnO-NPs sintetizadas por el método sol-gel (Arciniegas-Grijalba, *et al.*, 2017; Arciniegas-Grijalba & Patiño-Portela, 2015). Estas nanopartículas presentaron dos morfologías: esférica y acicular, aunque observando más cuidadosamente estas últimas, se vio que estaban conformadas por una agregación ordenada de nanopartículas esféricas. Es decir que, realmente, las partículas primarias tendrían una forma esférica y un tamaño entre 20 y 35 nm (Arciniegas-Grijalba, *et al.*, 2017).

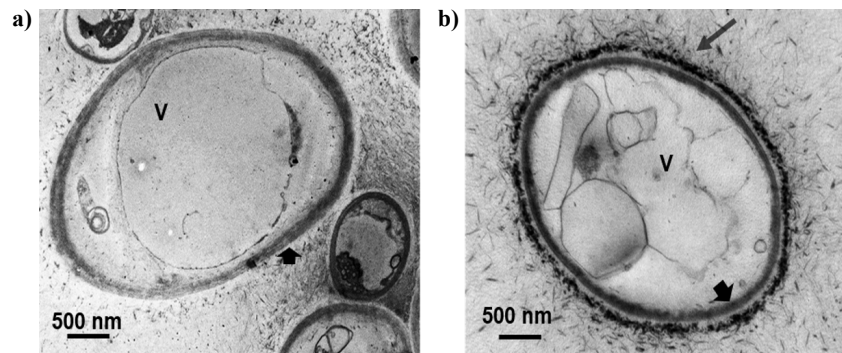


Figura 2. Micrografías electrónicas de corte transversal de *Colletotrichum* sp. en ausencia (a) y presencia (b) de nanopartículas de óxido de cinc (ZnO-NPs) donde se observa la pared celular (flecha gruesa), la capa fibrilar que rodea la pared celular de la hifa (flecha delgada) y vacuolas (V) (Mosquera Sánchez, 2021).

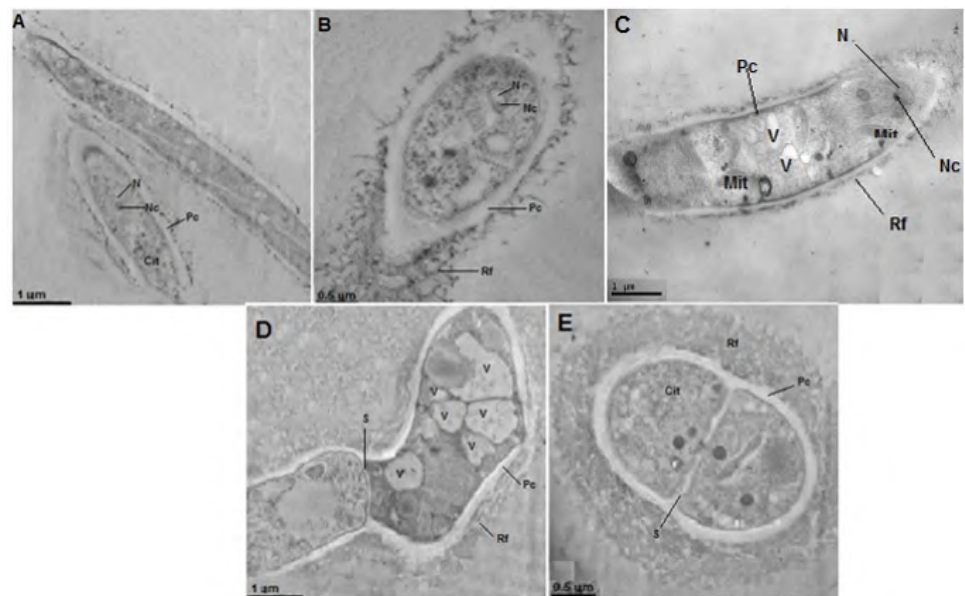


Figura 3. Micrografía electrónica de transmisión de *Phoma* sp.: (A y B) testigo, (C) sometido al tratamiento con el fungicida (oxicloruro de cobre - $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$), y (D y E) tratado con ZnO-NPs en una concentración 12 mmol.L^{-1} [núcleo (N), nucléolo (Nc), pared celular (Pc), vacuolas (V) y mitocondrias (Mit)] (Arciniegas-Grijalba & Patiño-Portela, 2015).

También se ha evaluado en nuestro laboratorio el efecto antibacterial de las ZnO-NPs (Benítez-Salazar, 2021). En la figura 4(i) se muestran dos cultivos en agar sangre de una dilución de 10^{-2} de la bacteria *Escherichia coli*: sin ningún tratamiento (Figura 4i-a) y tratada con una concentración de $250 \mu\text{g/mL}$ de ZnO-NPs (Figura 4i-b). Como se observa en la Figura 4(i), en el cultivo de las bacterias tratadas con nanopartículas (Figura 4i-b) se redujo apreciablemente el número de colonias comparado con las bacterias que no tuvieron ningún tratamiento (Figura 4i-a). Este resultado puso en evidencia la capacidad de inhibición del crecimiento microbiano propiciado por las ZnO-NPs.

Los resultados obtenidos en este trabajo (Benítez-Salazar, 2021) mostraron que las ZnO-NPs sintetizadas, en concentraciones altas y medias (entre 500 y $32 \mu\text{g/mL}$), inhibieron el crecimiento de las bacterias *E. coli* entre un ~ 70 y ~ 50 %, respectivamente, con una MIC_{50} (parámetro que indica la capacidad de una sustancia de inhibir una función

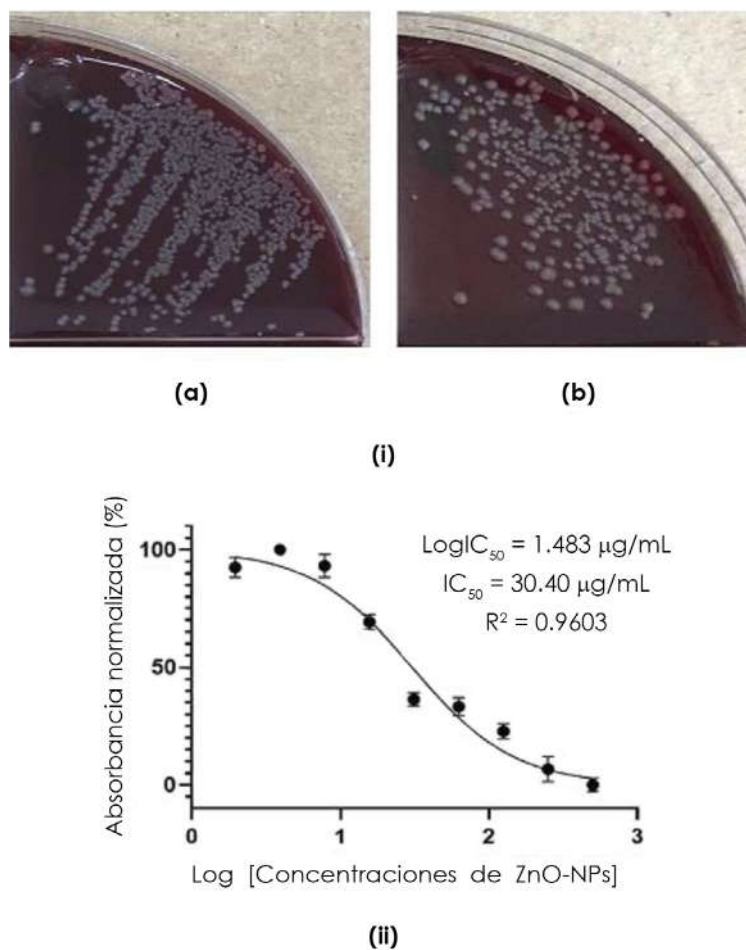


Figura 4. (i) Bacterias *E. coli* a una dilución de 10^{-2} , (a) sin tratamiento y (b) tratadas con ZnO-NPs [250 $\mu\text{g/mL}$], así como (ii) la curva utilizada para determinar el valor IC_{50} de las ZnO-NPs para inhibir el crecimiento de la bacteria *E. coli* (Benítez-Salazar, 2021).

biológica o bioquímica específica en un 50%) de 30,40 $\mu\text{g/mL}$. Para obtener el valor experimental de la MIC_{50} (Benítez-Salazar, 2021), se recurrió al programa GraphPad Prism. En la figura 4(ii) se pueden visualizar los datos normalizados y el cálculo de la IC_{50} con su respectivo coeficiente de correlación. El resultado obtenido de $\text{MIC}_{50}=30,40 \mu\text{g/mL}$ (Figura 4(ii)) es del mismo orden de magnitud al reportado por Abbasi, *et al.* (2020) al tratar *E. coli* con ZnO-NPs obtenidas por síntesis verde ($\sim 15,62 \mu\text{g/mL}$), pero menor al obtenido por Verma, *et al.* (2018) cuando sometieron la bacteria a la acción de ZnO-NPs obtenidas por molienda a alta energía ($\sim 550 \mu\text{g/mL}$ después de 15 horas de molienda). Estos resultados reiteran el efecto del método de síntesis empleado en las propiedades y funcionalidad de las nanopartículas obtenidas.

Las ZnO-NPs utilizadas por Benítez-Salazar en su trabajo de grado (2021), se obtuvieron empleando el método del complejo polimérico de Pechini (Vargas, *et al.*, 2021). Estas nanopartículas presentaron una morfología esférica, con un tamaño de partícula primaria menor a los 100 nm, las cuales experimentaron una aglomeración especial generando partículas secundarias con forma de barras o láminas, del orden de las micras. Además, en el análisis químico elemental con la microsonda EDS del microscopio de barrido, se encontró que la muestra no era estequiométrica y predominaban zonas ricas en oxígeno, lo que llevó a concluir que en estas ZnO-NPs el defecto más importante era el oxígeno intersticial (O_i).

Discusión

Para explicar y justificar estos resultados sobre el efecto antifúngico y antibacterial de las ZnO-NPs (Agredo-Trochez & Molano-Cabezas, 2020; Mosquera Sánchez, 2021; Arciniegas-Grijalba & Patiño-Portela, 2016; Patiño-Portela, *et al.*, 2021; Arciniegas-Grijalba, *et al.*, 2019; Erazo, *et al.*, 2019; Mosquera-Sánchez, *et al.*, 2020; Benítez-Salazar, 2021), puede aducirse el efecto del tamaño nanométrico de la partícula y el correspondiente alto valor de superficie específica o área superficial, lo que reflejaría el número de sitios activos en los cuales ocurre la producción de especies reactivas de oxígeno ERO (ROS), así como su morfología y composición (Yang, *et al.*, 2009). Pero lo que ha mostrado la experiencia es que, para explicar más precisa y completamente estos efectos, no es suficiente considerar los mecanismos químicos (disolución y disociación del ZnO para generar el ion cinc – Zn^{2+} y la generación de las ERO (ROS)) y físicos (abrasión, penetración de la membrana y fuerzas) (Sirelkhatim, *et al.*, 2015; Ma, *et al.*, 2013; Sawai, *et al.*, 1996), también es necesario considerar otros fenómenos fisicoquímicos que podrían ocurrir en la bio-interface entre el ZnO y la membrana celular, a los cuales se hará referencia a continuación. Indudablemente, para determinar el papel específico de cada uno de ellos y el grado de importancia que tendrían en la capacidad antifúngica y antibacterial de las nanopartículas en general, y de las ZnO-NPs en particular, es necesario estudiarlos de manera más cuidadosa y sistemática.

Procesos bio-fisicoquímicos regulados por la entropía

La entropía es un concepto importante de la termodinámica (DeHoff, 2006) que ayuda a analizar y explicar fenómenos que involucran tanto la formación estructural como las transiciones estructurales que ocurren en la naturaleza. La entropía permite cuantificar la irreversibilidad de los procesos termodinámicos y una de sus más importantes aplicaciones en los sistemas compuestos constituidos por un gran número de partes elementales, como es el caso de la nano-biointerface, pues suministra información sobre la reacomodación de sus componentes debido a la redistribución espacial de la masa y la energía que ocurriría al interior del sistema. Además, se puede utilizar para analizar la regulación de la estructura del sistema biológico involucrado, su respuesta y su función (Zhu, *et al.*, 2020). Los potenciales efectos entrópicos que podrían ocurrir en esta interface permitirían regular algunas de las propiedades fisicoquímicas en el ordenamiento lipídico, la organización estructural de las proteínas propiciada por la curvatura de la pared celular y el óptimo enlace ligando-receptor, entre otros fenómenos (Zhu, *et al.*, 2020). Cuando una nanopartícula entra en contacto con un sistema biológico, sea un hongo o una bacteria, las interacciones fisicoquímicas en la nano-biointerface podrían conducir al desarrollo de procesos biocatalíticos, a la formación de coronas de proteínas, el enrollamiento o involucramiento de la nanopartícula por parte de la pared o membrana celular y, en últimas, a una respuesta intracelular del sistema biológico que consideraría a la nanopartícula como un objeto biocompatible o no (Nel, *et al.*, 2009). Cuando una nanopartícula se acopla a un sistema biológico, se pueden generar interacciones complejas que involucran las de naturaleza entálpica y entrópica, las cuales propiciarían en el sistema transiciones de ordenamiento (Xu, *et al.*, 2017). Por ejemplo, cuando se presenta adsorción de las proteínas sobre las nanopartículas, tanto la carga superficial que estas poseen (que daría origen a una interacción entálpica), como la naturaleza hidrofóbica de su superficie (que generaría una interacción entrópica), favorecen su adsorción (Cai, *et al.*, 2017). El potencial general que se produciría en la nano-biointerface, resultado de todas las fuerzas de interacción entre las nanopartículas y la superficie de la membrana, podría ocasionar la ruptura física de esta debido al incremento de la tensión superficial sobre ella (Arakh, *et al.*, 2015).

Al utilizar la entropía para describir la interacción nanopartícula–sistema biológico, se pueden considerar tres tipos de fuente de entropía: 1) la entropía conformacional o configuracional, 2) la entropía traslacional y vibracional, y 3) la entropía de forma (Zhu, *et al.*, 2020; Zhu, *et al.*, 2018). Indudablemente, la más importante es la entropía configuracional, ya que las biomoléculas que conforman el sistema biológico presentan una

arquitectura de cadenas largas que puede conducir a diferentes configuraciones (Frederick, *et al.*, 2007). Específicamente en cuanto a las proteínas, y entre estas las proteínas desordenadas (Frederick, *et al.*, 2007; Zeno, *et al.*, 2019), constituyentes importantes de la pared celular de los hongos, por ejemplo (Figura 5), la entropía configuracional contribuiría significativamente a su energía estructural (Frederick, *et al.*, 2007), así como a la energía libre del enlace ligando-receptor (Hu, *et al.*, 2013) y a aquella relacionada con la funcionalidad de la membrana cercana a las proteínas (Zeno, *et al.*, 2019). Además, este tipo de entropía puede afectar las funciones de los lípidos y la organización espacial de las nanopartículas al interior de la membrana (Ren & Ma, 2009).

Por otro lado, existe la posibilidad de que la membrana celular, por plegamiento de su estructura, introduzca la nanopartícula en su interior (fenómeno denominado endocitosis) (Zhang, *et al.*, 2015), lo que incrementaría la complejidad de las interacciones. Estas pueden variar dependiendo de las condiciones experimentales: naturaleza del sistema biológico (célula, bacteria, hongo, virus, etc.), estados de diferenciación y la composición del medio de cultivo, entre otras. También el método de síntesis utilizado para obtener las nanopartículas es importante (Nel, *et al.*, 2009). Cuando la nanopartícula entra en la membrana celular, esta se recubre de proteínas, lo que propiciaría cambios configuracionales y la formación de la corona de proteínas sobre su superficie (Figura 5). Como ya se indicó previamente, esta corona es una entidad dinámica en la que las proteínas continuamente se adsorben sobre la superficie de la nanopartícula, luego se desorben y son reemplazadas por otras proteínas (Pulido-Reyes, *et al.*, 2017; Rahman, *et al.*, 2013; Cai, *et al.*, 2017). Indudablemente, esta cinética de asociación y disociación entre nanopartículas y proteínas, así como el continuo intercambio con las proteínas libres en el medio, determinaría la interacción de la nanopartícula con la superficie biológica receptora (Nel, *et al.*, 2009).

Para comprender mejor la interacción nanopartícula-sistema biológico es necesario conocer lo que puede suceder en la estructura del biosistema (hongo, bacteria, virus, célula, etc.). El biosistema está constituido, principalmente, por proteínas, fosfolípidos, ácidos nucleicos y polisacáridos (Bowman & Free, 2006). Para ilustrar los efectos entrópicos

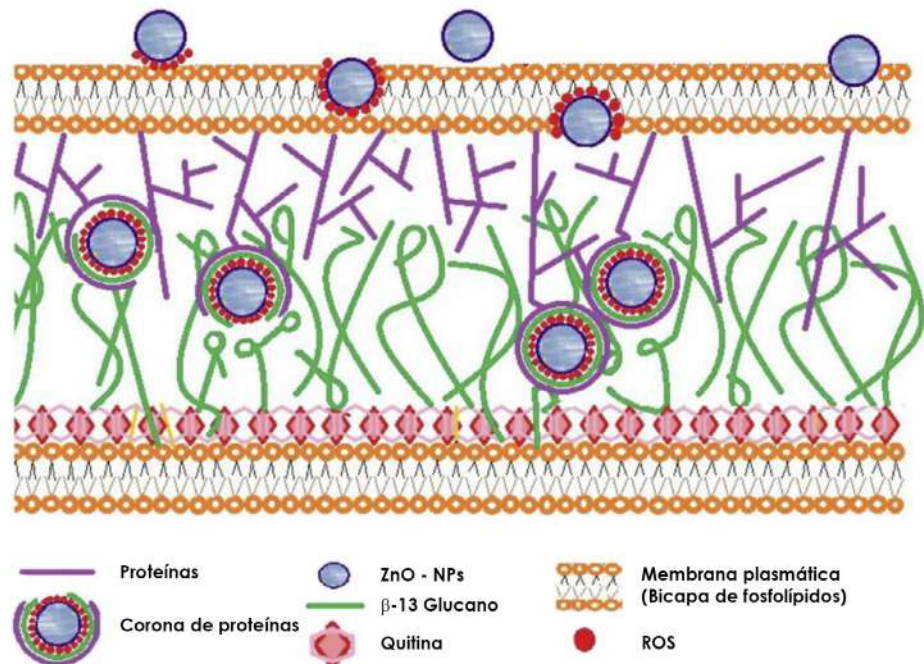


Figura 5. Esquema que ilustra la pared celular de un hongo y describe cualitativamente la interacción de las nanopartículas con las proteínas que esta contiene (adaptada de la referencia Arciniegas-Grijalba, *et al.*, 2019).

que pueden ocurrir en esta estructura ante la presencia de las nanopartículas, se considerará la organización de las proteínas sobre una membrana lipídica (**Figura 5**) (Zhu, *et al.*, 2020; Rahman, *et al.*, 2013). A diferencia de las moléculas lipídicas, las proteínas poseen unas propiedades físicas particulares: forma, rigidez, conformación y heterogeneidades superficiales, propiedades que pueden inducir efectos entrópicos importantes a través de su organización estructural y funcional. Es por ello que las interacciones de tipo entrópico pueden ocasionar el agrupamiento y la localización espacial de las proteínas en la membrana celular, lo que afectaría significativamente sus funciones en diversos procesos biofísicos (Zhu, *et al.*, 2020). Además, la estructura única de las proteínas favorece el desarrollo de efectos entrópicos. Así, las “fluctuaciones de la entropía” en la membrana lipídica regularían las funciones de las proteínas ancladas en ella debido a la alteración de su distancia de enlace y sus ángulos de anclaje, parámetros que determinan su “constante de enlace” y, por lo tanto, su funcionalidad (Zhu, *et al.*, 2020).

El ingreso de las nanopartículas en la membrana celular generaría efectos entrópicos debido al desarrollo de transiciones desorden–orden (**Figura 5**) que serían compensadas por la capacidad que tiene la membrana de ajustarse a diversas estructuras de patrones de enlace, dada su movilidad estructural para plegarse o aferrarse a la superficie de las nanopartículas, lo que origina una extensa superficie de interacción y, por ende, un aumento de la energía de interacción y favorecería la interacción de las proteínas con la superficie de las nanopartículas (Romashchenko, *et al.*, 2017); su acción provocaría respuestas de la membrana que podrían conducir a la alteración o inactivación del sistema biológico, tal como se ilustra en las **figuras 1 a 4** en hongos y bacterias.

Efecto de la naturaleza semiconductor de las ZnO-NPs en el sistema biológico

Los semiconductores inorgánicos, como es el caso del ZnO, pueden propiciar la formación de interfaces funcionales con un sistema biológico, ocasionando, por ejemplo, el ordenamiento o alineamiento de las proteínas (**Figura 5**), así como del organismo completo (Jiang & Tian, 2018). Además, los semiconductores inorgánicos son sensibles a las heterogeneidades celulares o a las interacciones biológicas transitorias, como ocurre con las nanopartículas, y puede interactuar de manera directa con la membrana celular, específicamente con las proteínas.

Hay que considerar, inicialmente, que el medio donde la nanopartícula estaría suspendida, es decir, la interface semiconductor–biofluido (Nel, *et al.*, 2009; Jiang & Tian, 2018), puede ser de naturaleza metaestable debido a la ausencia de homogeneidad y a la dinámica o ambiente transitorio que este puede presentar debido a la distribución y diferente localización espacial de las estructuras que contienen las proteínas, los lípidos y los glicosilados en la superficie de la membrana celular (Nel, *et al.*, 2009). Como se ilustra en la **figura 6a**, la interface ZnO-NPs– biofluido (electrolito) adquiere una condición de equilibrio debido al flujo de carga que se presentaría entre el sólido y la fase líquida, lo que conduciría a que el nivel ox/red de la solución, $E_{\text{ox/red}}^{\circ}$, se alinee con el nivel de Fermi del semiconductor, E_F , en este caso el ZnO (semiconductor de tipo n) (Gerisher, 1990). Para alcanzar esta condición de equilibrio, el E_F del semiconductor debe igualarse a la cantidad $-e\mu_e^s$, donde “ μ_e^s ” es el potencial electroquímico del electrón en la solución y “e” la carga absoluta del electrón (Lichterman, *et al.*, 2015). Este proceso espontáneo daría como resultado el curvado de las bandas de energía en la superficie del semiconductor (**Figura 6a**) (Zhang & Yates, 2012). Específicamente para el ZnO, en el cual predominan los electrones (semiconductor de tipo n), la transferencia de carga que se generaría ocasionaría que el interior del sólido quedara con una alta concentración de electrones (carga negativa) y en su superficie predominarían los “huecos” (carga positiva), conformándose una región de carga espacial (Zhang & Yates, 2012) y la correspondiente separación de carga. Además, considerando la “contra carga” que se localizaría sobre el biofluido (electrolito), se generaría un campo eléctrico que estaría localizado muy cerca de la membrana plasmática o celular (**Figura 6a**), dentro de la doble capa de Helmholtz (Jiang & Tian, 2018). Asimismo, los estados superficiales

del semiconductor, generados por la terminación abrupta de la estructura cristalina del sólido o por las impurezas, es decir, los defectos o especies adsorbidas por su superficie, podrían intercambiar carga con las bandas de valencia y conducción del semiconductor, así como con las especies redox que existen en el fluido biológico (Zhang & Yates, 2012), favoreciendo la formación del campo eléctrico cercano a la membrana (Jiang & Tian, 2018).

Por otro lado, cuando las nanopartículas ingresan en la membrana celular, se puede presentar una interacción eléctrica entre ellas y las proteínas (grandes biomoléculas), algunas de las cuales estarían adsorbidas sobre su superficie conformando la corona de proteínas (Figura 5). Si la nanopartícula es de ZnO, esta interacción propiciaría un intercambio de electrones tal que las bandas de energía se curvarían hacia arriba, como se indica en la figura 6b. Zhang & Yates (2012) indican en su trabajo que durante la adsorción de una biomolécula de naturaleza aceptora "A" (Figura 6b) en la superficie de una nanopartícula semiconductor de tipo n, cuando la biomolécula se acerca a la superficie del sólido, alguno de sus orbitales moleculares no llenos interactuaría con el semiconductor, nivelándose con el nivel de Fermi, E_F , de la nanopartícula. Esta interacción ocasionaría el ensanchamiento del orbital molecular para aceptar los electrones que se transferirían desde el semiconductor, y propiciaría la generación de un campo eléctrico acompañado del curvado hacia arriba de las bandas de energía (Zhang & Yates, 2012) cerca de la superficie del semiconductor, tal como se muestra en la figura 6b. Además de propiciar la generación de un campo eléctrico localizado, este proceso afectaría el transporte de los portadores de carga, huecos y electrones, a través de la nano-biointerfase de la nanopartícula y la biomolécula (proteína), favoreciendo la acumulación de electrones dentro de la nanopartícula y de huecos en su superficie. Por lo tanto, la posición relativa del nivel de Fermi en el semiconductor frente a los potenciales redox de las especies químicas o los orbitales moleculares no llenos de las biomoléculas que conforman el sistema biológico, determinaría en gran parte las reacciones electroquímicas que ocurrirían en la superficie del sólido semiconductor. Es por ello que las reacciones de tipo Faraday y las de acoplamiento pueden modificar el potencial electroquímico local y, por lo tanto, el

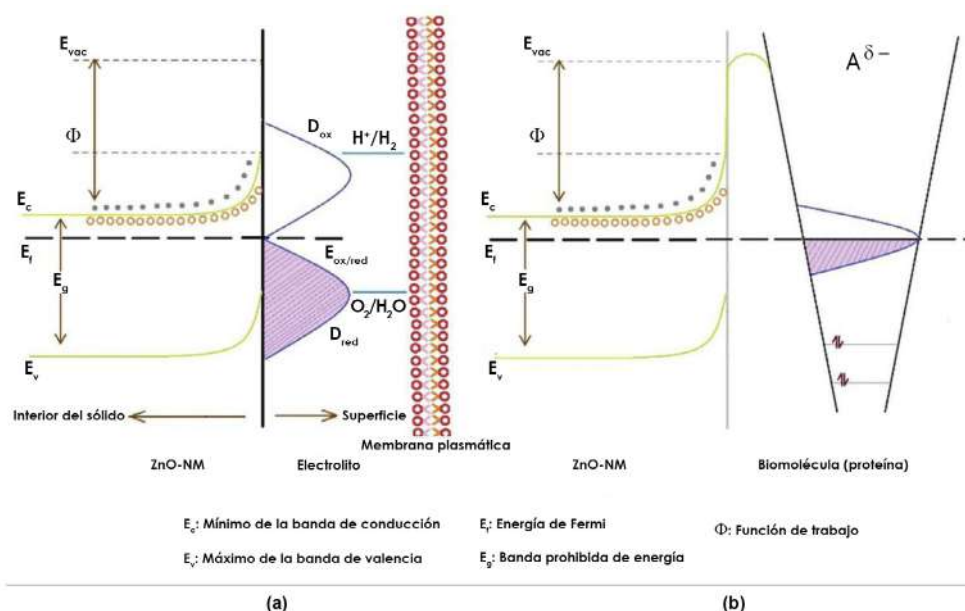
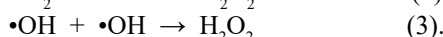
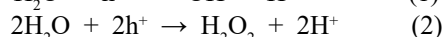


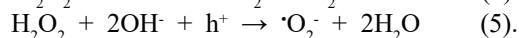
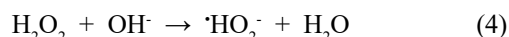
Figura 6. Esquema que ilustra las interacciones eléctricas propuestas entre las ZnO-NPs y la membrana celular (a), así como con las biomoléculas (proteínas) (b) (adaptada de la referencia Patiño-Portela, *et al.*, 2021).

voltaje de la membrana celular (diferencia entre los potenciales intracelular y extracelular), modificando el ambiente químico local y afectando la fisiología celular (Jiang y Tian, 2018), lo que contribuiría a la citotoxicidad del semiconductor.

Como resultado de estas interacciones de naturaleza eléctrica entre la nanopartícula y el elemento biológico (Figura 6), se generarían campos eléctricos localizados sobre la membrana celular y las proteínas, lo que las afectaría fuertemente, tal como lo propusieron De Lucas-Gil, *et al.* (2017) y De Lucas-Gil, *et al.* (2018). Además, la superficie del nano semiconductor contendría una alta concentración de “huecos” que favorecería el desarrollo de reacciones generadoras de ERO (ROS), como las siguientes (Nosaka & Nosaka, 2017; Jedsukontorn, *et al.*, 2018):



A través de estas reacciones se produciría peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) por la oxidación de las moléculas de agua presentes en la nano-biointerface. Además, si en el sistema existen grupos hidroxilo (OH), estos podrían reaccionar con el peróxido para generar otras ERO (ROS), como el superoxígeno ($\cdot\text{O}_2^-$), a través de las siguientes reacciones (Nosaka & Nosaka, 2017; Jedsukontorn, *et al.*, 2018):



El desarrollo de las anteriores reacciones (ecuaciones 1 a 5) garantizaría la presencia de especies reactivas de oxígeno en las interfaces entre nanopartícula y membrana y nanopartícula y biomolécula (proteína), las cuales podrían propiciar estrés oxidativo en el sistema biológico. Este efecto, así como la aplicación de campos eléctricos localizados sobre la membrana y las proteínas, generado por la carga eléctrica existente en la superficie de las nanopartículas semiconductoras, podrían ocasionar daños irreparables en la membrana celular de los hongos y de las bacterias, lo que respaldaría los resultados que se observan en las figuras 1 a 4.

Efecto de los defectos puntuales presentes en las ZnO-NPs

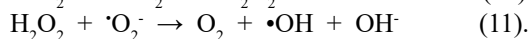
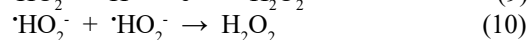
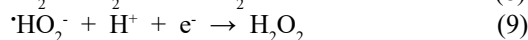
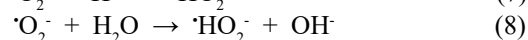
Ya desde los primeros trabajos que evaluaron el potencial tóxico de los materiales de tamaño nanométrico, se consideró que las discontinuidades de los planos cristalinos ocasionadas por la reducción del tamaño de la partícula, que producían un aumento en la cantidad de defectos estructurales (desorden en la estructura geométrica), así como perturbación en la bien estructurada configuración electrónica del material (desorden en la estructura electrónica), favorecían los efectos tóxicos de las nanopartículas en los sistemas biológicos (Nel, *et al.*, 2006).

La presencia de defectos en los cristales es un fenómeno universal y muy común, y más cuando se trata de nanocristales o nanopartículas (Li, *et al.*, 2017). Estos defectos introducen en los sólidos sitios no saturados coordinativamente que son altamente activos y que, además, espacialmente suministran canales para la transferencia de energía y de electrones (Zhang, *et al.*, 2019). Por mucho tiempo los defectos se consideraron indeseables en los materiales y por eso se evitaba su presencia. Pero, estudiando más en profundidad los procesos catalíticos mediante técnicas más avanzadas de análisis, se encontraron “méritos maravillosos” de los defectos para la catálisis (Yan, *et al.*, 2017). Por ejemplo, la formación de vacancias de oxígeno (remoción de un ion de oxígeno de la red) favorece la generación de iones metálicos coordinativamente no saturados, con acumulación de electrones en exceso (Wendt, *et al.*, 2008). Estos sitios metálicos coordinativamente no saturados, ricos en electrones o con menor estado de valencia, propiciarían lugares para la quimisorción molecular ofreciendo sus orbitales “d”, y servirían como puente de transferencia de electrones entre el semiconductor y la molécula (por ejemplo, O_2 - N_2 o CO_2) (Zhang, *et al.*, 2019).

Para las ZnO-NPs específicamente, **Verma, et al.** (2018) señalaron que la actividad antibacterial de estas nanopartículas estaría inducida por los defectos intrínsecos y propusieron un mecanismo para explicar esta funcionalidad, considerando un modelo núcleo-revestimiento para la disposición de estos defectos (**Parashar, et al.**, 2012). Los resultados del ensayo de resonancia paramagnética electrónica (*electronic paramagnetic resonance*, RPE), específicamente los *EPR x-band* obtenidos por **Verma, et al.** (2018), mostraron dos señales: una de alrededor de $g \sim 1,96$ y otra alrededor de $g \sim 2,00$, y las asignaron a dos centros diferentes de defectos ubicados en el interior del nanocrystal (*bulk* o núcleo), donde predominarían los defectos cargados negativamente, principalmente vacancias de oxígeno mono-ionizadas [V_o^\bullet] (**Wang, et al.**, 2009), y en su superficie (*Shell* o recubrimiento), donde predominarían los defectos cargados positivamente, principalmente vacancias de cinc mono-ionizadas [V_{Zn}^\bullet] (**Parashar, et al.**, 2012). Estos defectos intrínsecos generarían las ERO (ROS) que ocasionarían los cambios en el potencial de la membrana y las correspondientes consecuencias en el sistema biológico (**Verma, et al.**, 2018).

Estos resultados indican que la presencia de vacancias de oxígeno en el nanocrystal es muy importante debido a la acumulación del exceso de electrones, ya que estas podrían mediar en la producción de las ERO (ROS), lo que reitera el importante papel que pueden tener estos defectos en la determinación de las propiedades fisicoquímicas de los óxidos metálicos (**Gunkel, et al.**, 2020), específicamente en su capacidad antibacterial (**Xu, et al.**, 2013).

Tal como lo indican **Prasanna & Vijayaraghavan** (2015) para justificar la capacidad antibacterial de las ZnO-NPs, el oxígeno presente en el medio ambiente podría reaccionar con los electrones que se encuentran atrapados en los defectos superficiales del ZnO, formando radicales superoxígeno (reacción 6), los cuales podrían propiciar la formación de radicales hidroperoxil, en presencia de protones o agua (reacciones 7 y 8, respectivamente). A través de diversas reacciones (reacciones 9 y 10), estos radicales hidropiroxil llevarían a la formación de peróxido de hidrógeno, H_2O_2 , que, a su vez, podría reaccionar con el radical superoxígeno para formar iones y radicales hidroxil (reacción 11). Las reacciones mencionadas, se pueden expresar de la siguiente manera:



Estas generarían, principalmente, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radicales hidroxilo ($\cdot OH$) y superoxígeno ($\cdot O_2^-$) mediante la oxidación del agua presente en el entorno del ZnO. Ya que los radicales hidroxilo ($\cdot OH$) y superoxígeno ($\cdot O_2^-$) están cargados negativamente, no podrían penetrar la membrana celular, por lo que permanecerían en contacto directo con la superficie externa de la bicapa (**Xie, et al.**, 2011), y la especie que penetraría la membrana sería el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), principal responsable, por lo tanto, de la muerte de la bacteria (**Padmavathy & Vijayaraghavan**, 2008; **Sawai, et al.**, 1996). Por otro lado, como lo indican **Winkler, et al.** (2021), la anisotropía del contenido de oxígeno superficial que presentan frecuentemente las ZnO-NPs sintetizadas (**Erazo, et al.**, 2019; **Agredo-Trochez & Molano-Cabezas**, 2020; **Benítez-Salazar**, 2021), podría afectar las reacciones superficiales y favorecer el desarrollo de las reacciones indicadas (reacciones 6 a 11).

Conclusiones

En los estudios realizados en nuestro laboratorio se ha podido evidenciar el efecto antifúngico de nanopartículas de ZnO sintetizadas por diferentes rutas químicas, específicamente en cepas de *Omphalia* sp., *Colletotrichum* sp. y *Phoma* sp., así como su efecto antibacterial en la cepa de *E. coli*. Esta acción de las ZnO-NPs en los diferentes

patógenos se explicaría a partir de varios fenómenos fisicoquímicos que podrían ocurrir en la nano-biointerface entre el semiconductor y la membrana o pared celular. Los modelos cualitativos propuestos para esclarecer el mecanismo de acción de las ZnO-NPs en los patógenos consideran que la generación de especies reactivas de oxígeno ERO (ROS) es el principal proceso propiciador de la inhibición de su crecimiento y la afectación de su ultraestructura. Además, los defectos presentes en las nanopartículas ayudarían a mediar la generación de dichas ERO (ROS). Asimismo, el potencial que se generaría en la nano-biointerface como resultado de todas las fuerzas de interacción entre las nanopartículas y la superficie de la membrana celular, podría propiciar la ruptura física de la bicapa por el incremento de la tensión superficial sobre esta. Por otro lado, las interacciones de naturaleza entrópica ocasionarían el agrupamiento y la localización espacial de las biomoléculas en la membrana celular, propiciando transiciones desorden - orden, fenómenos que afectarían las funciones de las biomoléculas y provocarían respuestas de la membrana que podrían conducir a la inactivación del sistema biológico. Además, los campos eléctricos localizados que se generarían en la nano-biointerface debido a la naturaleza semiconductor de las ZnO-NPs, modificarían el potencial electroquímico local y, por lo tanto, el voltaje de la membrana, alterando el ambiente químico local y afectando la membrana y las biomoléculas, así como la fisiología celular. En consecuencia, estos campos eléctricos localizados contribuirían a la citotoxicidad del semiconductor porque podrían generar daños irreparables.

Agradecimientos

El autor agradece a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca (proyectos ID 4241 - ID 4668 e ID 5129) y a MinCiencias (código 110380762914 - CT 781-2019 y código 110365842673 Colciencias), por la financiación de los estudios que han permitido obtener los resultados que se describen en este trabajo.

Conflicto de intereses

El autor certifica que no tiene ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Abbasi, B. A., Iqbal, J., Ahmad, R., Zia, L., Kanwal, S., Mahmood, T., Wang, C., Chen, J. T. (2020). Bioactivities of *Geranium wallichianum* Leaf Extracts Conjugated with Zinc Oxide Nanoparticles. *Biomolecules*. **10** (1): 38.
- Agredo-Trochez, Y. A. & Molano-Cabezas, A. C. (2020). Obtención de nanopartículas de óxido de magnesio (MgO) y óxido de cobre (CuO) por una ruta química y estudio de su actividad fungicida sobre el hongo *Omphalia* sp. Trabajo de Grado, programa Ingeniería Física – Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Alghuthaymi, M. A., Rajkuberan, C., Rajiv, P., Kalia, A., Bhardwaj, K., Bhardwaj, P., Abd-El salam, K. A., Valis, M., Kuca, K. (2021). Nanohybrid antifungals for control of plant diseases: current status and future perspectives, *J. Fungi*. **7**: 48.
- Arakh, M., Saleem, M., Mallick, B. C., Jha, S. (2015). The effects of interfacial potential on antimicrobial propensity of ZnO nanoparticle. *Sci. Rep.* **5**: 9578.
- Arciniegas-Grijalba, P. A. & Patiño-Portela, M. C. (2015). Evaluación *in-vitro* de la capacidad antifúngica de nanopartículas de ZnO sobre cepas de *Phoma* sp. y *Erythricium salmonicolor*, agentes causales de enfermedades en el café (*Coffea arabica* L.). Trabajo de Grado, programa Biología – Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Arciniegas-Grijalba, P. A., Patiño-Portela, M. C., Mosquera-Sánchez, L. P., Guerrero-Vargas, J. A., Rodríguez-Páez, J. E. (2017). ZnO nanoparticles (ZnO-NPs) and their antifungal activity against coffee fungus *Erythricium salmonicolor*, *Appl. Nanosci.* **7**: 225-241.
- Arciniegas-Grijalba, P. A., Patiño-Portela, M. C., Mosquera-Sánchez, L. P., Guerra Sierra, B. E., Muñoz-Florez, J. E., Erazo-Castillo, L. A., Rodríguez-Páez, J. E. (2019). ZnO-based nanofungicides: Synthesis, characterization and their effect on the coffee fungi *Mycena citricolor* and *Colletotrichum* sp. *Mater. Sci. Eng. C*. **98**: 808-825.

- Benítez-Salazar, M. I.** (2021). Obtención de nanopartículas de óxido de cinc por síntesis química y verde, y determinación de su capacidad antibacterial. Trabajo de Grado, programa Ingeniería Física – Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Bowman, S.M. & Free, S.J.** (2006). The structure and synthesis of the fungal cell wal. *Bioessays*. **28** (8): 799-808.
- Brian, S. W., Mudun Kotuwa, I. A., Rupasinghe, T., Grassian, V. H.** (2011). Aggregation and dissolution of 4 nm ZnO nanoparticles in aqueous environments: Influence of pH, ionic strength, size and adsorption of humic acid. *Langmuir*. **27**: 6059-6068.
- Cai, K., Wang, A. Z., Yin, L., Cheng, J.** (2017). Bio-nano interface: The impact of biological environment on nanomaterials and their delivery properties. *Journal of Controlled Release*. **263**: 211-222.
- Ciofani, G.** (Ed) (2018). Smart nanoparticles for biomedicine. Cambridge, United States: Elsevier Inc. pp 171-182.
- De, M., Ghosh, P. S., Rotello, V. M.** (2008). Applications of Nanoparticles in Biology. *Adv. Mater*. **20**: 4225-4241.
- De Lucas-Gil, E., Leret, P., Monte-Serrano, M., Reinoso, J. J., Enríquez, E., Del Campo, A., Cañete, M., Menéndez-Fernández, J. F., Rubio-Marcos, F.** (2018). ZnO nanoporous spheres with broad-spectrum antimicrobial activity by physico chemical interactions. *ACS Appl. Nano Mater*. **1**: 3214-3225.
- De Lucas-Gil, E., Reinoso, J. J., Neuhaus, K., Vera-Londoño, L., Martín-González, M., Fernández, J. F., Rubio-Marcos, F.** (2017). Exploring new mechanisms for effective antimicrobial materials: Electric contact – killing based on multiple Schottky barriers. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. **9** (31): 26219-26225.
- DeHoff, R.** (2006). Thermodynamics in materials science. Second edition. Boca Ratón, USA: CRC Taylor & Francis Group, LLC. pp 35-48.
- Demir, E.** (2020). A review on nanotoxicity and nanogenotoxicity of different shapes of nanomaterials. *J Appl Toxicol*. **41**: 118-147.
- Erazo, A., Mosquera, S. A., Rodríguez-Páez, J. E.** (2019). Synthesis of ZnO nanoparticles with different morphology: Study of their antifungal effect on strains of *Aspergillus niger* and *Botrytis cinerea*. *Materials Chemistry and Physics*. **234**: 172-184.
- Faisal, M., Saquib, Q., Alatar, A. A., Al-Khedhairi, A. A.** (Eds.) (2018). Phytotoxicity of nanoparticles. Cham, Switzerland: Springer Nature. pp 1-103.
- Frederick, K. K., Marlow, M. S., Velentine, K. G., Wand, A. J.** (2007). Conformational entropy in molecular recognition by proteins. *Nature*. **448**: 325-329.
- Gerisher, H.** (1990). The impact of semiconductors on the concepts of electrochemistry. *Electrochem. Acta*. **35**: 1677-1699.
- Goppert, T. M. & Muller, R. H.** (2005). Adsorption kinetics of plasma proteins on solid lipid nanoparticles for drug targeting. *Int. J. Pharm*. **302**: 172-186.
- Gudkov, S. V., Burmistrov, D. E., Serov, D. A., Rebezov, M. B., Semenova, A. A., Lisitsyn, A. B.** (2021). A mini review of antibacterial properties of ZnO nanoparticles. *Front. Phys*. **9**: 641481.
- Gunkel, F., Christensen, D. V., Chen, Y. Z., Pryds, N.** (2020). Oxygen vacancies: The (in)visible friend of oxide electronics. *Appl. Phys Lett*. **116**: 120505.
- Hu, J., Lipowsky, R., Weigl, T. R.** (2013). Binding constants of membrane-anchored receptors and ligands depend strongly on the nanoscale roughness of membranes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **110**: 15283-15288.
- Jaaniso, R., Tan, O. K.** (Eds.) (2013). Semiconductor gas sensors. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing. pp. 159-219.
- Jedsukontorn, T., Ueno, T., Saito, N., Hunsom, M.** (2018). Mechanistic aspect based on the role of reactive oxidizing species (ROS) in macroscopic level on the glycerol photooxidation over defected and defected-free TiO₂. *J. Photochem. Photobiol. A Chem*. **367**: 270-281.
- Jiang, Y. & Tian, B.** (2018). Inorganic semiconductor biointerfaces. *Nature Rev/Materials*. **3**: 473-490.
- Li, G. Blake, G. R., Palstra, T. T. M.** (2017). Vacancies in functional materials for clean energy storage and harvesting: the perfect imperfection. *Chem. Soc. Rev*. **46**: 1693-1706.
- Lichterman, M. F., Hu, S., Richter, M. H., Crumlin, E. J., Axnanda, S., Lewis, N. S. Liu, Z., Lewerenz, H. J.** (2015). Direct observation of the energetics at a semiconductor/liquid junction by operando x-ray photoelectron spectroscopy. *Energy Environ. Sci*. **8**: 2409-2416.

- Liu, Y., Zhao, Y., Sun, B., Chen, C. (2013). Understanding the toxicity of carbon nanotubes. *ACC Chem. Res.* **46**: 702-713.
- López-Valdez, F. & Fernández-Luqueño, F. (Eds.) (2018). *Agricultural nanobiotechnology*. Cham, Switzerland: Springer Nature. pp. 183-212.
- Lyklema, J. (1993). *Fundamentals of interface and colloid science: Fundamentals*. Volume 1. Second Edition. San Diego, USA: Academic Press Limited. pp. 5.1-5.114.
- Ma, H., Williams, P. L., Diamond, S. A. (2013). Ecotoxicity of manufactured ZnO nanoparticles - A review. *Environmental Pollution*. **172**: 76-85.
- Medina, J., Bolaños H., Mosquera-Sanchez, L. P., Rodríguez-Páez, J. E. (2018). Controlled synthesis of ZnO nanoparticles and evaluation of their toxicity in *Mus musculus* mice. *International Nano Letters*. **8**: 165-179.
- Min, Y., Akhulut, M., Kristiansen, K., Golan, Y., Israelachvili, J. (2008). The role of interparticle and external forces in nanoparticle assembly. *Nature Mater.* **7**: 527-538.
- Mosquera-Sánchez, L. P. (2021). Caracterización morfológica genética y patogénica del hongo *Colletotrichum* spp en café y evaluación del efecto de nanopartículas de ZnO sobre el patógeno. Tesis Doctoral en desarrollo del Programa de Doctorado en Ciencias Agrarias – Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Mosquera-Sánchez, L.P., Arciniegas-Grijalba, P.A., Patiño-Portela, M. C., Guerra-Sierra, B. E., Muñoz-Florez, J. E., Rodríguez-Páez, J. E. (2020). Antifungal effect of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) on *Colletotrichum* sp., causal agent of anthracnose in coffee crops. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. **25**: 101579.
- Mu, Q., Jiang, G., Chen, L., Zhou, H., Fourches, D., Tropsha, A., Yan, B. (2014). Chemical basis of interactions between engineered nanoparticles and biological systems. *Chem. Rev.* **114**: 7740-7781.
- Nel, A.E., Mädler, L., Velegel, D., Xia, T., Hork, E. M. V., Somasundaran, P., Klaessig, F., Castranova, V., Thompson, M. (2009). Understanding biophysicochemical interaction at the nano-biointerface. *Nature Mater.* **8**: 543-557.
- Nel, A., Xia, T., Mädler, L., Li, N. (2006). Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science*. **311**: 622-627.
- Nosaka, Y. & Nosaka, A. Y. (2017). Generation and detection of reactive oxygen species in photocatalysis. *Chem. Rev.* **117**(17): 11302-11336.
- Nozik, A. J. & Memming, R. (1996). Physical chemistry of semiconductor – liquid interfaces. *J. Phys. Chem.* **100**: 13061-13078.
- Ohshima, H. (Ed). (2012). *Electrical phenomena at interfaces and biointerfaces*. Hoboken - New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc.
- Padmavathy, N. & Vijayaraghavan, R. (2008). Enhanced bioactivity of ZnO nanoparticles - an antimicrobial study. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **9**: 035004.
- Parashar, S. K. S., Murty, B. S., Repp, S., Weber, S., Erdem, E. (2012) Investigation of intrinsic defects in core-shell structured ZnO nanocrystals. *J. Appl. Phys.* **111** (11): 113712.
- Patiño-Portela, M. C., Arciniegas-Grijalba, P. A., Mosquera-Sánchez, L. P., Guerra Sierra, B. E., Muñoz-Florez, J. E., Erazo-Castillo, L. A., Rodríguez-Páez, J. E. (2021). Effect of method of synthesis on antifungal ability of ZnO nanoparticles: Chemical route vs green route. *Advances in Nano Research*. **10**: 191-210.
- Prasanna, V. L. & Vijayaraghavan, R. (2015). Insight into the mechanism of antibacterial activity of ZnO – surface defects mediated reactive oxygen species even in dark. *Langmuir*. **31** (33): 9155-9162.
- Pulido-Reyes, G., Leganes, F., Fernández-Piñas, F., Rosal, R. (2017). Bio-nano interface and environment: A critical review. *Environ. Toxicol. Chem.* **36**: 3181-3193.
- Pulido-Reyes, G., Rodea-Palomares, I., Das, S. Sakthivel, T. S. Leganes, F., Rosal, R. Seal, S., Fernández-Piñares, F. (2015). Untangling the biological effects of cerium oxide nanoparticles: The role of surface valence states. *Sci. Rep.* **5**: 15613.
- Rahman, M., Laurent, S., Tawil, N., Yahia, L., Mahmoudi, M. (2013). Protein – nanoparticle interactions: The bio-nano interface. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag. pp. 1-44.
- Ren, C. L., Ma, Y. Q. (2009). Structure and organization of nanosized-inclusion-containing bilayer membranes. *Phys. Rev. E*. **80**: 011910.
- Rhoderick, E. H. (1980). *Metal semiconductor contacts*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press. pp. 18-76.
- Rodríguez-Páez, J. E. (2013). Síntesis de óxidos de interés industrial. Popayán, Colombia: SAVAMA impresiones. pp. 88-138.

- Rodríguez-Páez, M., Ochoa-Muñoz, Y., Rodríguez-Páez, J. E.** (2019). Efficient removal of glyphosate-based herbicide from water using ZnO nanoparticles (ZnO-NPs). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. **22**: 101434.
- Romashchenko, A. V., Kan, T. W., Petrovski, D. V., Glinskaya, L. A., Moshkin, M. P., Moshkin, Y. M.** (2017). Nanoparticles associate with intrinsically disordered RNA-binding proteins. *ACS Nano*. **11**: 1328-1339.
- Salata, O. V.** (2004). Applications of nanoparticles in biology and medicine. *Journal of Nanobiotechnology*. **2**: 3.
- Sawai, J., Kawada, E., Kanou, F., Igarashi, H., Hashimoto, A., Kokugan, T., Shimizu, M.** (1996). Detection of active oxygen generated from ceramic powders having antibacterial activity. *J. Chem. Eng. Jpn.* **29** (4): 627-633.
- Singh, S.** (2019). Zinc oxide nanoparticles impacts: cytotoxicity, genotoxicity, developmental toxicity, and neurotoxicity. *Toxicology Mechanisms and Methods*. **29**: 300-311.
- Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., Hasan, H., Mohamad, D.** (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism, *Nano-Micro Lett.* **7** (3): 219-242.
- Shapiro, S., Caspi, E.** (1998). The steric course of enzymic hydroxylation at primary carbon atoms. *Tetrahedron*. **54**: 5005-5040.
- Suib, S. L.** (Ed). (2013). *New and future developments in catalysis: Solar photocatalysis*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B. V. pp 395-464.
- Sze, S. M. & Ng, K. K.** (2007). *Physics semiconductor devices*. Hoboken - New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc. pp. 134-243.
- Tian, X., Chong, Y., Ge, C.** (2020). Understanding the nano-bio interactions and the corresponding biological responses. *Frontiers in Chemistry*. **8**: article 446.
- Vargas, M. A., Rivera, E. M., Diosa, J. E., Mosquera, E. E., Rodríguez-Páez, J. E.** (2021). Nanoparticles of ZnO and Mg-doped ZnO: Synthesis, characterization and efficient removal of methy orange (MO) from aqueous solution. *Ceramics International*. **47**: 15668-15681.
- Verma, A. & Stellaci, F.** (2010). Effect of surface properties on nanoparticle – cell interactions. *Small*. **10**: 12-21.
- Verma, S. K., Jha, E., Kumar Panda, P., Das, J. K., Thirumurugan, A., Suar, M., Parashar, S. K. S.** (2018). Molecular aspects of core-shell intrinsic defect induced enhanced antibacterial activity of ZnO nanocrystals. *Nanomedicine (Lond.)* **13** (1): 43-68.
- Wang, B., Min, J., Zhao, Y., Sang, W., Wang, C.** (2009). The grain boundary related p-type conductivity in ZnO films prepared by ultrasonic spray pyrolysis. *Appl. Phys. Lett.* **94**: 192101-192103.
- Wendt, S., Sprunger, P. T. Lira, E., Madsen, G. K. H., Li, Z., Hansen, J. O., Matthiesen, J., Blekinge-Rasmussen, A., Laegsgaard, E., Hammer, B., Besenbacher, F.** (2008). The role of interstitial sites in the Ti3d defect state in the band of titania. *Science*. **320**: 1755-1759.
- Winkler, P., Zeininger, J., Suchorski, Y., Stöger-Pollach, M., Zeller, P., Amati, M., Gregoratti, L., Rupprechter, G.** (2021). How the anisotropy of surface oxide formation influences the transient activity of a surface reaction. *Nat. Commun.* **12**: 69.
- Xie, Y., He, Y., Irwin, P. L., Jin, T., Shi, X.** (2011). Antibacterial activity and mechanism of action of zinc oxide nanoparticles against *Campylobacter jejuni*. *Appl. Environ. Microbiol.* **77** (7): 2325-2331.
- Xu, G., Huang, Z., Chen, P., Cui, T., Zhang, X., Miao, B., Yan, L. T.** (2017). Optimal reactivity and improved self-healing capability of structurally dynamic polymers grafted on janus nanoparticles governed by chain stiffness and spatial organization. *Small*. **13** (13): 1603155.
- Xu, X., Chen, D., Yi, Z., Jiang, M., Wang, L. Zhou, Z., Fan, X., Wang, Y., Hui, D.** (2013). Antimicrobial mechanism based on H₂O₂ generation at oxygen vacancies in ZnO crystals. *Langmuir*. **29** (18): 5573-5580.
- Yan, B., Zhou, H., Gardea-Torresdey, J. L.** (Eds) (2017). *Bioactivity of engineered nanoparticles*. Gatewayeast – Singapore, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. pp. 259-319.
- Yan, D., Li, Y. Hoo, J., Chen, R., Dai, L., Wang, S.** (2017). Defect chemistry of nonprecious-metal electrocatalysis for oxygen reactions. *Adv. Mater.* **29**: 1606459.
- Yang, H., Liu, C., Yang, D., Zhang, H., Xi, Z.** (2009). Comparative study cytotoxicity, oxidite stress and genotoxicity induced by four typical nanomaterials: The role of particle size, shape and composition. *J. Appl. Toxicol.* **25** (1): 69-78.
- Zeno, W. F., Thettle, A. S., Wang, L., Snead, W. T., Lafer, M. E., Stachowiak, J. C.** (2019). Molecular mechanisms of membrane curvature sensing by a disorderd protein. *J. Am. Chem. Soc.* **141**: 10361-10371.

-
- Zhang, N., Gao, C., Xiong, Y.** (2019). Defect engineering: A versatile tool for tuning the activation of key molecules in photocatalytic reactions. *Journal of Energy Chemistry*. **37**: 43-57.
- Zhang, N., Li, X., Ye, H., Chen, S., Ju, H., Liu, D., Lin, Y., Ye, W., Wang, C., Xu, Q., Zhu, J., Song, L., Jiang, J., Xiong, Y.** (2016). Oxide defect engineering enables to couple solar energy into oxygen activation. *J. Am. Chem. Soc.* **138**: 8928-8935.
- Zhang, S., Gao, H., Bao, G.** (2015). Physical principles of nanoparticle cellular endocytosis. *ACS Nano*. **9** (9): 8655-8671.
- Zhang, Z. & Yates, J. T.** (2012). Band bending in semiconductor: Chemical and physical consequences at surfaces and interfaces. *Chem. Rev.* **112**: 5520-5551.
- Zhao, Y., Zhang, Z., Feng, W.** (Eds) (2016). *Toxicology of nanomaterials*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. pp. 69-88.
- Zhu, G., Huang, Z., Xu, Z., Yan, L. T.** (2018). Tailoring interfacial nanoparticle organization through entropy. *Acc. Chem. Res.* **51**: 900-909.
- Zhu, G., Xu, Z., Yan, L. T.** (2020). Entropy at bio-nano interfaces. *Nano Lett.* **20**: 5616-5624.

Original article

Activity patterns of medium and large mammals in two savanna ecosystems in the Colombian Llanos

Patrones de actividad de mamíferos medianos y grandes en dos ecosistemas de sabana de los Llanos colombianos

✉ Dennis Castillo-Figueroa*, ✉ Daniela Martínez-Medina, ✉ Miguel E. Rodríguez-Posada

Grupo de Investigaciones Territoriales para el Uso y Conservación de la Biodiversidad, Fundación Reserva Natural La Palmita, Bogotá, Colombia

Abstract

Neotropical savannas have undergone continuous processes of landscape transformation (e.g., agriculture, oil, gas, and hydrocarbon industry) and very little is known about the ecology and natural history of key biological groups such as terrestrial mammals while the information on behavioral aspects of mammalian species in these ecosystems is very scarce. Here, we aimed to describe the activity patterns of medium and large mammals in two savanna ecosystems in the Colombian Llanos. A set of 60 camera traps was installed in the two ecosystems for 35 days (2100 camera days). We described the activity patterns of nine predominantly nocturnal species. We found no difference in circadian distributions of mammals between ecosystems. *Cuniculus paca* Linnaeus 1758 and *Dasyprocta fuliginosa* Wagler 1832 showed patterns of exclusion probably due to competition whereas other species like *Tamandua tetradactyla* Linnaeus 1758 and *Myrmecophaga tridactyla* Linnaeus 1758 displayed similar activity patterns. We highlight the importance of savannas for the conservation of these species and discuss the relevance of studies on activity patterns for mammal ecology and conservation in Neotropical savannas.

Keywords: Activity periods; Behavioural strategies; Camera traps; Neotropical mammals; Niche overlap; Orinoco basin; Savanna regions.

Resumen

A pesar de que las sabanas neotropicales han sido sometidas a procesos continuos de transformación del paisaje (por ejemplo, la agricultura, la industria de petróleo, gas e hidrocarburos), muy poco se sabe sobre la ecología e historia natural de grupos biológicos importantes como los mamíferos terrestres, y la información asociada con los aspectos comportamentales de las especies de mamíferos que habitan estos ecosistemas es especialmente escasa. El objetivo del estudio fue describir los patrones de actividad de mamíferos medianos y grandes en dos ecosistemas de sabana de los Llanos colombianos. Se instalaron 60 cámaras trampa en los dos ecosistemas durante 35 días (2100 días-cámara). Se describieron los patrones de actividad de nueve especies predominantemente nocturnas. No se encontraron diferencias en las distribuciones circadianas de mamíferos entre ecosistemas. *Cuniculus paca* Linnaeus 1758 y *Dasyprocta fuliginosa* Wagler 1832 mostraron patrones de exclusión explicados probablemente por la competencia, en tanto que otras especies como *Tamandua tetradactyla* Linnaeus 1758 y *Myrmecophaga tridactyla* Linnaeus 1758 mostraron patrones de actividad similares. Se destaca la importancia de las sabanas para la conservación de estas especies y se discute la relevancia de los estudios sobre patrones de actividad para la ecología y conservación de mamíferos en las sabanas neotropicales.

Palabras clave: Periodos de actividad; Estrategias conductuales; Cámaras trampa; Mamíferos neotropicales; Solapamiento de nicho; Cuenca del Orinoco; Regiones de sabana.

Citation: Castillo-Figueroa D, Martínez-Medina D, Rodríguez-Posada ME. Activity patterns of medium and large mammals in two savanna ecosystems in the Colombian Llanos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1071-1083, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1461>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Corresponding autor:**
Dennis Castillo-Figueroa;
dennis.castillof@gmail.com

Received: April 28, 2021

Accepted: June 25, 2021

Published: December 15, 2021



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

Introduction

The balance of time between activity and resting periods is critical to satisfying the biological needs of animal individuals (Downes, 2001). Since activity periods represent higher energetic costs of mobility (Dunbar, 1988), foraging effort (Weckel, *et al.*, 2006), predation risk (Suselbeek, *et al.*, 2014), and thermal stress (Owen-Smith, 1998), optimization of the time that individuals are active become essential for their survival (Di Blanco, *et al.*, 2017). Mammalian activity patterns reflect physiological and ecological traits of species within a community (Tobler, *et al.*, 2009; Blake, *et al.*, 2012). Typically, the regulation of circadian rhythms is associated with the daily light-dark cycle and some mammals can specialize in a particular period of the day (Mistlberger & Antle, 2011), which allows classification as diurnal, nocturnal, crepuscular, or even cathemeral (Gómez, *et al.*, 2005; Leuchtenberger, *et al.*, 2018). However, mammals can change their activity patterns due to extrinsic (abiotic) and intrinsic (biotic) factors, which are reflected in inter- and intra-specific variations (Di Blanco, *et al.*, 2017).

In mammal communities, activity patterns also reflect interactions between coexisting species, for example, predator-prey relationships (Foster, *et al.*, 2013), or niche differentiation by resource partitioning in species with similar ecological traits such as diet and habitat use (Schoener, 1974; Tobler, *et al.*, 2009; Ferregueti, *et al.*, 2018). Variations in activity patterns among mammal populations may exhibit individuals' strategies to overcome local factors including ecological interactions with other species (Leuchtenberger, *et al.*, 2018). Consequently, mammal species can behave differently depending on their ecological context, which is determined by land use, environmental conditions, and coexisting species (Di Blanco, *et al.*, 2017; Grotta-Neto, *et al.*, 2019). Information on species' niche overlap is therefore important to understand the potential of species to coexist and interact in a community (Estes, *et al.*, 2011).

Throughout more than 3,000,000 km² of Neotropical savannas (Sarmiento, 1983, 1984), there is an important variability of habitats that promotes richness and turnover of mammal species (Morales-Martínez, *et al.*, 2018; Castillo-Figueroa, *et al.*, 2019; Cely-Gómez, *et al.*, 2021). However, little is known about the behavioral patterns of mammals in different savanna types. Particularly, in the savanna ecosystems of the Colombian Llanos, several anthropogenic activities such as livestock raising and oil industry may influence activity periods because of the noise caused by the employment of heavy machinery, the habitat alteration probably increasing competition between species, and the formation of roads to allow human hunting (Payán & Boron, 2019). Regrettably, the current government plans may increase these pressures in the coming years (Departamento Nacional de Planeación-DNP, 2019). Indeed, according to the Colombian government, 70% of the Llanos region has potential for land-use conversion to agricultural systems (rice fields, oil palm, soy), and silvopastoral production (Consejo Nacional de Política Económica y Social-CONPES, 2014; López-Ricaurte, *et al.*, 2017). However, mammal surveys in the Colombian Llanos are limited (Ferrer-Pérez, *et al.*, 2009; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2017; Castillo-Figueroa, *et al.*, 2019; Boron, *et al.*, 2019; Aya-Cuero *et al.*, 2019), especially regarding mammalian ecology and activity patterns (Mosquera-Guerra, *et al.*, 2018).

Given that little is known about mammals' activity patterns in the Colombian Llanos and the importance of this information for an in-depth understanding of mammal behavior over human-dominated landscapes, the objectives of this study were to describe the activity patterns of medium- and large-sized mammals in two savanna ecosystems in the Colombian Llanos.

Materials and methods

Study area

The Colombian Llanos occupies around 30.4% of the country and extends from the Colombian Andes Piedmont to the Venezuelan border between 2.5° to 7°N and 74° to 67.5°E

(Romero-Ruiz, *et al.*, 2011), and its high ecosystem and landscape diversity includes a mixture of biogeographic Andean, Amazonian, and Guyanese elements (Romero, *et al.*, 2004; Correa, *et al.*, 2006; Minorta-Cely & Rangel, 2014).

The annual precipitation fluctuates between 667 mm in the driest places and 3,766 mm in the most humid ones. The regional climate has a unimodal rainfall pattern with a dry season between December and March and a rainy season between April and November, June being the wettest month and January the driest one (Minorta-Cely & Rangel, 2014). The altitude ranges between 200- and 1,200-m and the vegetal communities vary depending on flood levels and the topography (Mora-Fernandez, *et al.*, 2011).

The study area localities comprised two savanna ecosystems: Locality 1 (SE-1) corresponded to a floodplain savanna ecosystem in Tame municipality, department of Arauca, in the villages of San Salvador and San Joaquin within the Casanare River basin (6.2398° - 71.5863° ; 172 m) (Figure 1), characterized by a mosaic of floodplain savannas (74%), riparian stratified forest (16.6%), and exotic pastures (9.4%) (Castillo-Figueroa, *et al.*, 2019), currently facing anthropogenic landscape-scale transformations due to oil and gas industry activities. Farmers also use the highly fertile flooded savannas to grow different crops (Baptiste & Ariza, 2008) and, therefore, the forests are partially fragmented (30%) (Castillo-Figueroa, *et al.*, 2019). Locality 2 (SE-2) corresponded to an aeolian savanna ecosystem in the locality of Altagracia, Trinidad municipality,

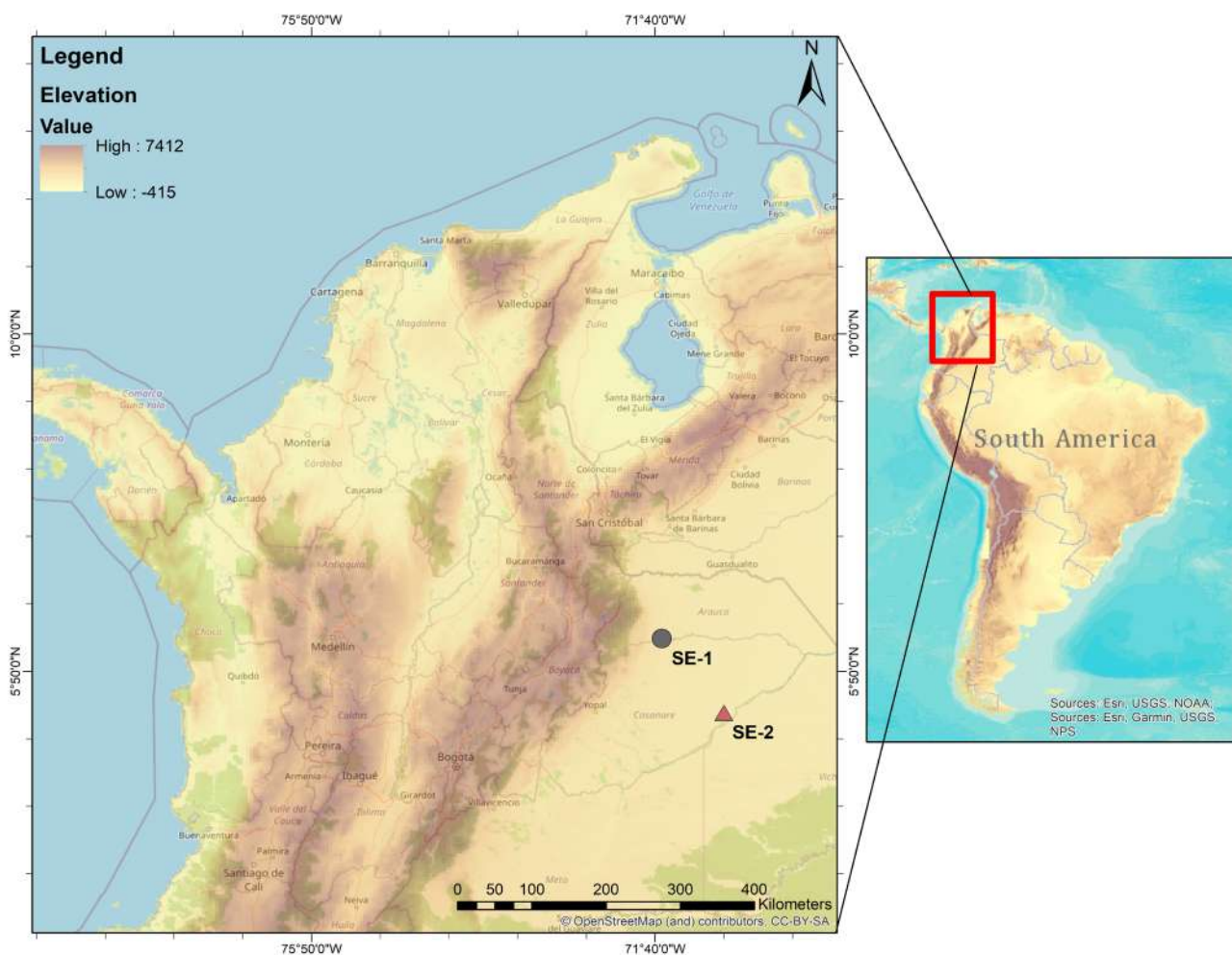


Figure 1. Savanna ecosystems in Colombian Llanos. Gray circle correspond to floodplains savanna in Arauca department (SE-1) and pink triangle to aeolian savannas in Casanare department (SE-2)

department of Casanare, in the private reserves of San Cristobal and Santa Marta, within the Pauto, Caños Yatea, and Garcero River basins (5.3204° -70.8310°; 119 m) (**Figure 1**) characterized by a mosaic of aeolian floodplain savannas (71.1%), floodplain forests (14.2%), grasslands (0.6%), exotic pastures (9.8%), and crops (4.3%) transformed by human activities including hydrocarbon projects, livestock raising, improved pastures, and rice crops (**Castillo-Figueroa, et al., 2019**).

Medium and large-sized mammal sampling

We sampled medium (1-15 kg) and large-sized terrestrial mammals (>15 kg) and carried out the fieldwork simultaneously in the two localities (SE-1, SE-2) at the end of the wet season (October to November 2017). We situated cameras using a 1 km grid to ensure sufficient spacing between them considering each camera as an independent site (**O'Brien, et al., 2003**) for a total of 30 camera traps in each ecosystem during 35 days (**Table 1**). All camera traps (Bushnell Trophy Cam) were set at an average height of 40 cm above the ground and programmed to take three pictures per trigger one-second intervals. Cameras operated 24h/day recording the moon phase, date, and time of each photograph. We did not use bait to attract mammals.

Although the sample size was small, it was very representative (>90%) of each savanna ecosystem according to Chao 2 estimator (**Castillo-Figueroa, et al., 2019**) (**Table 1**). We determined the differences between the two mammal assemblages by using an analysis of similarity (ANOSIM) (**Castillo-Figueroa, et al., 2019**), a non-parametric permutation test based on 9,999 permutations, to evaluate the difference between two or more sampling units with R values between +1 (total dissimilarity) and -1 (total similarity) (**Clarke, 1993**).

Data analysis

For the taxonomic identification of species, we used the guides by **Ramírez-Chaves, et al. (2016)** and **Solari, et al. (2013)** directly from the pictures with no automated identification software. To obtain the metadata from the images (hour, date, moon phase, temperature) we used the NAIRA software (**Pulido-Castelblanco, et al., 2017**). Photographs of the same species in the same place after an hour interval were considered as independent events (**O'Brien, et al., 2003**; **Cruz, et al., 2014**).

We described the activity patterns of all the species detected but we only analyzed those with a minimum of 20 independent events in each locality to then categorize them according to their activity patterns. We classified each species record as diurnal, nocturnal, or crepuscular (1h before and after sunrise and sunset) following **Gómez, et al. (2005)**. Crepuscular hours were calculated using the Moonrise 3.5 software (**Sidell, 2002**) estimating sunset and sunrise to make data comparable (**Porfirio, et al., 2016**). Then, we categorized species following **Gómez, et al. (2005)** based on the percentage of records in the different periods: 1) Diurnal ($\geq 70\%$ of records occurring during the day); 2) nocturnal ($\geq 70\%$ of records during the night); 3) crepuscular (from 50 to 60% of records during crepuscular periods); 4) crepuscular/diurnal (from 60 to 70% of records during the day and crepuscular periods); 5) crepuscular/nocturnal (from 60 to 70% of records during the night and crepuscular periods); 6) cathemeral, when records were randomly distributed along the day cycle.

Table 1. Species sampling of medium and large-sized mammals from SE-1 (Arauca) and SE-2 (Casanare)

Species sampling	SE-1	SE-2
Sampling effort	1050 trap-days	1050 trap-days
Species representativeness	90.38%	97.32%
Chao 2 estimator mean \pm SD	15.49 \pm 0.5	12.33 \pm 0.16

To parse out activity overlaps between species sharing the same trophic resources in each locality (i.e., frugivorous rodents and anteaters), we applied the Morisita-Horn test (Horn, 1966) using Past 3.0 (Hammer, *et al.*, 2001). Finally, for the activity patterns of species present in both ecosystems, we compared them using the Mardia-Watson-Wheeler W test, a non-parametric test that assesses if there is a difference in the distribution of two or more circular samples (Batschelet, 1981; Mardia & Jup, 2000) with the null hypothesis posing that both samples come from the same population and, therefore, a p-value over 0.05 means there is no difference between the two activity patterns analyzed. The p-value is calculated assuming that the statistical value of W follows a Chi-squared distribution (Di Blanco, *et al.*, 2017). For these analyses, we used the Oriana 4.01 software (Kovach, 2011).

Results

We recorded 16 mammalian species, 14 in SE-1 and 12 in SE-2, but we analyzed only nine (six species in SE-1 and seven in SE-2) as the others did not comply with the minimum number of independent events required (20 events or more) (Table 2). Four of the species

Table 2. Activity patterns of medium and large-sized mammals from SE-1 (Arauca) and SE-2 (Casanare). Crep/Noc corresponds to the species showing a crepuscular/nocturnal behavior

Site	Taxa	Number of events	Percentage of records (%)			Activity pattern
			Diurnal	Nocturnal	Crepuscular	
Arauca (SE-1)	<i>Didelphis marsupialis</i>	18	5.5	94.5	0	Nocturnal
	<i>Dasypus novemcinctus</i>	22	22.7	68.2	9.1	Crep/Noct
	<i>Tamandua tetradactyla</i>	29	20.7	69	10.3	Crep/Noct
	<i>Myrmecophaga tridactyla</i>	45	24.4	69	6.6	Crep/Noct
	<i>Hydrochoerus hydrochaeris</i>	1	100	0	0	Diurnal
	<i>Cuniculus paca</i>	48	16.6	79	4.4	Nocturnal
	<i>Dasyprocta fuliginosa</i>	132	75.8	22.8	1.4	Diurnal
	<i>Cerdocyon thous</i>	10	50	40	10	Cathemeral
	<i>Puma yagouaroundi</i>	3	66.7	0	33.3	Crep/Day
	<i>Leopardus pardalis</i>	13	23.1	61.5	15.4	Crep/Noct
	<i>Eira barbara</i>	14	35.8	50	14.2	Cathemeral
	<i>Mazama gouazoubira</i>	6	66.6	16.7	16.7	Crep/Day
	<i>Odocoileus cariacou</i>	36	41.6	55.6	2.8	Cathemeral
	<i>Pecari tajacu</i>	139	34.8	39.1	26.1	Cathemeral
Casanare (SE-2)	<i>Didelphis marsupialis</i>	28	3.6	85.7	10.7	Nocturnal
	<i>Dasypus novemcinctus</i>	6	0	100	0	Nocturnal
	<i>Tamandua tetradactyla</i>	20	20	70	10	Nocturnal
	<i>Myrmecophaga tridactyla</i>	28	14.3	78.5	7.2	Nocturnal
	<i>Hydrochoerus hydrochaeris</i>	26	65.4	26.9	7.7	Crep/Day
	<i>Cuniculus paca</i>	25	4.3	87	8.7	Nocturnal
	<i>Dasyprocta fuliginosa</i>	54	92.6	3.7	3.7	Diurnal
	<i>Cerdocyon thous</i>	3	0	100	0	Nocturnal
	<i>Puma concolor</i>	5	60	40	0	Cathemeral
	<i>Leopardus pardalis</i>	6	33.3	66.7	0	Cathemeral
	<i>Odocoileus cariacou</i>	50	80	6	14	Diurnal
	<i>Pecari tajacu</i>	7	85.8	14.2	0	Diurnal

with > 20 records were present in the two localities: the southern tamandua (*Tamandua tetradactyla* Linnaeus 1758), the giant anteater (*Myrmecophaga tridactyla* Linnaeus 1758), the paca (*Cuniculus paca* Linnaeus 1766), and the black agouti (*Dasyprocta fuliginosa* Wagler 1832).

Activity patterns of mammal species

In SE-1, pacas had the highest proportion of nocturnal activity (79%) whereas the black agoutis had the most daytime events (75.8%) (**Figure 2**). Nine-banded armadillos (*Dasypus novemcinctus* Linnaeus 1758), southern tamanduas, and giant anteaters showed a crepuscular/nocturnal behavior (**Table 2**), and collared peccaries (*Pecari tajacu* Linnaeus 1758) were detected all day long with similar activity proportions.

In SE-2, black-eared opossums (*Didelphis marsupialis* Linnaeus 1758) had the highest proportion of nocturnal activity (85.7%) while black agoutis had the greatest proportion of diurnal activity (92.6%) followed by white-tailed deer (*Odocoileus cariacou* Boddaert 1784) with 80% (**Figure 3**). The capybaras appeared to show a crepuscular/diurnal behavior while southern tamandua (70%) and giant anteater (78.5%) photos were taken mostly at night (**Table 2**).

Activity pattern overlaps and comparison between ecosystems

In both ecosystems, pacas and black agoutis showed little overlapping (SE-1: 0.26, SE-2: 0.04) compared to giant anteaters and southern tamanduas, both with high values in each ecosystem (SE-1: 0.73, SE-2: 0.62). The W tests showed non-significant within-species differences in their 24-hour cycles between the two localities (**Table 1S**, <https://www.raccefnyn.co/index.php/raccefnyn/article/view/1461/3136>).

Discussion

Although ecological and environmental differences across the Llanos influence mammal communities' structure (Castillo-Figueroa, *et al.*, 2019), our results show that this is not necessarily reflected in species activity patterns. The comparison of medium and large-sized terrestrial mammals activity patterns in the two savanna ecosystems under study may

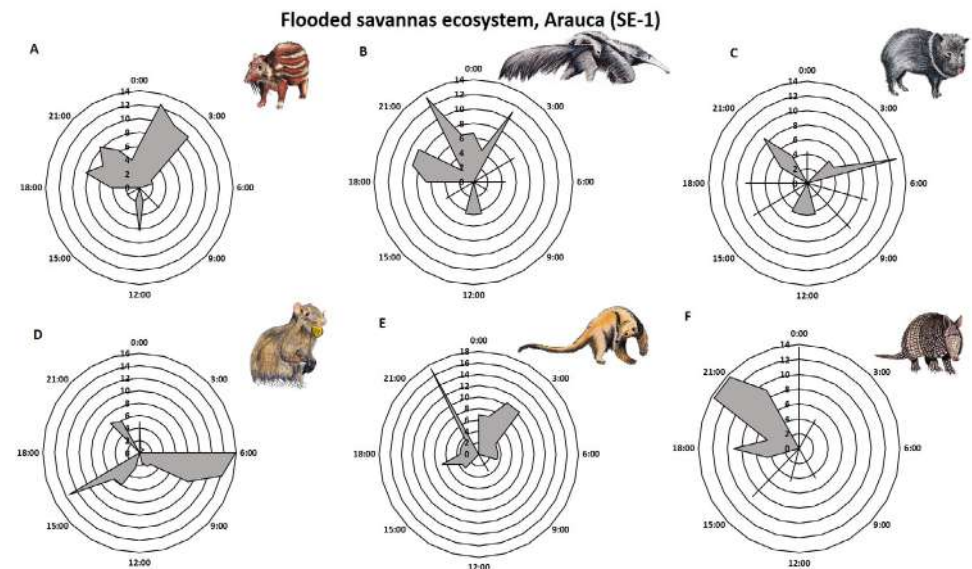


Figure 2. Activity patterns of medium- and large-sized mammals in SE-1 (Arauca). (A) *Cuniculus paca*. (B) *Myrmecophaga tridactyla*. (C) *Pecari tajacu*. (D) *Dasyprocta fuliginosa*. (E) *Tamandua tetradactyla*. (F) *Dasypus novemcinctus*. Gray bars represent the number of independent events (n) per hour

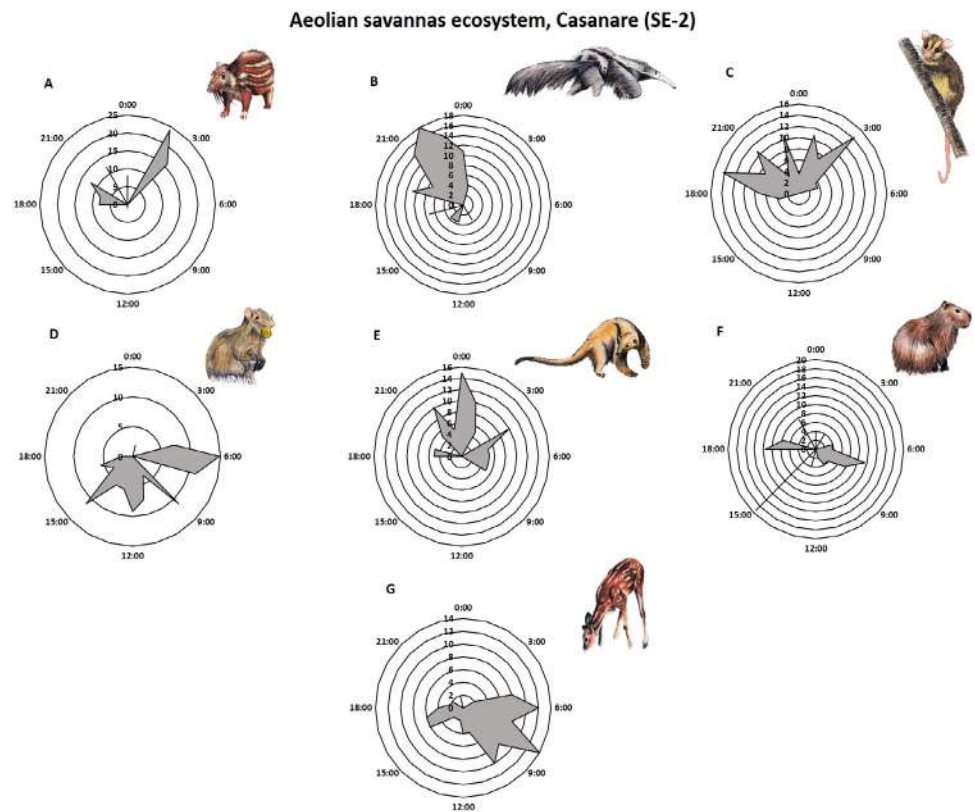


Figure 3. Activity patterns of medium- and large-sized mammals from SE-2 (Casanare). (A) *Cuniculus paca*. (B) *Myrmecophaga tridactyla*. (C) *Didelphis marsupialis*. (D) *Dasyprocta fuliginosa*. (E) *Tamandua tetradactyla*. (F) *Hydrochoerus hydrochaeris*. (G) *Odocoileus cariacou*. Gray bars represent the number of independent events (n) per hour

have been influenced by detectability and abundance differences among species in the two sites (Castillo-Figueroa, *et al.*, 2019) as from the 16 species recorded in both sites, only four were shared in both localities. We found no differences in mammals activity patterns between the two savanna ecosystems, but the activity patterns of each species showed variations compared to those reported in studies conducted in other regions and climatic seasons (Gómez, *et al.*, 2005; Blake, *et al.*, 2011; Foster, *et al.*, 2013; Albanesi, *et al.*, 2016; Dias, *et al.*, 2019).

Species activity patterns

Pacas exhibited nocturnal activity as reported in previous studies (Gómez, *et al.*, 2005; Blake, *et al.*, 2012; Huck, *et al.*, 2013; Leuchtenberger, *et al.*, 2018; Dias, *et al.*, 2019), and in both savanna ecosystems (Figures 2A and 3A), the 0h-3h period was their most active. However, there may be a regional variation as in the Brazilian pampa the highest activity was recorded between 1h-05h period (Leuchtenberger, *et al.*, 2018) while in México's Pacific Coastal Plain, the highest peak of activity was registered between 20h and 22h (Hernández-Hernández, *et al.*, 2018).

The nine-banded armadillo was nocturnal with a peak of activity between 18h and 0h (Figure 2F), however, some studies have reported variations in peak activity, with the highest activity between 0h and 6h, suggesting changes in response to habitat perturbation (Ramírez-Mejía & Sánchez, 2016) and habitat patch size, with peaks in crepuscular hours (Norris, *et al.*, 2010). Possibly, temperatures also influence this species' activity pattern during daytime (McBee & Baker, 1982; Reis, *et al.*, 2006).

The white-tailed deer was diurnal with the highest peak between 6h and 11h (**Figure 3G**), similar to that reported for this species by **López-Tello, et al.** (2015) with the most active periods from 9h to 11:59h. Previous studies have shown variations in this species' activity patterns depending on environmental conditions (ambient temperature and seasonality). For example, in the mountain cloud forest of the Peruvian Andes, the white-tailed deer has been described as a cathemeral species (**Jiménez, et al.**, 2010).

Capybaras showed a crepuscular-diurnal activity with the highest peaks during the early day (7h) and before sunset (16h) (**Figure 3F**). This behavior possibly reduces the risk of nocturnal predators as reported in similar ecosystems in the Brazilian Pantanal (**Foster, et al.**, 2013). Typically, capybaras have nocturnal and cathemeral activity (**Gómez, et al.**, 2005; **Foster, et al.**, 2013; **Rodrigues**, 2013; **Rinaldi**, 2014; **Leuchtenberger, et al.**, 2018) meaning they may be more nocturnal in areas with high human contact during the day (**Rodrigues**, 2013), but with activity peaks also during the day and dusk to prevent encounters with nocturnal predators such as jaguars (*Panthera onca* Linnaeus 1758) and pumas (*Puma concolor* Linnaeus 1771) (**Foster, et al.**, 2013).

The collared peccary exhibited a cathemeral pattern with the maximum number of events at 5h but many small peaks during the day and night (**Figure 2C**). Some studies have reported this species as strictly diurnal in the Peruvian Amazon (**Tobler, et al.**, 2009) and Bolivia's Chaco (**Maffei, et al.**, 2004), while others have reported the same cathemeral pattern in the Yungas piedmont forest in Argentina (**Albanesi, et al.**, 2016). The flexibility of this pattern allows mammals to adjust their activity time to reduce encounters with predators and competitors, or to reduce the energetic cost of thermoregulation (**Donati & Borgognini-Tarli**, 2006).

The black-eared opossum had two activity periods: between 18h-23h and 0h-3h (**Figure 3C**), which is considered mainly nocturnal (**Arroyo-Arce, et al.**, 2017). In Costa Rica, this species highest activity period goes from 21h-23h and 0h-2h (**Vaughan & Hawkins**, 1999). On the other hand, the black agouti was diurnal with two peaks (**Figure 2D and 3D**), one in the early morning (6h-9h) and the other in the late afternoon (14h-16h) as has been also reported in the lowland forest of Ecuador (**Blake, et al.**, 2011).

Giant anteaters and southern tamanduas were nocturnal in the aeolian savanna, with higher peaks between 21h-3h (**Figures 2B and E**), and crepuscular-nocturnal in the floodplain savanna, with peaks before sunset and dawn (**Figures 3B and E**). Some studies have reported giant anteaters cathemeral activity as it helps for thermoregulation, which is particularly important in insectivorous mammals with low metabolic rate as is the case of this species (**McNab**, 1984; **Camilo-Alves & Mourão**, 2006). To minimize energetic costs, nocturnal activity should be limited when nighttime temperatures are low (**Gerkema, et al.**, 2013; **Bennie, et al.**, 2014) and it would be more efficient in crepuscular hours.

Activity patterns overlap and comparison between ecosystems

Resource partitioning was clear between pacas and black agoutis since their activity pattern overlap was among the lowest in the two ecosystems. Both rodents feed on fallen fruits and seeds (**Emmons & Feer**, 1997) and perhaps there is a time division, as suggested by **Blake, et al.** (2011) and **Tobler, et al.** (2009). Besides, the difference in size between pacas (6-12 kg) and black agoutis (3.5-6 kg) (**Pérez**, 1992; **Emmons & Feer**, 1997) may contribute to niche partitioning in these rodents considering that the size is related to the demand for trophic resources and energy expenditure (**Gómez-Ortiz & Moreno**, 2017). However, it is important to assess other niche dimensions such as habitat use.

On the other hand, giant anteaters and southern tamanduas activity patterns greatly overlapped. Although both species are obligate insectivores, giant anteaters feed mainly on terrestrial ants and southern tamanduas on arboreal ants and termites (**Sandoval-Gómez, et al.**, 2012; **Gallo, et al.**, 2016) and, therefore, they can forage at the same time as there is no resource overlap.

No differences were found in the circadian distribution of mammals between the two savanna ecosystems (**Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1461/3136>), probably due to three main hypotheses: 1) local factors influencing activity periods such as climate, temperature, and daylight hours (**Di Blanco, et al., 2017**) may be similar in the two places; 2) hunting pressure and other anthropogenic disturbances (**Lendrum, et al., 2017; Gaynor, et al., 2018**) could be similar in the two sites, and 3) considering that shifts in circadian distributions can impose high fitness costs (**Kronfeld-Schor & Dayan, 2003**), mammals' endogenous clock constraints tend to limit activity pattern plasticity in the different sites (phylogenetic constraints) (**Gaynor, et al., 2018**), which would explain why activity pattern variation of medium and large mammals at the intraspecific level may be less than that at the interspecific level (**Romero-Muñoz, et al., 2010**) as in our results.

Bearing in mind that human disturbances such as crops and oil industry are present in both ecosystems, medium and large-sized mammals' activity patterns in them may be related not only to daily light-dark cycles, but also to anthropogenic pressures probably affecting species interspecific relationships (**Lendrum, et al., 2017**). Although we did not quantify human disturbance, we acknowledged the potential importance of anthropogenic impacts on activity patterns in both ecosystems. Moreover, as **Dias, et al. (2019)** have pointed out, the availability of food resources may be related to climatic seasons depending on the mammal guild since species tend to display behavioral adjustments to environmental conditions (**Ferreguetti, et al., 2017**). Here, however, we sampled a specific climatic season (transition between the rainy season and the dry season), so future studies should compare changes in the activity patterns in different climatic seasons and level of human disturbance to understand how changes in resources due to natural and human-made conditions can affect species behavior.

Given the differences in mammal diversity across the savanna ecosystems, understanding how species interact within and between savanna types is crucial as each ecosystem harbors a highly distinct mammal assemblage (ANOSIM $R = 0.23$, $p < 0.01$) (**Castillo-Figueroa, et al., 2019**). This information is crucial to adequately manage human disturbances that may affect species' behavior and their ecological interactions in the region. For example, some studies have suggested that certain species can adapt to activity periods with minimum human disturbance and noise (**Payán & Boron, 2019**), yet this has not been extensively tested in Neotropical savannas, which are highly transformed ecosystems. In fact, considering the intensity of agricultural activities that threaten the mammal diversity of this region, and taking into account the national government plans (**DNP, 2019**) oriented to expand productive lands for agriculture almost tenfold from 40 km² to 3,000 km² in the Colombian Llanos, it is urgent to further study mammals and their needs to design effective conservation plans and protect savanna ecosystems.

Final considerations

Activity patterns constitute an important component of the natural history and ecology of mammals. However, the knowledge on mammal activity across Neotropical savannas is scarce and further studies are required for an in-depth understanding of interactions between biotic, abiotic, and human factors. Here we described the activity patterns of nine species with little overlapping for frugivorous rodents and high for anteaters, which may reflect temporal partitioning to avoid competition between pacas and black agoutis and the fact that ecological features other than temporality likely allow the coexistence of giant anteaters and southern tamanduas (e.g., dietary composition and spatial dimension). We found no differences in the circadian distribution of the four species sharing the two savanna ecosystems, possibly because of phylogenetic restrictions associated with endogenous clock constraints, as well as similar local factors and human disturbances in both of them. Considering the accelerating transformations in savanna regions, it is urgent to keep studying their ecological characteristics as they may contribute important information for conservation and management plans of mammalian species in the future.

Acknowledgments

We would like to thank the local communities and landowners in the sites where the field phase of this study was carried out: Puerto San Salvador (Arauca), San Cristobal, and Santa Marta private reserves in Altagracia (Casanare). The data reported here were obtained as part of the cooperation agreement No. 100-15-17-018 between CORPORINOQUIA (the autonomous regional corporation of the Orinoquia) and *Fundación Reserva Natural La Palmita* research center for the conservation plan of anteaters in the departments of Arauca, Casanare, and Vichada. We thank researchers Diego Gutiérrez Sanabria, Darwin Morales-Martínez, Diana Burbano and biologists Camilo Fernández Rodríguez and Bibiana Gómez Valencia at *Fundación La Palmita* for their help during the fieldwork phase and the sampling design, as well as its research center for administrative, technical, and logistical support. We thank Josh Nightingale for the comments on the early version of the manuscript; Laura L. Garzón-Salamanca for her help in the preparation of the map in figure 1, and Catalina Mora for mammal illustrations in Figures 2 and 3. Finally, we are grateful to the three reviewers and the editor, who substantially improved the quality of this paper.

Supplementary Information

Table 1S. Comparisons of circadian distributions of four species present in the two savanna ecosystems. Mardia-Watson-Wheeler tests (W), and statistical probability value ($P < 0.05$ as significant). See the table 1S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1461/3136>

Author contributions

DCF: analyzed the data, contributed to the theoretical and conceptual framework, wrote the paper, prepared figures, and tables, and reviewed the drafts of the paper; DMM: wrote the paper, contributed to materials and methods, prepared the figures, and reviewed the drafts of the paper; MERP wrote the paper, contributed to the theoretical and conceptual framework, designed the mammal sampling, and reviewed the drafts of the paper.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Albanesi, S. A., Jayat, J., Brown, A. D. (2016). Patrones de actividad de mamíferos de medio y gran porte en el piedemonte de Yungas del noroeste argentino. *Mastozoología Neotropical*. **23**: 335-358.
- Arroyo-Arce, S., Thomson, I., Fernández, C., Salóm-Pérez, R. (2017). Relative abundance and activity patterns of terrestrial mammals in Pacuare Nature Reserve, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*. **9**: 15-21.
- Aya-Cuero, C. A., Mosquera-Guerra, F., Esquivel, D. A., Trujillo, F., Brooks, D. (2019). Medium and large mammals of the mid Planas River basin, Colombia. *Biota Colombiana*. **20**: 76-92.
- Baptiste, L. G. & Ariza, A. (2008). Ecología de las Sabanas Inundables de Casanare. En Salamanca, A., Baleta, L., Benítez, J. (eds). *Memorias, 1º Congreso Internacional de Producción y Desarrollo Sostenible. Versión Sabanas inundables, 1º Simposio de Recursos Genéticos del Trópico Húmedo*. (pp.120-140). Arauca, Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Sede Arauca.
- Batschelet, E. (1981). *Circular statistics in biology*. New York, USA: Academic Press. 371 pp.
- Bennie, J.J., Duffy, J. P., Inger, R., Gaston, K. J. (2014). Biogeography of time partitioning in mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **111**: 13727-13732.
- Blake, J. G., Mosquera, D., Guerra, J., Loiselle, B. A., Romo, D., Swing, K. (2011). Mineral licks as diversity hotspots in the lowland forest of eastern Ecuador. *Diversity*. **3**: 217-234.
- Blake, J. G., Mosquera, D., Loiselle, B. A., Swing, K., Guerra, J., Romo, D. (2012). Temporal activity patterns of terrestrial mammals in lowland rainforest of eastern Ecuador. *Ecotropica*. **137**: 137-146.

- Boron, V., Deere, N. J., Xofis, P., Link, A., Quiñones-Guerrero, A., Payán, E., Tzanopoulos, J.** (2019). Richness, diversity, and factors influencing occupancy of mammal communities across human-modified landscapes in Colombia. *Biological Conservation*. **232**: 108-116.
- Camilo-Alves, C. S. P. & Mourão, G. M.** (2006). Responses of a specialized insectivorous mammal (*Myrmecophaga tridactyla*) to variation in ambient temperature. *Biotropica*. **38**: 52-56.
- Castillo-Figueroa, D., Martínez-Medina, D., Rodríguez-Posada, M., Bernal-Vergara, S.** (2019). Structural differences in mammal assemblages between savanna ecosystems of the Colombian Llanos. *Papeis Avulsos de Zoologia*. **59**: e20195914.
- Cely-Gómez, M. A., Castillo-Figueroa, D., Pérez-Torres, J.** (2021). Bat Assemblage in an Oil Palm Plantation from the Colombian Llanos Foothills. *Tropical Life Sciences Research*. **32** (1): 47-61.
- Clarke, K. R.** (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*. **18** (1): 117-143.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social – CONPES.** (2014). Compes 3797. Política para el desarrollo integral de la Orinoquía: Altillanura- Fase I. Fecha de consulta: 15 de abril de 2021. Disponible en: http://www.asorinoquia.org/sites/default/files/dnp_-_retos_y_avances_en_la_region_llanos_-_expogestion_orinoquia_1.pdf
- Correa, H., Ruiz, S., Arévalo, L.** (2006). Plan de acción en biodiversidad de la cuenca del Orinoco-Colombia/2005-2015 – Propuesta técnica. Bogotá. Colombia: WWF-Colombia.
- Cruz, P., Paviolo, A., Bó, R. F., Thompson, J. J., Di Bitetti, M.S.** (2014). Daily activity patterns and habitat use of the lowland tapir (*Tapirus terrestris*) in the Atlantic Forest. *Mammalian Biology*. **79**: 376-383.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP).** (2019). Bases del Plan Nacional de Desarrollo. Fecha de consulta: 15 de abril de 2021. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/BasesPND2018-2022n.pdf>
- Dias, D., Almeida, M., Araújo-Piovezan, T., Dantas, J.** (2019). Spatiotemporal ecology of two Neotropical herbivorous mammals. *Papeis Avulsos de Zoologia*. **59**: e20195910.
- Di Blanco, Y. E., Spørring, K. S., Di Bitetti, M. S.** (2017). Daily activity pattern of reintroduced giant anteaters (*Myrmecophaga tridactyla*): effects of seasonality and experience. *Mammalia*. **81**: 11-21.
- Donati G. & Borgognini-Tarli, S. M.** (2006). From darkness to daylight: cathemeral activity in primates. *Journal of Anthropological Sciences*. **84**: 7-32.
- Downes, S.** (2001). Trading heat and food for safety: costs of predator avoidance in a lizard. *Ecology*. **82**: 2870-2881.
- Dunbar, R. I. M.** (1988). Primate social systems. Bristol, UK: Springer.
- Emmons, L. H. & Feer, F.** (1997). Neotropical Rainforest Mammals: a field guide. 2nd edition. Chicago, USA: The University of Chicago Press. 396 pp.
- Estes, J. A., Terborgh, J., Brashares, J.S., et al.** (2011). Trophic downgrading of planet Earth. *Science*. **333**: 301-306.
- Ferrer-Pérez, A., Beltrán, M., Díaz-Pulido, A.P., Trujillo, F., Mantilla-Meluk, H., Herrera, O., Alfonso, A.F., Payán, E.** (2009). Lista de los mamíferos de la cuenca del río Orinoco. *Biota Colombiana*. **10**: 179-207.
- Ferregueti, A. C., Tomas, W. M., Bergallo, H. G.** (2017). Differences in the mammalian habitat use in a mosaic of vegetation types of an Atlantic Rain-Forest reserve, Brazil. *Mastozoologia Neotropical*. **24**: 355-364.
- Ferregueti A. C., Davis, C. L., Tomas, W. M., Bergallo, H. G.** (2018). Using activity and occupancy to evaluate niche partitioning: the case of two peccary species in the Atlantic Rainforest, Brazil. *Hystrix*. **29**: 168-174.
- Foster, V. C., Sarmiento, P., Sollmann, R., Tôrres, N., Jácomo, A.T.A., Negrões, N., Fonseca, C., Silveira, L.** (2013). Jaguar and puma activity patterns and predator-prey interactions in four Brazilian biomes. *Biotropica*. **45**: 373-379.
- Gallo, J. A., Abba, A. M., Elizalde, I., Di Nucci, D., Ríos, T. A., Ezquiaga, M. C.** (2017). First study on food habits of anteaters, *Myrmecophaga tridactyla* and *Tamandua tetradactyla*, in the southern limit of their distribution. *Mammalia*. **81**: 601-604.
- Gaynor, K. M., Hojnowski, C. E., Carter, N. H., Brashares J. S.** (2018). The influence of human disturbance on wildlife nocturnality. *Science*. **360**: 1232-1235.
- Gerkema, M. P., Davies, W. I. L., Foster, R. G., Menaker, M., Hut, R. A.** (2013). The nocturnal bottleneck and the evolution of activity patterns in mammals. *Proceedings of the Royal Society of London [Biological Sciences]*. **280**: 20130508.

- Gómez, H., Wallace, R. B., Ayala, G., Tejada, R.** (2005). Dry season activity periods of some Amazonian mammals. *Studies of Neotropical Fauna and Environment*. **40**: 91-95.
- Gómez-Ortiz, Y. & Moreno, C.E.** (2017). La diversidad funcional en comunidades animales: una revisión que hace énfasis en los vertebrados. *Animal Biodiversity and Conservation*. **40**: 165-174.
- Grotta-Neto, F., Peres, P. H. F., Piovezan, U., Passos, F. C., Duarte, J. M. B.** (2019). Influential factors on gray brocket deer (*Mazama gouazoubira*) activity and movement in the Pantanal, Brazil. *Journal of Mammalogy*. **100**: 454-463.
- Hammer, O., Harper, D., Ryan, P. D.** (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Palaentologia Electronica*. **4**: 1-9.
- Hernández-Hernández, J., Chávez, C., List, R.** (2018). Diversidad y patrones de actividad de mamíferos medianos y grandes en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*. **66**: 634-646.
- Horn, H. S.** (1966). Measurement of "Overlap" in comparative ecological studies. *American Naturalist*. **100**: 419-424.
- Huck, M., Juárez, C. P., Rotundo, M. A., Fernández-Duque, E.** (2013). Primera evidencia craneal y registros documentados de *Cuniculus paca* (Rodentia, Cuniculidae) para el chaco húmedo de Argentina. *Mastozoología Neotropical*. **20**: 153-157.
- Jiménez, C. F., Quintana, H., Pacheco, V., Melton, D., Torrealva, J., Tello, G.** (2010). Camera trap survey of medium and large mammals in a montane rainforest of northern Peru. *Revista Peruana de Biología*. **17**: 191-196.
- Kovach, W. L.** (2011). Oriana—circular statistics for windows, ver. 4, 4.0 edn. Kovach Computing Services, Pentraeth, UK.
- Kronfeld-Schor, N. & Dayan, T.** (2003). Partitioning of time as an ecological resource. *Annual Review of Ecology and Evolution*. **34**: 153-181.
- Lendrum, P. E., Crooks, K. R., Wittemyer G.** (2017). Changes in circadian activity patterns of a wildlife community post high-intensity energy development. *Journal of Mammalogy*. **98**: 1265-1271.
- Leuchtenberger, C., Oliveira, Ê. S., Cariolatto, L. P., Kasper C. B.** (2018). Activity pattern of medium and large sized mammals and density estimates of *Cuniculus paca* (Rodentia: Cuniculidae) in the Brazilian Pampa. *Brazilian Journal of Biology*. **78**: 697-705.
- López-Ricaurte, L., Edwards, D. P., Romero-Rodríguez, N., Gilroy, J.** (2017). Impacts of oil palm expansion on avian biodiversity in a Neotropical natural savanna. *Biological Conservation*. **213**: 225-233.
- López-Tello, E., Gallina, S., Mandujano, S.** (2015). Activity patterns of white-tailed deer in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Puebla-Oaxaca, México. *DGS Newsletter*. **27**: 32-43.
- Maffei, L., Cuéllar, E., Noss, A.** (2004). One thousand jaguars (*Panthera onca*) in Bolivia's Chaco? Camera trapping in the Kaa-Iya National Park. *Journal of Zoology*. **262**: 295-304.
- Mardia, K. V. & Jupp P. E.** (2000). *Directional Statistics*. Chichester, UK: Wiley.
- McBee, K. & Baker, R. J.** (1982). *Dasyopus novemcintus*. *Mammal Species*. **162**: 1-9.
- McNab, B. K.** (1984). Physiological convergence amongst ant-eating and termite-eating mammals. *Journal of Zoology*. **203**: 485-510.
- Minorta-Cely, V. & Rangel-Ch, J. O.** (2014). La riqueza y la diversidad de las plantas con flores de la Orinoquia colombiana. En Rangel-Ch, J.O. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica Vol. XIV: La región de la Orinoquia de Colombia*. Bogotá (Colombia). (pp. 237-418). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Mistlberger, R. E. & Antle M. C.** (2011). Entrainment of circadian clocks in mammals by arousal and food. *Essays in Biochemistry*. **49**: 119-136.
- Mora-Fernández, C., Castellano-Castro, C., Cardona-Cardozo, C., Pinzón-Pérez, L., Vargas-Ríos, O.** (2011). El medio natural: los llanos de Casanare y área de estudio. En Ahumada, J. A. (ed). *Mamíferos, reptiles y ecosistemas del Bloque Cubiro (Casanare): educación ambiental para la conservación*. (pp. 45-73). Bogotá, Colombia: Instituto de Estudios Ambientales Universidad Nacional de Colombia.
- Morales-Martínez, D., Rodríguez-Posada, M., Fernandez-Rodríguez, C., Calderón-Capote, M., Gutiérrez-Sanabria, D.** (2018). Spatial variation of bat diversity between three floodplain savanna ecosystems of the Colombian Llanos. *Therya*. **9**: 41-52.
- Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Mantilla-Meluk, H., Díaz-Pulido, A.** (2017). Mamíferos. En Trujillo, F., Lasso, C. A. (eds). *Biodiversidad del río Bitá: Vichada, Colombia*. (pp. 305-343). Bogotá, Colombia: Serie Editorial Fauna Silvestre Neotropical Instituto Alexander Von Humboldt.

- Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Díaz-Pulido, A., Mantilla-Meluk, H.** (2018). Diversidad, abundancia relativa y patrones de actividad de los mamíferos medianos y grandes, asociados a los bosques riparios del río Bitá, Vichada, Colombia. *Biota Colombiana*. **19**: 202-218.
- Norris, D., Michalski, F., Peres, C. A.** (2010). Habitat patch size modulates terrestrial mammal activity patterns in Amazonian forest fragments. *Journal of Mammalogy*. **91**: 551-560.
- O'Brien, T., Kinnaird, M., Wibisonom H.** (2003). Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*. **6**: 131-139.
- Owen-Smith, N.** (1998). How high ambient temperature affect the daily activity and foraging time of a subtropical ungulate, the greater kudu (*Tragelaphus strepsiceros*). *Journal of Zoology*. **246**: 183-192.
- Payán, E. & Boron, V.** (2019). The Future of Wild Mammals in Oil Palm Landscapes in the Neotropics. *Frontiers in Forest and Global Change*. **2**: 61. Doi: 10.3389/ffgc.2019.00061
- Pérez, E.M.** (1992). *Agouti paca*. *Mammalian Species*. **404**: 1-7.
- Porfirio, G., Foster, V. C., Fonseca, C., Sarmiento, P.** (2016). Activity patterns of ocelots and their potential prey in the Brazilian Pantanal. *Mammalian Biology*. **81**: 511-517.
- Pulido-Castelblanco, L., Isaza-Narváez, C., Díaz-Pulido, A.** (2017). Methodology for mammal classification in camera trap images. Proc. SPIE 10341, Ninth International Conference on Machine Vision (ICMV 2016). Nice, France. Doi: 10.1117/12.2268732
- Ramírez-Chaves, H., Suárez-Castro, A.F., González-Maya, J. F.** (2016). Cambios recientes a la lista de los mamíferos de Colombia. *Mammalogy Notes*. **3**: 1-9.
- Ramírez-Mejía, A. & Sánchez, F.** (2016). Activity patterns and habitat use of mammals in an Andean forest and a Eucalyptus reforestation in Colombia. *Hystrix*. **27**: 1-7.
- Reis, N.R., Peracchi, A. L., Pedro, W. A., Lima I. P.** (2006). Mamíferos do Brasil. Paraná, Brasil: Universidade Estadual de Londrina. 437 pp.
- Rinaldi, A. R.** (2014). Ecología de capivaras (*Hydrochoerus hydrochaeris*, Linnaeus, 1766) em região alterada pela formação de um reservatório hidrelétrico (Dissertação de Doutorado em Ecologia e Conservação). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. 203 p.
- Rodrigues, M. V.** (2013). Comportamento de um grupo de capivaras em uma área urbanizada. *Acta Veterinaria Brasilica*. **7**: 212-217.
- Romero, M., Galindo, G., Otero, J., Armenteras, D.** (2004). Ecosistemas de la cuenca del Orinoco colombiano. Bogotá, Colombia: Instituto Alexander Von Humboldt. 189 pp.
- Romero-Muñoz, A., Maffei, L., Cuéllar, E., Noss, A. J.** (2010). Temporal separation between jaguar and puma in the dry forests of southern Bolivia. *Journal of Tropical Ecology*. **26**: 303-311.
- Romero-Ruiz, M. H., Flantua, S. G. A., Tansey, K., Berrío, J. C.** (2011). Landscape transformations in savannas of northern South America: Land use/cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia. *Applied Geography*. **32**: 766-776.
- Sandoval-Gómez, V. E., Ramírez-Cháves, H. E., Marín, D.** (2012). Registros de hormigas y termitas presentes en la dieta de osos hormigueros (Mammalia: Myrmecophagidae) en tres localidades de Colombia. *Edentata*. **13**: 1-9.
- Sarmiento, G.** (1983). The savannas of tropical America. In Bourliere, F. (ed.). *Ecosystems of the World XIII Tropical savannas*. (pp. 254-288). Amsterdam, Holanda: Elsevier.
- Sarmiento, G.** (1984). *Ecology of Neotropical Savannas*. Boston, US: Harvard University Press. ¿p?
- Schoener, T. W.** (1974). Resource partitioning in ecological communities. *Science*. **185**: 27-39.
- Sidell, B. P.** (2002). Moonrise 3.5-32 Bit [software]. Informer Technologies, Inc.
- Solari, S., Muñoz-Saba, Y., Rodríguez-Mahecha, J. V., Defler, T., Ramírez-Chaves, H. E., Trujillo, F.** (2013). Riqueza, endemismo y conservación de los mamíferos de Colombia. *Mastozoología Neotropical*. **20**: 301-365.
- Suselbeek, L., Emsens, W. J., Hirsch, B. T., Kays, J. R., Rowcliffe, M., Zamora-Gutierrez, V., Jansen, P. A.** (2014). Food acquisition and predator avoidance in a Neotropical rodent. *Animal Behavior*. **88**: 41-48.
- Tobler, M. W., Carrillo-Percestequi, E. S., Powell, G.** (2009). Habitat use, activity patterns and use of mineral licks by five species of ungulate in south-eastern Perú. *Journal of Tropical Ecology*. **25**: 261-270.
- Vaughan, C. S. & Hawkins, L. F.** (1999). Late dry season habitat use of common opossum, *Didelphis marsupialis* (Marsupialia: Didelphidae) in Neotropical lower montane agricultural areas. *Revista Biología Tropical*. **47**: 263-269.
- Weckel, M., Giuliano, W., Silver, S.** (2006). Jaguar (*Panthera onca*) feeding ecology: distribution of predator and prey through time and space. *Journal of Zoology*. **270**: 25-30.

Artículo original

¿Es el guamo (*Inga densiflora* Benth.) un árbol benéfico como acompañante de plántulas de café con diferentes tipos de fertilización?

Is guamo (*Inga densiflora* Benth.) a beneficial tree as a companion of coffee seedlings under differential fertilization?

✉ Inge Armbrecht, ✉ Wilmar Torres, ✉ Nicole Vargas-García

Departamento de Biología, Universidad del Valle

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

Resumen

El uso de árboles leguminosos como sombra de los cultivos de café podría ser parte de una estrategia para la agricultura del futuro en un contexto de cambio climático en los trópicos. El guamo (*Inga* spp., Fabaceae) es un árbol leguminoso tradicionalmente usado por sus beneficios de amortiguación del microclima y mejoramiento de las propiedades del suelo. Sin embargo, no se sabe si su beneficio como sombra para el café se produce desde que se establece la plantación o a medida que transcurre el tiempo. Para demostrar si la proximidad de plántulas de guamo afecta el crecimiento de las de café con diferentes tipos de fertilización, se sembraron 360 cafetos y 90 plántulas de guamo (*Inga densiflora* Benth.) de tres meses de edad en un lote de 1.800 m² siguiendo un diseño de aleatorización estratificada con 90 parcelas y 270 subparcelas. Se asignaron aleatoriamente tres opciones de acompañante (guamo, otro cafeto y control), dos fuentes de fertilización (gallinaza comercial proveniente de la granja avícola Saramartina de Jamundí y copolímero orgánico), y el control sin abono. Mensualmente se midió la variable de crecimiento hasta alcanzar el año. Los tratamientos con gallinaza permitieron un crecimiento del cafeto significativamente mayor que el copolímero (23,4 % más de diámetro) y el control sin fertilizante (27,8 % más de diámetro). La altura de dichos cafetos fue 19,9 y 22,6 % mayor comparada con los tratamientos de copolímero y control, respectivamente. No se encontró un efecto del guamo como árbol acompañante. Se evidenció que la gallinaza es un abono orgánico efectivo para los cafetales y que la presencia de plántulas de guamo ni benefició (vía facilitación) ni perjudicó (vía competencia interespecífica) el establecimiento de los cafetales.

Palabras clave: Agroforestal cafetero; Cafetal de sombra; Colombia; Gallinaza; Guamo machete.

Abstract

The use of leguminous trees as shade for coffee plantations could be part of future agricultural strategies in the tropics to face climate change. The so-called “guamo” (*Inga* spp., Fabaceae) is a beneficial leguminous tree traditionally used for buffering microclimate and improving soil properties. However, it is not yet known whether the closeness of planted guamo seedlings brings benefits to coffee crops when they are established or whether this benefit comes with time. To examine whether the proximity of guamo affected the growth of coffee seedlings under different fertilization conditions, we planted 360 three-month-old guamo seedlings and 90 coffee seedlings of the same age in an 1800 m² plot using a stratified randomized design consisting of 90 plots and 270 subplots. We randomly assigned three treatments (guamo, coffee, and control without fertilizer), two fertilizers (commercial chicken manure and organic copolymer), and the control. Monthly growth measures were taken for a year. Seedlings grew the most with chicken manure (23.4% and 27.8% greater diameter than that obtained with the copolymer and the control, respectively) while the height

Citación: Armbrecht I, Torres W, Vargas-García N. ¿Es el guamo (*Inga densiflora* Benth.) un árbol benéfico como acompañante de plántulas de café con diferentes tipos de fertilización?. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1084-1096, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1380>

Editor: Jairo Castaño Zapata

***Correspondencia:**

Inge Armbrecht;
inge.armbrecht@correounivalle.edu.co

Recibido: 22 de enero de 2021

Aceptado: 8 de julio de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

was 19.9% greater than that obtained with the copolymer and 22.6% greater than the control. The evidence supports that chicken manure was an effective organic fertilizer and the presence of guamo neither benefitted (via facilitation) nor damaged (via interspecific competition) the coffee saplings during the establishment of the plantation.

Keywords: Coffee agroforestry; Chicken manure; Colombia; *Guamo machete*; Shaded coffee.

Introducción

El café (*Coffea arabica* L.), perteneciente a la familia Rubiaceae, es uno de los cultivos agrícolas más relevantes en el mundo por su impacto económico y social (Chait, 2015). Cada vez más se reconoce la necesidad de incorporar árboles en los sistemas agrícolas (Bentley, *et al.*, 2004) frente a las incertidumbres relacionadas con el cambio climático (DaMatta, 2004). Dado que las plantaciones de café requieren diferentes niveles de sombra de árboles, la experiencia de su siembra tiene un potencial enorme en los sistemas agroforestales por los servicios ecosistémicos y la resistencia y resiliencia que brindan los árboles acompañantes para mantener la biodiversidad y brindar beneficios sociales (Urrutia-Escobar & Armbrecht, 2013; Avelino, *et al.*, 2015).

Los árboles que acompañan las plantaciones de café incluyen especies maderables y frutales, o de sombrío, como el guamo (*Inga* spp., Fabaceae), el nogal cafetero (*Cordia alliodora* (Ruíz & Pav. Oken, Boraginaceae) o el árbol del coral (*Erythrina* spp., Fabaceae) (Rapidel, *et al.*, 2015). Entre las más usadas para dar sombra al café en las zonas rurales de los Andes tropicales se encuentra el guamo (*Inga densiflora* L., Fabaceae) (Chait, 2015), una especie de leguminosa que se extiende desde México hasta el norte de Sur América (Groom, 2012). Los beneficios del sombrío en los sistemas agroforestales se relacionan con los aportes de nitrógeno a través de los residuos de podas y la descomposición de la hojarasca y las raíces (Siles & Harmand, 2010), así como con la generación de un microclima que disminuye el estrés asociado con las variaciones de temperatura (Cannavo, *et al.*, 2011).

Cuando la plántula de café se está estableciendo después de la siembra, otras plantas acompañantes podrían afectarla negativamente si existiera competencia intra o inter-específica, aunque también el efecto podría ser neutro o beneficioso (si hay facilitación) (Cannavo, *et al.*, 2011). El árbol de guamo beneficiaría los cafetos si se generaran en el suelo exudados de sus raíces, micorrizas o bacterias nitrificadoras, lo que contribuye a mejorarlo (Picone, 2002; Batterman, *et al.*, 2013). Puede suceder también que el beneficio se produzca con el tiempo, a medida que se afianzan las relaciones de mutualismo en sus raíces y se genera suficiente hojarasca para que el suelo se enriquezca de nutrientes con su descomposición. En el primer caso se esperaría que los cafetos crecieran más cuando tienen plantas de guamo como acompañantes o, en el segundo caso, que estas no tuvieran ningún efecto (o inclusive un efecto negativo) en el momento del establecimiento del cultivo. En este contexto, el propósito del presente estudio fue determinar si la proximidad de las plántulas de *Inga densiflora* (comúnmente llamado “guamo machete”) afectaba el crecimiento de plántulas recién sembradas de *C. arabica* bajo tres condiciones diferentes de fertilización. Se partió de la hipótesis de que las plántulas de cafeto crecerían significativamente más acompañadas de plántulas de guamo y con cualquier tratamiento de fertilización orgánica que el control, es decir, sin guamo acompañante.

Materiales y métodos

El estudio se hizo a lo largo de un año, entre 2017 y 2018, en un lote preparado con maquinaria pesada hacía tres años que se había dejado en recuperación vegetal sin ningún tipo de agricultura.

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en el suroccidente colombiano, departamento del Cauca, municipio de Caldon, vereda el Rosal (2°49'44"N y 76°34'8"O), situada a 1.450 m una sobre el nivel del mar (Arenas-Clavijo & Armbrecht, 2019), cuyo paisaje consiste en pequeñas

parcelas campesinas en una zona montañosa con un mosaico en el que predominan potreros, cafetales, y cultivos de pan coger, como frijol y habichuela (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae), maíz (*Zea mays*, Poaceae), zapallo (*Cucurbita maxima*, Cucurbitaceae), yuca (*Manihot esculenta*, Euphorbiaceae), plátano y banano (*Musa x paradisiaca*, Musaceae), cítricos (*Citrus x cinensis*, *C. x limon*, *C. x reticulata*, Rutaceae), guayabos (*Psidium guajaba*, Myrtaceae) y mangos (*Mangifera indica*, Anacardiaceae). En la zona se siembran los cafetales en libre exposición (sin árboles de sombra o con plátano en baja densidad) o bajo la sombra de árboles como el guamo (*Inga* spp.), el aguacate (*Persea americana*, Lauraceae), el mano de oso (*Schefflera morototoni*, Araliaceae), el nacedero (*Trichantera gigantea*, Acanthaceae), el yarumo (*Cecropia* spp., Urticaceae), y el cachimbo (*Erythrina* sp., Fabaceae), entre otros. El suelo se caracteriza por ser ácido y arcilloso y requiere la aplicación de fertilizantes para la producción.

En junio de 2017 se escogió un lote de aproximadamente 1.800 m² (90 m x 20 m) (**Figura 1**) para desarrollar el experimento orientado a establecer el efecto de un árbol “acompañante” en el crecimiento de plántulas de café bajo tres condiciones de fertilización del suelo.

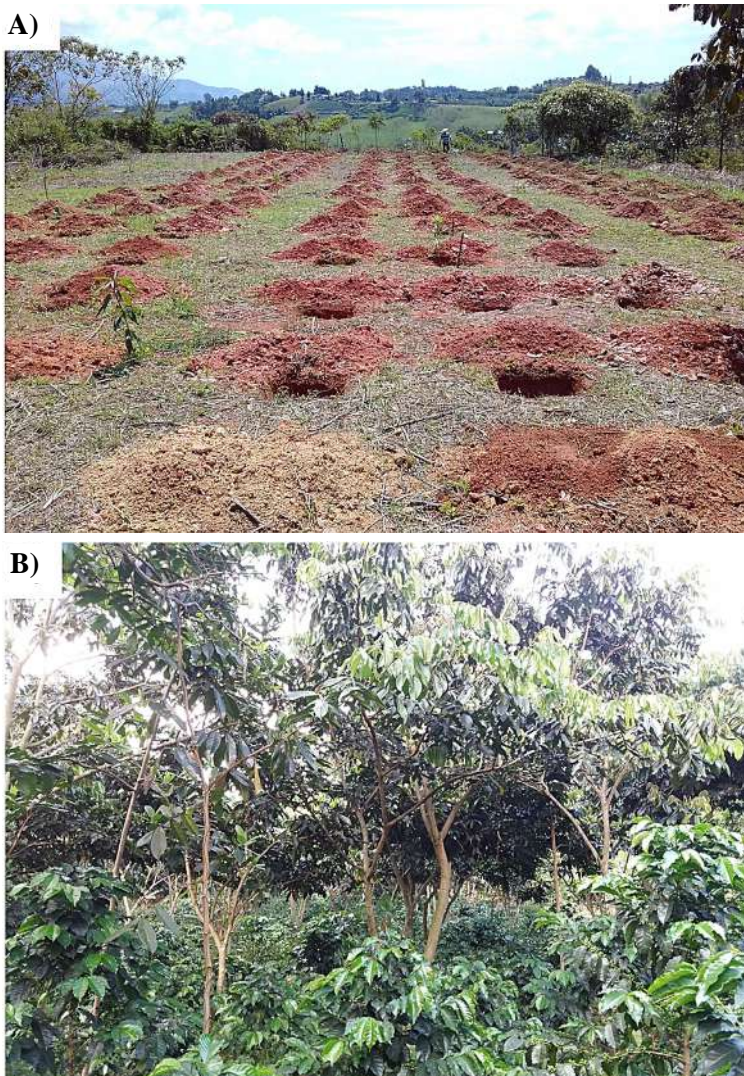


Figura 1. Panorámica del lote experimental en la vereda El Rosal. **a)** Fase de preparación del terreno para el establecimiento del experimento en julio de 2017. **b)** Aspecto del lote experimental tres y medio años después (diciembre 2020)

Se sembraron 360 plántulas de cafetos de la variedad Castillo-Tambo (Alvarado, *et al.*, 2005) y 90 de guamo (*I. densiflora*), de tres meses de edad, con un diseño de aleatorización estratificada o restringida consistente en 90 parcelas y 270 subparcelas de la siguiente manera: sobre un plano cartesiano de 30 hileras y tres columnas (Figura 2) se trazaron equidistantemente las parcelas, cada una de 320 x 50 cm (Figura 2, rectángulos de colores), con una separación de 3 m de una columna a la siguiente y de 2 m entre hileras. Cada hilera consistía de las plántulas con los tratamientos de fertilización y las del árbol acompañante dispuestas sucesivamente en 30 filas (réplicas). Dentro de cada parcela se establecieron tres subparcelas de 40 x 30 cm (Figura 2, rectángulos grises) en donde se asignaron aleatoriamente los tratamientos con árbol “acompañante”.

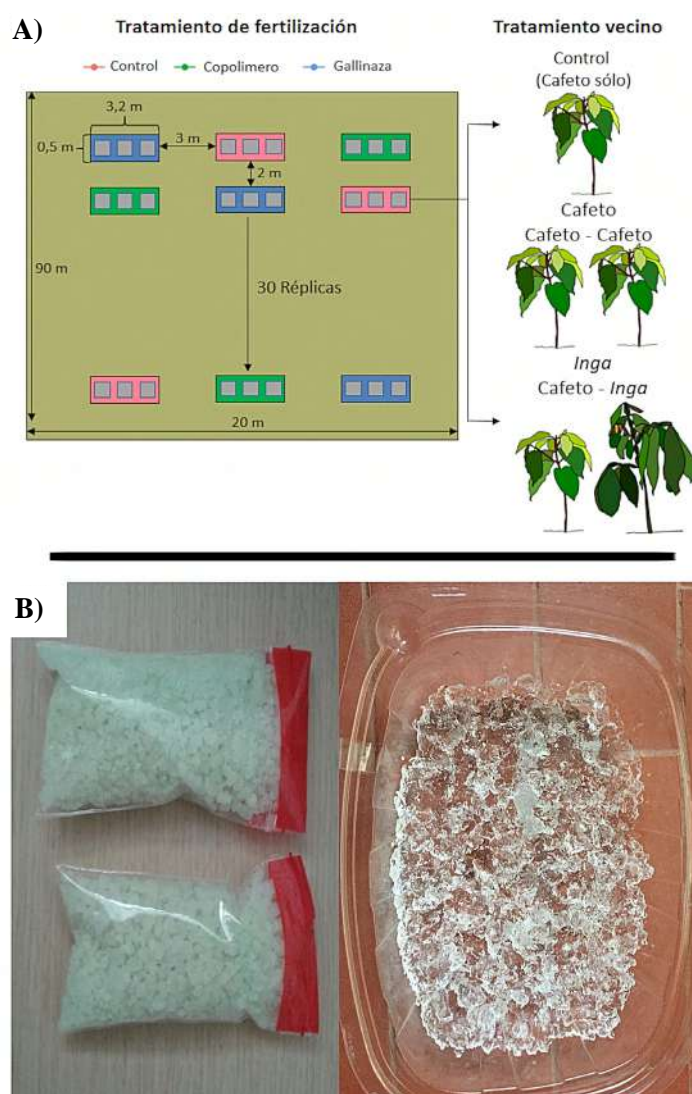


Figura 2. a) Esquema del diseño del experimento. Cada una de las 30 filas se consideró una réplica de cada tratamiento de fertilización (tres tratamientos) y de cada acompañante (tres posibilidades: sin acompañante, con otro cafeto con acompañante o con guamo como acompañante). Cada una de las tres columnas representa un tratamiento de fertilización diferente: azul: gallinaza; verde: copolímero orgánico y rosado: control sin fertilizante. En cada parcela (rectángulos de colores) se asignaron aleatoriamente las tres subparcelas (rectángulos grises) a los tipos de acompañante, como se ilustra con el ejemplo de la parcela abierta. **b)** Presentación del copolímero orgánico: forma de aplicación original (izquierda: 30g), e hidratado (derecha)

Tratamiento de fertilización

Se les asignaron aleatoriamente tres tratamientos de fertilización a las tres parcelas de cada hilera, asignando a cada una un tratamiento de fertilización diferente. Los tratamientos fueron los siguientes: 1) gallinaza comercial (fertilizante orgánico) de excretas de gallinas ponedoras adultas mezcladas con restos de alimento y exocarpos (residuos) de cosecha de arroz (10 %). La gallinaza provee aproximadamente 34,7 kg/ton de nitrógeno, 30,8 Kg/ton de fósforo (P_2O_5) y 20,9 Kg/ton de potasio (K_2O) (**Estrada-Pareja**, 2004). En la **figura 2** se presentan los tratamientos en los rectángulos azules (1 kg por subparcela). 2) Copolímero orgánico de material hidrorretenedor conocido como **Polyter®** (<https://polyter.com/es/polyter-gr.html>), cuyos productores reportan que contiene una pequeña cantidad de potasio, nitrógeno y fósforo, sin especificar el porcentaje. Este hidrorretenedor actúa como acondicionador del suelo. En la **figura 2 a y b**, los tratamientos se presentan en los rectángulos verdes (30 g por subparcela). 3) Control negativo, es decir, sin fertilizante orgánico ni hidrorretenedor (copolímero), el cual se indica en la **figura 2 a** con rectángulos rosados.

Tratamiento de árbol acompañante (subparcelas)

Dentro de cada parcela se establecieron tres subparcelas (unidad experimental: UE), con una separación de 1 m entre sí. En cada subparcela de 30 cm x 40 cm se cavó un hueco de 30 cm de profundidad en el que se sembraron las plántulas. En todos los huecos se habían aplicado previamente 300 g de cal agrícola (marca Calco®, registro de venta ICA 2881. <https://www.calco.com.co/>), con el fin de reducir la acidez del suelo. Un mes antes de iniciar el experimento el suelo registraba un pH entre 4,72 y 5,46 según los análisis químicos realizados por Agrilab Laboratorios el 24 de mayo del 2017.

A cada subparcela se le asignó aleatoriamente (aleatorización estratificada) uno de los siguientes tres tratamientos de acompañante del cafeto “foco” y se midieron todas las variables de respuesta: 1) guamo, es decir, un cafeto acompañado por una plántula de *I. densiflora* de tres meses de edad sembrada a 20 cm de distancia (en adelante “Inga” o “guamo”); 2) cafeto, o sea, un cafeto foco cuyo acompañante fue otro cafeto (en adelante “cafeto”), y 3) control, un cafeto foco sin acompañante (control absoluto, en adelante “control”). Una vez instalado el experimento, se regó con igual cantidad de agua (2 L por UE) cada tres días entre el 9 de julio y el 16 de septiembre de 2017.

En el momento del trasplante y el establecimiento del experimento (tiempo cero) y cada mes durante un año (once eventos referenciados así: durante el 2017, en agosto 12, septiembre 15, octubre 21, noviembre 25 y diciembre 22, y durante el 2018, en enero 26, marzo 2, abril 7, mayo 1, junio 11 y julio 15), se tomaron las siguientes medidas en las plántulas: diámetro (cm) del tallo a 1 cm del suelo (o diámetro a la altura de la base) medido con un calibrador pie de rey digital (6”/0,01mm) marca Mitutoyo (Ref 500-196-30); altura (cm) desde el suelo hasta el meristemo apical; número de hojas (hasta el séptimo mes), y contenido relativo de clorofila a los seis meses de edad.

Las plántulas se sembraron entre el 7 y 8 de julio de 2017 y en julio 28 se tomaron datos de la cobertura vegetal del dosel con un densiómetro esférico (Model C) para corroborar que las condiciones de los tratamientos eran similares; se registró un porcentaje muy bajo de cobertura del dosel de 6,93 % (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1380/3134>). Seis meses después, se midió el contenido relativo de clorofila en las hojas, el cual es un indicativo del estado nutricional de la planta con relación al nitrógeno (**Ribeiro da Cunha, et al.**, 2015). Para este fin, se determinó el índice de clorofila por medio de un clorofilómetro portátil Minolta SPAD-502, el cual evalúa la intensidad del verde de la hoja (650 a 940 nm) sin dañarla. Se obtuvieron medidas de dos hojas seleccionadas al azar en cada planta. La medición se hizo el 22 de diciembre del 2017 y se expresó en unidades SPAD.

Análisis estadístico

Para evaluar el efecto de los factores fijos, es decir, el tratamiento (control, copolímero y gallinaza (**Estrada-Pareja**, 2004); el acompañante del cafeto foco (solo, café o guamo),

así como la posible interacción entre estos factores a lo largo del tiempo en cuanto a las variables de diámetro y altura de los cafetos, se emplearon modelos lineales mixtos como alternativa de análisis en diseños experimentales factoriales con medidas repetidas (Gómez, *et al.*, 2019), combinando estructuras de correlación residual, heteroscedasticidad residual y efectos aleatorios, y seleccionando el mejor modelo mediante los criterios de verosimilitud penalizada (de información de Akaike, AIC, y de información bayesiano, BIC) y pruebas de cociente de verosimilitud. Se utilizó la prueba de comparación múltiple de Tukey en los casos en que se evidenció un efecto significativo de alguno de los factores fijos asociados con el diseño experimental. Para la variable de hojas totales se empleó un modelo lineal generalizado mixto, con distribución de errores binomial negativa debido a la naturaleza discreta de la variable de análisis y la excesiva dispersión evidenciada. Para el análisis de la variable clorofila, medida en un solo momento, se empleó un modelo lineal mixto con distintas estructuras de varianza (homogénea y heterogénea). El análisis estadístico se hizo con el programa de libre distribución R, versión 4.0.3 (R Development Core Team, 2020), determinando un nivel de significación del 5 % para las diferencias estadísticas.

Resultados

En general, se encontró que las plántulas de café tuvieron un mayor crecimiento (estadísticamente significativo) con la gallinaza (Estrada-Pareja, 2004) que con el copolímero (<https://polyter.com/es/polyter-gr.html>) y el control negativo en todas las variables de respuesta, siendo estos últimos estadísticamente similares entre sí (Tabla 1; Figura 3). En cuanto al tratamiento del acompañante, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las variables medidas. A continuación se detallan los resultados para cada variable de respuesta.

Diámetro del tallo

El mejor modelo presentó una estructura de varianzas heterogéneas y de correlación residual no definida en el tiempo (Tabla 2S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1380/3134>; modelo 9). El modelo indicó que la variabilidad del diámetro de los tallos de las plántulas de café aumentó en el tiempo (Figura 3a) y la correlación temporal no presentó una estructura definida, ya que la correlación disminuyó a medida que transcurría el tiempo, pero la correlación no permaneció constante entre instantes de tiempo consecutivos.

Mediante el análisis de varianza del modelo seleccionado se encontró un efecto significativo del tratamiento de fertilización, pero no hubo efecto estadístico del acompañante (Tabla 1a). Se evidenció también un efecto significativo de la interacción entre el tratamiento y el mes, lo cual sugiere que el diámetro de las plántulas de café cambió en el tiempo dependiendo solamente del tratamiento aplicado y no del acompañante.

Las pruebas de comparación múltiple de Tukey entre los tratamientos para cada uno de los instantes de tiempo evaluados (material suplementario, tabla 3S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1380/3134>) evidenciaron que, a partir del tercer mes de análisis, el tratamiento con gallinaza mostró diferencias con el control (gallinaza: media=4,64cm, desviación estándar (DE)=0,81cm; control: media=4,30cm, DE=0,78cm) y a partir del séptimo mes, con el copolímero (gallinaza: media=11,51cm, DE=2,58cm; copolímero: media=9,91cm, DE=2,60cm), en tanto que los tratamientos de control y copolímero presentaron diferencias significativas en los primeros meses (Figura 3A), las cuales se fueron atenuando con el paso del tiempo hasta que, a partir del sexto mes, dichas diferencias fueron insignificantes.

Altura de plántulas

Se encontró que el modelo más adecuado para representar el comportamiento de la altura de las plántulas de café fue el modelo lineal con estructura de varianzas heterogéneas y correlación residual no definida en el tiempo (material suplementario, tabla S4, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1380/3134>; modelo 9).

Tabla 1. Análisis de varianza para las variables: **a)** diámetro de tallos, **b)** altura de plántulas, **c)** hojas totales y **d)** clorofila

a) Diámetro de tallos		
Fuente de variación	Estadístico F	p
Tratamiento de fertilización	29113,15	0,0433*
Acompañante	3,14	0,2226
Mes	1,50	<0,0001*
Tratamiento*Acompañante	1073,34	0,9595
Tratamiento*Mes	0,16	<0,0001*
Acompañante*Mes	3,96	0,1024
Tratamiento*Acompañante*Mes	1,39	0,3891
* Efecto significativo a un nivel de 5 %		
b) Altura de plántulas		
Fuente de variación	Estadístico F	Valor-p
Tratamiento de fertilización	6,60	0,0014*
Acompañante	0,90	0,4078
Mes	373,61	<0,0001*
Tratamiento*Acompañante	0,83	0,5043
Tratamiento*Mes	4,72	<0,0001*
Acompañante *Mes	1,23	0,2103
Tratamiento*Acompañante*Mes	1,06	0,3631
* Efecto significativo a un nivel de 5 %		
c) Hojas totales		
Fuente de variación	Estadístico	Valor-p
Tratamiento de fertilización	36,53	$1,17 \times 10^{-8}$ *
Acompañante	3,85	0,1457
Mes	4132,13	$<2,20 \times 10^{-16}$ *
Tratamiento*Acompañante	2,17	0,7045
Tratamiento*Mes	148,72	$<2,20 \times 10^{-16}$ *
Acompañante *Mes	18,71	0,0957
Tratamiento*Acompañante*Mes	12,24	0,9771
* Efecto significativo a un nivel de 5 %		
d) Clorofila		
Fuente de variación	Estadístico F	Valor-p
Tratamiento	5,49	0,0046*
Acompañante	0,49	0,6099
Tratamiento*Acompañante	0,03	0,9984
* Efecto significativo a un nivel de 5 %		

En la **tabla 1b** se presenta el análisis de varianza del modelo seleccionado, el cual evidenció un efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$) del tratamiento de fertilización y de la interacción entre tratamiento y mes, como ocurrió con la variable de diámetro del tallo, lo cual sugiere que la altura de las plántulas de café aumentó en el tiempo dependiendo solamente del tratamiento de fertilización utilizado y no del acompañante.

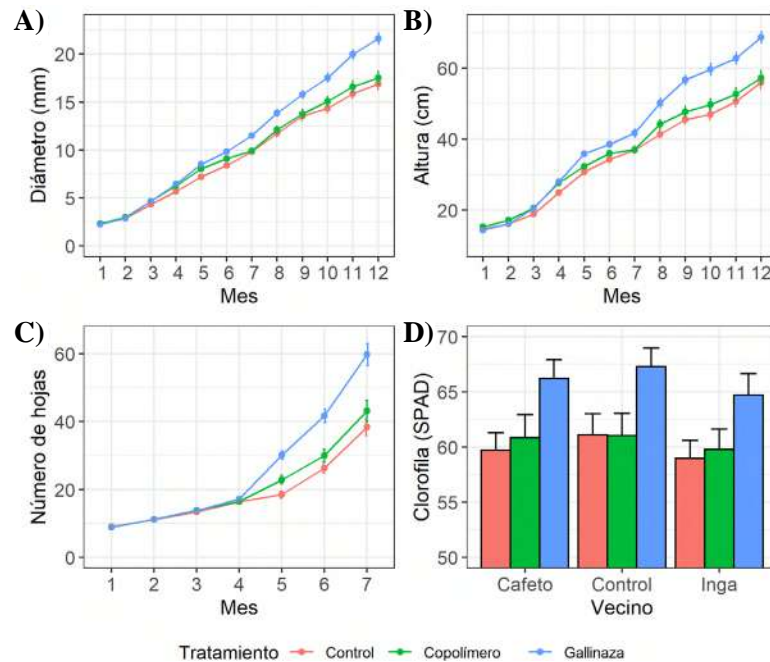


Figura 3. Gráfico de medias con errores estándar para: **a)** diámetro de los cafetos foco según tratamiento de fertilización; **b)** altura de plántulas según la fertilización; **c)** número de hojas totales según el tratamiento; **d)** cantidad de clorofila según el tratamiento. Colores: azul indica gallinaza, verde indica copolímero, y rosado indica control.

Las pruebas de comparación múltiple de Tukey (**Tabla S5**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>) entre los tratamientos para cada uno de los momentos evaluados evidenciaron que, a partir del cuarto mes, el tratamiento con gallinaza difirió del control (gallinaza: media=28,06cm, DE=5,31cm; control: media=24,94 cm, DE=4,76 cm); lo mismo sucedió entre los tratamientos de gallinaza y copolímero a partir del séptimo mes de análisis, presentando mayores alturas medias el tratamiento con gallinaza (gallinaza: media=43,02 cm, DE=16,66 cm; copolímero: media=37,02 cm, DE=8,80cm) (**Figura 3b**). Entre el control y el copolímero solamente se observaron diferencias significativas en el tercer mes de análisis (copolímero: media=27,69 cm, DE=4,69 cm; control: media=24,94 cm, DE=4,76 cm).

Hojas totales

El análisis de varianza del modelo lineal generalizado mixto con distribución de errores binomial negativa evidenció un efecto marcadamente significativo del tratamiento de fertilización, siendo mayor para la gallinaza, pero también de la interacción entre tratamiento y mes (**Tabla 1c**, **Figura 3c**), lo cual indica que el número total de hojas en las plántulas de café cambió en el tiempo dependiendo del tratamiento aplicado y no del acompañante. Las pruebas de comparación múltiple de Tukey entre los tratamientos en cada uno de los momentos evaluados (**Tabla S6**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>) mostraron que a partir del quinto mes hubo una diferencia entre los tratamientos analizados (gallinaza: media=30,1, DE=11,4; copolímero: media=22,8, DE=12,0; control: media=18,5, DE=9,7). En los dos últimos meses de evaluación (mes 6 y 7) se presentaron diferencias significativas entre el control y el copolímero con el tratamiento de gallinaza, el cual produjo una mayor la cantidad de hojas (**Figura 3c**).

Cantidad relativa de clorofila

Según el AIC y el criterio de probabilidad logarítmica (*log-likelihood*), el mejor modelo encontrado presentó un efecto aleatorio debido a las dos mediciones realizadas en cada

plántula de café (dos hojas) y una estructura de varianza heterogénea debida a la interacción entre los factores de tratamiento y acompañante (**Tabla S7**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>). El modelo seleccionado indicó que la clorofila cambió según el tratamiento (**Tabla 1d**), presentándose mayor cantidad de clorofila media con la gallinaza (media=66,07, DE=12,10) que con el control (media=59,92, DE=12,26; prueba post-hoc: $p=0,0084$) y el copolímero (media=60,56, DE=14,77; prueba *post hoc*: $p=0,0190$), sin diferencias significativas entre estos dos últimos (prueba *post hoc*: $p=0,9439$) (**Figura 3d**).

Discusión

Contrario a la hipótesis planteada, la presencia de plántulas de guamo no tuvo ningún efecto sobre el crecimiento de las plántulas de café. Más aún, no se observó un efecto estadísticamente significativo durante el primer año de crecimiento cuando la planta adyacente o acompañante era otra plántula de café ni al contrastarlo con el cafeto solo. Este es un hallazgo notorio dado que se podría esperar un crecimiento mayor de la plántula de café sin planta acompañante.

Este resultado sugiere que, durante el primer año de crecimiento, las plántulas de café no se ven afectadas ni por la presencia de un congénere, que podría estar generando competencia intraespecífica, ni por la de una leguminosa de crecimiento rápido como lo es el guamo, lo que podría estar causando competencia interespecífica o facilitación (**Vandermeer**, 1989). La competencia por recursos (luz, nutrientes) puede inhibir el crecimiento de las plantas cuando interactúan agrónomicamente, en tanto que la facilitación puede favorecerlas (generación de un ambiente propicio por parte de la planta acompañante) (**Vandermeer**, 1989).

Efecto de la planta acompañante

A lo largo del año de mediciones no se registró ningún efecto por la presencia de la planta acompañante sembrada a 20 cm de distancia. El experimento se dio por terminado después de un año porque, con el crecimiento de los cafetos y los guamos comenzó la sobreposición de doseles y en los siguientes meses las unidades experimentales (es decir, el cafeto y su acompañante, y los bloques de fertilización diferencial) dejarían de ser independientes (**Figura 1b**).

Este resultado neutro, a pesar de no respaldar la hipótesis inicialmente enunciada, apoya la idea de que es razonable sembrar árboles de *I. densiflora* durante el establecimiento del cultivo del café a partir de la plántula, pues no afecta su desarrollo por competencia interespecífica. Más aún, esta ausencia de efecto durante el primer año podría convertirse en ventaja a largo plazo por diversas razones. Primero, se ha demostrado que las dinámicas hidrológicas cuando hay árboles favorecen la resiliencia de los cafetales (**Gaitán, et al.**, 2016), el uso y el drenaje del agua, lo que disminuye el estrés por agua (**Cannavo, et al.**, 2011) en los cafetales neotropicales, que suelen ser dependientes de la lluvia. Segundo, a nivel nutricional, la ventaja aumenta cuando se establecen las asociaciones mutualistas del guamo con bacterias fijadoras de nitrógeno (**Bianco**, 2020) y con micorrizas, lo que permite una mejor incorporación de nutrientes en el suelo (**Picone**, 2002). El guamo establece relaciones simbióticas facultativas con microorganismos, aumentando la nodulación por bacterias, especialmente cuando la disponibilidad de nitrógeno es baja (**Batterman, et al.**, 2013). La planta también puede invertir metabolitos para producir exudados de fosfatasas extracelulares y para establecer relaciones con simbiontes micorrícicos, pero está limitada por la disponibilidad de fósforo (**Batterman, et al.**, 2013).

Se ha demostrado que el guamo en los cafetales produce un mayor porcentaje de nitrógeno total en el suelo circundante (2,3 % *I. micheliana* vs. 1,8 % *Alchornea latifolia*) (**Aponte-Rolón**, 2018), y en su presencia ocurren menores tasas de relación carbono/nitrógeno (C:N) (20 en *I. micheliana* Vs. 27 en *A. latifolia*), lo que podría favorecer los cafetos adyacentes (**Aponte-Rolón**, 2018). El beneficio para las características del suelo en cafetales con sombra de guamo fue demostrado por **Cardona-Calle & Sadeghian-**

Khalajabadi (2005) en siete departamentos cafeteros de Colombia (Antioquia, Caldas, Cauca, Huila, Quindío, Tolima y Valle), donde se encontró una mayor cantidad de materia orgánica, porosidad, humedad, y menor compactación (resistencia a la penetración, menor densidad aparente) que en los cafetales establecidos a pleno sol (libre exposición), aunque en estos últimos hubo mayores contenidos de azufre y potasio. Cabe anotar que en los resultados de estos autores (2005) se registraron valores muy fluctuantes de las variables descritas en los diferentes departamentos cafeteros colombianos (**ver las tablas 2-4 y las figuras 2-8** de los datos reportados por estos autores). Los árboles acompañantes se convierten en fuente constante de hojarasca y, en ocasiones, de flores y frutos, que, al caer, forman un colchón en el suelo (**Muñoz-Gómez**, 2012), favoreciendo el agroecosistema. **Osorio-Moreno** (2004) encontró que la mineralización de nitrógeno a partir de hojas verdes de guamo (*I. densiflora*) por semana fue de 19,40 mg N/kg de suelo, una de las mayores de siete especies de árboles acompañantes de cafetales en Costa Rica (*Erythrina poeppigiana*, *I. edulis*, *Cordia alliodora*, *Eucalyptus deglupta*, *I. densiflora*, *Terminalia amazonia*, *T. ivorensis*) y este mismo valor en la hojarasca de *I. densiflora* fue de 3,93 mg N/kg, una de las mayores después de *I. edulis*. La descomposición lenta de este colchón de hojarasca asegura un constante suministro de nutrientes para los cafetos.

A largo plazo, la presencia de *I. densiflora* en cafetales puede proveer múltiples beneficios sociales, así como para la fauna silvestre y el ambiente. El guamo provee un microclima amortiguador para los cafetos y contribuye con un 60 % de la biomasa total, sin disminuir la producción si se maneja la poda adecuadamente (**Siles & Harmand**, 2010). En Ecuador se encontró que el mayor crecimiento (diámetro y altura) del café se presentó en combinación con *I. edulis* (**Muñoz-Gómez**, 2012). Además, se demostró que este agroforestal es de mucha importancia como sumidero de carbono, como se demostró en Costa Rica cuando el depósito de carbono en siete años de establecimiento de cafetales con *I. densiflora* fue 2,57 veces mayor que en los cafetales sin árboles (**Hergoulac'h, et al.**, 2012), caso en que el agroforestal presentó 25,2 mg de carbono por ha. Para enero del 2021, después de tres años y medio de establecido el experimento del presente estudio, se observó un crecimiento de los árboles de aproximadamente 5 m y ninguno de los árboles de *I. densiflora* murió (**Figura 1b**), aunque sí 16 cafetos de control sin fertilización y con copolímero (a partes iguales). No se conoce la causa de la muerte de estos cafetos.

Efecto de la fertilización

El crecimiento significativamente mayor de las plántulas con gallinaza es congruente con la hipótesis inicial y coincide con lo reportado en otros estudios (**Ávila-Reyes, et al.**, 2010; **Ridwan-Lubis, et al.**, 2017; **Tipan-Tuinga**, 2017). La gallinaza es uno de los abonos orgánicos más comúnmente utilizados por los pequeños campesinos en cultivos como el maíz y el fríjol (**Armbrecht, et al.**, 2011) en la zona de estudio. Este abono consiste de excretas de gallinas mezcladas con cascarilla de arroz (ocasionalmente viruta de madera) que no se ha sometido a compostaje cuando se adquiere. Sus propiedades físicas tienen efecto en el suelo, con un nivel alto de materia orgánica (43-68 %) (**Tipan-Tuinga**, 2017), una densidad de aproximadamente 0,33 g/cm³, un 41 % de cenizas, capacidad de retención de humedad de 169 %, y pH de 7,4 (**Estrada-Pareja**, 2004); además, la composición química de la gallinaza provee aproximadamente 1,9 a 2,9 % de nitrógeno total (**Estrada-Pareja**, 2004; **Tipan-Tuinga**, 2017), 1 % de fósforo total y 1,2 % de potasio, siendo la relación carbono/nitrógeno de 10,1 %, y la capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE) de 35 meq/100 g, la cual se considera alta.

El aporte de gallinaza, por lo tanto, favorece el crecimiento del café. Se ha encontrado que la mezcla óptima de gallinaza con suelo es de 20-25 % de volumen de gallinaza para café en almacigo, lo que resulta en un mayor peso seco de las plántulas de café (**Ávila-Reyes, et al.**, 2010). El volumen relativo de gallinaza aplicado en el presente estudio fue menor, entre 5 y 10 %, y no se aplicó en almacigo, por lo que no es comparable.

Un resultado notable de este estudio fue la ausencia de diferencias entre el copolímero orgánico y el control, pues se esperaba un mayor crecimiento de las plántulas con este

producto, resultado que se explicaría por dos razones. Primero, porque no hubo estrés hídrico durante el estudio y el copolímero hidratado está diseñado para contrarrestarlo (no se cuantificó la precipitación, pero hubo por lo menos un evento de lluvia cada semana a partir de septiembre 16). El copolímero es un acondicionador orgánico que se hidrata y permite que la raíz absorba agua directamente al entrar en su contacto, por lo que es beneficioso cuando se presenta estrés hídrico, y este no fue el caso durante el experimento, y, por consiguiente, las raíces no necesitaron crecer buscando la humedad que provee el copolímero hidratado (**Figura 2b**). La segunda razón es que el suelo del lote experimental era ácido, con un pH de menos de 5,0 (los valores <5,5 se consideran extremadamente ácidos) y poca materia orgánica (1,93 % en promedio, n=15 muestras) y el copolímero es más un coadyuvante o acondicionador del suelo que un fertilizante, aunque, según el proveedor, puede suministrar pequeñas cantidades de nitrógeno fósforo y potasio (el proveedor no especifica las cantidades). Es de anotar que es posible que la cantidad aplicada no haya rebasado las necesidades de las plántulas.

Conclusiones

Durante el primer año de crecimiento de las plántulas de café en un suelo ácido de la zona cafetera del suroccidente colombiano, la presencia de *I. densiflora* no inhibió su crecimiento, pero tampoco lo favoreció. La fertilización orgánica con gallinaza, por el contrario, produjo un impacto positivo muy notable sobre el crecimiento de las plántulas de café, algo que no se evidenció con la dosis aplicada del copolímero hidratante acondicionador.

Agradecimientos

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a Manuel Antonio Velasco, Nelly Velasco-Otero y Florentino Puní, por su invaluable ayuda en todas las labores de campo; a Gerardo Peñaranda, por su contribución logística a lo largo de la investigación; a la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle, por la pasantía de semillero de investigación concedida a Nicole Vargas-García; al laboratorio de imágenes del Postgrado en Ciencias-Biología, a cargo de Juan Felipe Ortega, por la labor de ajuste de las figuras y fotografías, y al Programa Nacional de Ciencias Básicas de Colciencias (contrato RC. No. 0648-2013), por el apoyo financiero.

Información suplementaria

Tabla 1S. Promedio del porcentaje de cobertura vegetal. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 2S. Modelos considerados para el análisis de la variable de diámetro de tallos. Ver tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 3S. Prueba de comparación múltiple de Tukey para la variable de diámetro de tallos. Ver tabla 3S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 4S. Modelos considerados para el análisis de la variable de altura de las plántulas. Ver tabla 4S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 5S. Prueba de comparación múltiple de Tukey para la variable de altura de las plántulas. Ver tabla 5S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 6S. Prueba de comparación múltiple de Tukey para la variable de hojas totales. Ver tabla 6S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Tabla 7S. Modelos considerados para el análisis de la variable clorofila. Ver tabla 7S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1380/3134>

Contribución de los autores

IA: diseño y establecimiento del experimento, recolección de datos y literatura, interpretación y análisis de resultados y escritura del manuscrito. WT: establecimiento del

experimento, análisis estadístico, recolección de datos y literatura, interpretación y análisis de resultados y escritura del manuscrito. NVG: recolección de datos y literatura, interpretación y análisis de resultados y escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Alvarado, G., Cortina H.A., Posada, H.E.** (2005). Castillo: nueva variedad de café con resistencia a la Roya. *Avances técnicos Cenicafé*. **337**: 1-8. ISSN - 0120-0178.
- Aponte-Rolón, B.A.** (2018). Effects of quality of leaf litter on ant assemblages in a shade-grown coffee agroecosystems in Chiapas, México. MSc. Thesis. University of Michigan. School for Environment and Sustainability, Ann Arbor, MI, U.S.A.
- Arenas-Clavijo, A. & Armbrrecht, I.** (2019). Soil ants (Hymenoptera: Formicidae) and ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in a coffee agroforestry landscape during a severe-drought period. *Agrofor. Syst.* **93** (5): 1781-1792. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0283-x>
- Armbrrecht, I., Ascúntar-Osnas, O., Daza, M., Galindo, V., Giraldo, C., Henao, N., Montoya-Lerma, J., Peña, I., Ramos, M., Reyes, A., Sanabria, C.** (2011). Influencia de dos acondicionadores orgánicos del suelo sobre el crecimiento de un policultivo de maíz y frijól. *Rev. EIDENAR*. **10**: 93-100.
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A.J., Morales, C.** (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Secur.* **7**: 303-321. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- Ávila-Reyes, W.E., Sadeghian-Khalajabadi, S., Sánchez-Arciniegas, P.M., Castro-Franco, H.E.** (2010). Respuesta del café al fósforo y abonos orgánicos en la etapa de almácigo. *Cenicafé*. **61** (4): 358-369.
- Batterman, S.A., Wurzburger, N., Hedin, L.O.** (2013). Nitrogen and phosphorus interact to control tropical symbiotic N₂ fixation: a test in *Inga punctata*. *J. Ecol.* **101**: 1400-1408. Doi: [10.1111/1365-2745.12138](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12138)
- Bentley, J.W., Boa, E., Stonehouse, J.** (2004). Neighbor trees: shade, intercropping and cacao in Ecuador. *Hum. Ecol.* **32**: 241-270. Doi: [10.1023/B:HUEC.0000019759.46526.4d](https://doi.org/10.1023/B:HUEC.0000019759.46526.4d)
- Bianco, L.** (2020). Principales aspectos de la nodulación y fijación biológica de nitrógeno en Fabáceas. *IDESIA*. **38** (2): 21-29.
- Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J.-M., Siles, P., Dreyer, E., Vaast, P.** (2011). Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agric., Ecosyst. Environ.* **140**: 1-13. Doi: [10.1016/j.agee.2010.11.005](https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.005)
- Cardona-Calle, D.A. & Sadeghian-Khalajabadi, S.** (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé*. **56** (4): 348-364.
- Chait, G.** (2015). Capítulo 16. Café en Colombia: servicios ecosistémicos, conservación de la biodiversidad. En F. Montagnini, E. Somarriba, E., Murgueitio, H., Fassola y B. Eibl. (Eds.) *Sistemas Agroforestales, Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Serie técnica 402*, CATIE, Turrialba, Costa Rica (349-362). Cali, Colombia: Editorial CIPAV.
- DaMatta, F.** (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Res.* **86**: 96-104. Doi: [10.1016/j.fcr.2003.09.001](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001)
- Estrada-Pareja, M.N.** (2004). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Rev. Lasallista Invest.* **2** (1): 43-48.
- Gaitán, L., Armbrrecht, I., Graefe, S.** (2016). Throughfall and soil properties in shaded and unshaded coffee plantations and a secondary forest: a case study from Southern Colombia. *J. Agric. Rural Dev. Trop. and Subtrop.* **117** (2): 309-321.
- Gómez, S., Torres, V., Medina, Y., Rodríguez, Y., Sardiñas, Y., Herrera, M., Rodríguez, R.** (2019). Aplicación del modelo lineal mixto y lineal generalizado mixto, como alternativas de análisis en experimentos con medidas repetidas. *Cuban J. Agric. Sci.* **53** (1):7-12.
- Groom, A.** (2012). *Inga densiflora*. The IUCN red list of threatened species 2012: T19892089A 20137776. Fecha de consulta: 21 de octubre de 2019. Recuperado de: <https://www.iucnredlist.org/species/19892089/20137776>

- Hergoualac'h, K, Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C., Harmand, J.-M.** (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agric., Ecosyst. Environ.* **148**: 102-110. Doi: 10.1016/j.agee.2011.11.018
- Muñoz-Gómez, M.V.** (2012). Estudio del comportamiento vegetativo y rendimiento de café robusta (*Coffea canephora*), asociado con tres leguminosas forestales, guaba de bejuco (*Inga edulis*), guarango (*Parkia balsevii*), dormilón espinudo (*Piptadenia pterocladia*) establecido en el campo lago agrio de Petro producción. Trabajo de grado para Ingeniero agrónomo. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
- Osorio-Moreno, V.E.** (2004). Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café. Tesis de MSc., CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Picone, C.** (2002). Managing mycorrhizae for sustainable agriculture in the tropics. En: J.H. Vandermeer (Ed.). *Tropical Agroecosystems* (95-129). U.S.A. CRC press.
- Rapidel, B., Allinne, C., Cerdán, C., Meylan, L., Virginio, E., Avelino, J.** (2015). Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. Capítulo 1, En F. Montagnini, E. Somarriba, E., Murgueitio, H., Fassola y B. Eibl. (Eds.) *Sistemas Agroforestales, Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales* (5-20). Serie técnica 402, CATIE, Turrialba, Costa Rica (349-362). Cali, Colombia: Editorial CIPAV.
- R Development Core Team** (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Fecha de consulta: 21 de octubre de 2019. Recuperado de: <https://www.R-project.org/>
- Ridwan-Lubis, A., Mawarni, L., Sipayung, R.** (2017). Growth response of robusta coffee seedling to the application of chicken manure and liquid organic fertilizer. *J. Agroekoteknologi.* **5** (3): 692-696.
- Ribeiro da Cunha, A., Katz, I., de Pádua, A., Martínez, R.** (2015). Índice SPAD en el crecimiento y desarrollo de plantas de *lisianthus* en función de diferentes dosis de nitrógeno en ambiente protegido. *IDESIA.* **33** (2): 97-105. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000200012>
- Siles, P. & Harmand, J.** (2010). Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agrofor. Syst.* **78**: 269-286. Doi: 10.1007/s10457-009-9241-y
- Tipan-Tuinga, T.J.** (2017). Caracterización de la calidad del abono de aves de postura y de engorde (*Gallus gallos domesticus*), utilizado en la agricultura de San José de Puñachizag, Cantón Quero. Trabajo de grado Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Cevallos, Ecuador.
- Urrutia-Escobar, X. & Armbrecht, I.** (2013). Effect of two agroecological management strategies on ant (Hymenoptera: Formicidae) diversity on coffee plantations in Southwestern Colombia. *Environ. Entomol.* **42** (2): 194-203. Doi: 10.1603/EN11084
- Vandermeer, J. H.** (1989). *The Ecology of Intercropping*. Cambridge University Press. Cambridge, U.K. p. 231.
- Vandermeer, J. H.** (2011). *The ecology of agroecosystems*. Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, Massachusetts. 387p.

Artículo original

Distribución altitudinal de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables ambientales en un sistema fluvial amazónico (Perú)

Altitudinal distribution of aquatic macroinvertebrates and its relation to environmental variables in an Amazon river system (Perú)

✉ Jerry Arana-Maestre^{1,*}, ✉ Daniel Álvarez-Tolentino², ✉ Rafael Miranda³, ✉ Ibon Tobes^{3,4},
✉ Julio Araujo-Flores^{5,6,7}, ✉ Carlos Carrasco-Badajoz⁸, ✉ Carolina Rayme-Chalco⁸

¹Departamento de Limnología, Museo de Historia Natural, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

²Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Moquegua, Perú

³Departamento de Biología Ambiental, Universidad de Navarra, España

⁴Centro de Investigación de la Biodiversidad y Cambio Climático (BioCamb) e Ingeniería en Biodiversidad y Recursos Genéticos, Facultad de Ciencias de Medio Ambiente, Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito-Ecuador

⁵Department of Biology and Center for Energy, Environment, and Sustainability, Wake Forest University, USA

⁶Centro de Innovación Científica Amazónica, Puerto Maldonado, Madre de Dios, Perú

⁷Colección Científica de Ictiología, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú

⁸Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de Información Geográfica (BioSIG), Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

Resumen

Hay pocos estudios ecológicos sobre los patrones de diversidad de los macroinvertebrados acuáticos en la Amazonía peruana, a pesar de ser esenciales para la gestión y manejo de estos ecosistemas fluviales. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue determinar su composición taxonómica y su relación con las variables ambientales a lo largo de un gradiente altitudinal del río Alto Madre de Dios, cuenca en donde podrían registrarse nuevas especies. Se establecieron 22 estaciones en un rango altitudinal de 398 a 2.411 m s.n.m., cuantificando las características fisicoquímicas del agua y del hábitat fluvial: pH, temperatura del agua (T, °C), conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), ancho del río (A, m), profundidad (P, cm), sombra y velocidad del flujo de la corriente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Para los muestreos de macroinvertebrados se utilizó una red “de patada” de 200 μm de tamaño de malla. Se identificaron 56 taxones distribuidos en los órdenes Acari, Ephemeroptera, Coleoptera, Diptera, Hemiptera, Megaloptera, Odonata, Plecoptera, Trichoptera y Decapoda. Los análisis multivariados de clasificación y agrupamiento permitieron establecer cuatro grupos de estaciones estadísticamente diferenciadas ($p < 0,05$), principalmente por la velocidad y el tipo de sustrato dominante, lo que explica la abundancia y amplia distribución de Chironomidae, *Baetodes*, *Thraulodes* y *Anacroneturia*. Los taxones de macroinvertebrados cambiaron notablemente a lo largo del gradiente, reportándose una mayor diversidad en zonas con altitudes medias y una relación con las variables ambientales.

Palabras claves: Composición; Abundancia; Invertebrados dulceacuícolas; Distribución.

Abstract

In the Peruvian Amazon, there are few ecological studies on the diversity patterns of aquatic macroinvertebrates, essential for the management of these fluvial ecosystems. In such context, our objective was to determine the taxonomic composition and its relationship with environmental variables along an altitude gradient of the Alto Madre de Dios River, a basin with the potential to register new species. We established 22 stations in an altitudinal range from 398 to 2411 masl and evaluated the water physicochemical characteristics and the fluvial habitat: pH, water temperature

Citación: Arana-Maestre J, Álvarez-Tolentino D, Miranda R, et al. Distribución altitudinal de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables ambientales en un sistema fluvial amazónico (Perú). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1097-1112, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1436>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Jerry Arana Maestre;
jaranam@unmsm.edu.pe

Recibido: 4 de abril de 2021

Aceptado: 7 de septiembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

(T, ° C), electrical conductivity (CE, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), river width (A, m), depth (P, cm), shadow, current flow speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and depth. We took macroinvertebrate samples with a 200- μm -mesh-size kick net and identified 56 taxa distributed in the orders Acari, Ephemeroptera, Coleoptera, Diptera, Hemiptera, Megaloptera, Odonata, Plecoptera, Trichoptera, and Decapoda. In the multivariate classification and grouping analysis, four groups of statistically differentiated stations ($p < 0,05$) were classified, mainly by speed and the type of dominant substrate, which explains the abundance and wide distribution of Chironomidae, *Baetodes*, *Traulodes*, and *Anacroneturia*. Macroinvertebrate taxa changed notably along the gradient reporting a greater diversity in areas with middle altitudes and a relationship with environmental variables.

Keywords: Composition; Abundance; Freshwater invertebrates; Distribution.

Introducción

Pese a la presión antropogénica que lo está degradando (Laurance, *et al.*, 2014; Campbell, *et al.*, 2018), el sistema fluvial del Amazonas todavía alberga una gran riqueza de especies de vertebrados e invertebrados de agua dulce, lo que requiere una adecuada gestión, así como el desarrollo y adaptación de herramientas para recopilar e interpretar información sobre los patrones de diversidad (Lessmann, *et al.*, 2016; Jézéquel, *et al.*, 2020). Es preocupante que muchas especies de invertebrados tropicales están poco documentadas en comparación con las europeas y norteamericanas (Touron-Poncet, *et al.*, 2014; Sarremejane, *et al.*, 2020).

Los ecosistemas fluviales tienen a los macroinvertebrados acuáticos como uno de los principales componentes biológicos y en gran medida son responsables del flujo de energía desde los productores primarios a niveles superiores (Walteros & Castaño, 2020). El conocimiento de los macroinvertebrados en América del Sur es aún escaso y gran parte de la información se halla dispersa en publicaciones europeas, norteamericanas y suramericanas (Roldán-Pérez, 2016; De León, *et al.*, 2020). Los avances en su descripción y la comprensión de su relación con patrones geográficos y rangos altitudinales también son limitados (Jacobsen, 2004; Castro, *et al.*, 2019).

Una de las cuencas poco estudiadas en la Amazonía peruana es la del río Alto Madre de Dios, la cual nace en la parte oriental de la cordillera de Vilcanota y hace parte del sistema fluvial del Amazonas y forma el río Madre de Dios la confluencia con el río Manu, lo que constituye el sistema fluvial más importante del sureste de Perú (Figueroa & Stucchi, 2010). En esta cuenca existen asentamientos humanos (colonos) y comunidades nativas que desarrollan la agricultura y extracción forestal como principales actividades económicas (Mayor & Bodmer, 2009).

En este contexto, el conocimiento de la distribución y diversidad de los macroinvertebrados acuáticos en el gradiente altitudinal contribuirá a desarrollar acciones de gestión y conservación adecuadas, por lo que se propuso evaluar su diversidad y su relación con algunas variables ambientales a lo largo del gradiente altitudinal de la cuenca del río Alto Madre de Dios.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la cuenca del río Alto Madre de Dios, en la zona de amortiguamiento de la Reserva de Biosfera del Manu (12°08' S y 71°40' O), entre las provincias de Paucartambo (departamento del Cusco) y Manu (departamento de Madre de Dios) en el sur de Perú. El río Alto Madre de Dios fluye de sur a norte durante 275 km, drenando un área aproximada de 1.600 km². El gradiente altitudinal va desde los 3.500 a los 300 m s.n.m. hasta su unión con el río Manu, abarcando cinco zonas de vegetación andina: puna (4.500-3.500 m), bosque de nubes superior (3.500-2.500 m), bosque de nubes inferior (2.500-1.000 m), piedemonte (1.000-400 m) y tierras bajas (400-50 m) (Brack & Mendiola, 2000).

Se tomaron muestras en 22 estaciones (**Tabla 1**): la de mayor altitud a 2.411 m s.n.m. y la de menor altitud, a 398 m s.n.m. 80 km río abajo (**Figura 1**). Los ríos fluyen a través de profundos y estrechos valles y laderas escarpadas desde la fuente hasta alrededor de los 700 m s.n.m., para luego abrirse en amplias planicies de inundación de tierras bajas. El régimen de caudal está influenciado por la presencia de precipitaciones estacionales con mayor descarga entre noviembre y abril.

Actualmente, la mayor parte del área adyacente al río Alto Madre de Dios todavía está cubierta por bosque primario amazónico, aunque parte de ella fue deforestada y el suelo se utiliza para la ganadería (**Hamilton, et al., 2007**). También hay presencia de instalaciones turísticas con hostales y una red de senderos forestales que son utilizados por un número relativamente bajo de turistas (**Yu, et al., 1997**).

Tabla 1. Ubicación y descripción de las estaciones de muestreo en la cuenca del río Alto Madre de Dios (Perú)

Estaciones de muestreo	Descripción	Coordenadas		Altitud (m s.n.m.)
		Sur	Oeste	
01R	Río Madre de Dios en la localidad de Aguas Calientes	12°40'18"	71°16'02"	398
02R	Río Shintuya en la localidad de Shintuya	12°40'17"	71°18'18"	424
03A	Quebrada Anaconda en la localidad de Shintuya	12°40'54"	71°17'50"	428
04Q	Quebrada Mascuitania en la localidad de Mascuitania	12°47'24"	71°23'09"	459
05Q	Quebrada Puente a 2,50 Km en la localidad de Dos Cincuenta	12°41'18"	71°20'54"	462
06R	Río Carbón en la localidad de Atalaya	12°53'33"	71°20'56"	499
07R	Río Pilcopata en la localidad de Villa Carmen	12°53'44"	71°23'59"	511
08R	Piñi-Piñi en la localidad de Villa Carmen	12°53'19"	71°24'21"	518
09Q	Quebrada Piñi-Piñi en la localidad de Villa Carmen	12°53'19"	71°24'21"	518
10R	Río Hospital en la localidad de comunidad nativa Huacari	12°55'14"	71°25'21"	547
11R	Río Tono en la localidad de comunidad nativa Huacari	12°55'01"	71°25'44"	551
12R	Río Salvación en la localidad de Salvación	12°50'23"	71°21'09"	558
13R	Río Queros en la localidad de Pampa Azul	12°58'07"	71°20'28"	587
14R	Río Sabaluyoc en la localidad de Sabaluyoc	12°57'27"	71°20'09"	593
15A	Aguajal en la localidad de Agua Santa	12°56'33"	71°24'46"	622
16R	Río Kosñipata en la localidad de Asunción	13°00'36"	71°25'50"	720
17Q	Quebrada Quitacalzón en la localidad de Consuelo	13°01'34"	71°29'59"	1064
18R	Río Kosñipata en la localidad de San Pedro	13°03'23"	71°32'36"	1347
19R	Río San Pedro en la localidad de San Pedro	13°03'19"	71°32'48"	1394
20R	Río Unión en la localidad de Unión	13°04'17"	71°34'11"	1673
21Q	Quebrada Américo en la localidad de Wayquecha	13°07'46"	71°34'41"	2218
22Q	Río Pacchayoc en la localidad de Pacchayoc	13°09'30"	71°35'51"	2411

R: ríos, Q: quebradas y A: aguajal

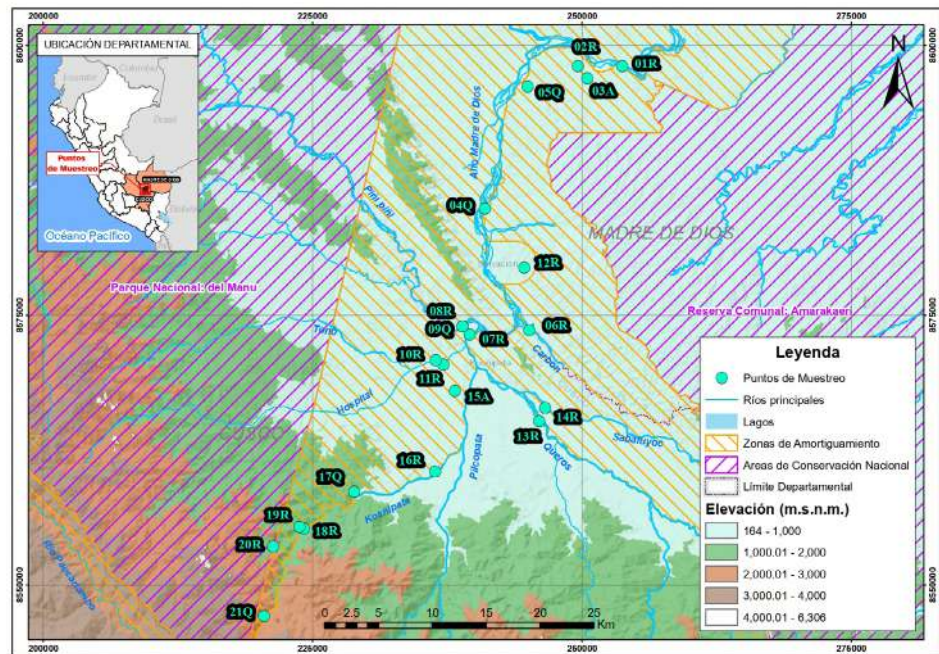


Figura 1. Mapa del sistema fluvial de la cuenca del río Alto Madre de Dios (Cusco-Madre de Dios) con la ubicación de las 22 estaciones de muestreo. R: ríos, Q: Quebradas y A: Aguajal

Muestreo

El muestreo se realizó en junio del 2012, durante la época seca. Se eligió la época de vaciante debido a la mayor estabilidad ambiental y biótica, además de ser un período más seguro para el muestreo (**Henriques-Oliveira & Nessimian, 2010**).

Se determinaron las siguientes características fisicoquímicas: potencial de hidrógeno (pH), temperatura (T, °C) y conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$) empleando un multiparámetro portátil HI-98129 (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA).

El hábitat se caracterizó a partir de la medición del ancho del río (A, m), la profundidad (P, cm), la velocidad de la corriente (V, m/s), el sustrato dominante y el porcentaje de sombra en transectos según la recomendación de **Armantrout (1998)**. En cada estación de muestreo se establecieron cinco transectos a lo largo del río, con tres puntos de muestreo en cada uno. Las profundidades se midieron con una regla graduada de metal, se determinaron los porcentajes y se clasificaron en tres grupos: baja (PB, <30 cm), media (PM, 30-60 cm) y alta (PA, >60 cm). Las velocidades de corriente se midieron con un reómetro (Speed Coach OC 2, Nielsen-Kellerman Co., Boothwyn, PA, USA) y se clasificaron en cuatro grupos: baja (VB, <0,3 m/s), media (VM, 0,3-0,75 m/s), alta (VA, 0,76-1,2 m/s) y muy alta (VMA, >1,2 m/s). El sustrato dominante se clasificó como fino (F, < 2 mm), de gravas (G, 2-64 mm), canto rodado (CR, 64-256 mm), piedras (PI, >256 mm) y rocas.

Para la recolección de los macroinvertebrados acuáticos se utilizó una red de patada (tamaño de malla 200 μm) y se emplearon 20 patadas de esfuerzo. Todas las muestras fueron compuestas (multihábitat) hasta formar una única muestra representativa de cada estación de muestreo, y se conservaron en etanol al 70 %. En el laboratorio se identificaron hasta el nivel taxonómico más bajo utilizando claves y descripciones taxonómicas especializadas (**Roldán, 1996; Manzo, 2005; Domínguez, et al., 2006; Merrit, et al., 2008; Domínguez & Fernández, 2009**), para luego contabilizarlas a nivel de familia y género. Las muestras identificadas fueron depositadas en la colección de macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Limnología del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Análisis de datos

Los datos fisicoquímicos y del hábitat fluvial (variables ambientales) se transformaron a raíz cuadrada antes del análisis multivariado de clasificación y agrupamiento (Henriques-Oliveira & Nessimian, 2010), obteniéndose un dendrograma de distancia euclidiana. Se utilizó la prueba de Simproff ($p < 0,05$) con el dendrograma para identificar los grupos estadísticamente significativos (Oyanedel, *et al.*, 2008) y se hizo un análisis de componentes principales (ACP) para simplificar las 19 variables ambientales e identificar las de mayor importancia.

Los datos de abundancia de los taxones identificados se transformaron a $\log_{10}(X+1)$ para el análisis de correspondencia canónica (ACC), con el fin de inferir la relación entre los parámetros de mayor importancia y la presencia de taxones de invertebrados dulceacuícolas. Los análisis se hicieron con los paquetes Vegan (Oksanen, *et al.*, 2017) y FactoMineR del programa R, versión 3.5.1 (Lê, *et al.*, 2008)

Resultados

Características fisicoquímicas y del hábitat fluvial

Las características fisicoquímicas del agua y del hábitat fluvial presentaron variaciones a lo largo del gradiente altitudinal (Tabla 2). Entre las variaciones más relevantes estuvo el ancho (2,5-28,3 m), la profundidad media (5,1-57,4 cm) y la velocidad media (0,04-0,9

Tabla 2. Valores de los parámetros fisicoquímicos y características del hábitat fluvial obtenidos en las estaciones de muestreo en la cuenca del río Alto Madre de Dios (Perú)

Estación de muestreo	Fisicoquímicos/hábitat fluvial						Profundidades (%)			Velocidades (%)				Tipo de sustrato (%)				Sombra (%)	
	pH	T (°C)	CE (µS/cm)	A (m)	P (cm)	V (m/s)	PB	PM	PA	VB	VM	VA	VMA	F	G	CR	PI	R	S
01R	8,0	24,3	105,0	18,2	25,1	0,5	58,0	42,0	0,0	17,0	67,0	17,0	0,0	14,2	0,0	77,5	8,3	0,0	0,0
02R	8,1	24,4	99,0	11,2	13,7	0,2	100,0	0,0	0,0	58,0	42,0	0,0	0,0	46,7	15,8	35,0	2,5	0,0	41,7
03A	7,4	26,4	119,0	3,5	16,8	0,1	100,0	8,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	94,2	0,0	0,0	5,8	0,0	100,0
04Q	6,8	29,0	44,0	7,9	25,6	0,2	58,0	33,0	8,0	58,0	42,0	0,0	0,0	58,3	0,0	41,7	0,0	0,0	8,3
05Q	8,0	26,1	169,0	5,5	18,7	0,2	92,0	8,0	0,0	67,0	33,0	0,0	0,0	60,8	0,0	20,0	19,2	0,0	75,0
06R	8,8	26,3	102,0	14,4	34,5	0,4	33,0	50,0	17,0	17,0	75,0	8,0	0,0	15,0	2,5	82,5	0,0	0,0	16,7
07R	6,9	24,8	119,0	15,7	15,6	0,0	83,0	17,0	0,0	92,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,8	29,2	0,0	0,0
08R	6,9	22,3	131,0	6,9	44,1	0,2	17,0	67,0	17,0	67,0	33,0	0,0	0,0	58,3	0,0	0,0	41,7	0,0	0,0
09Q	7,2	22,3	126,0	4,5	5,1	0,1	100,0	0,0	0,0	78,0	22,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,3
10R	7,6	23,1	26,0	28,3	36,6	0,7	50,0	50,0	8,0	0,0	50,0	42,0	8,0	0,0	26,7	36,7	36,7	0,0	16,7
11R	7,7	19,1	50,0	6,9	22,1	0,3	83,0	17,0	0,0	25,0	75,0	0,0	0,0	19,2	22,5	58,3	0,0	0,0	0,0
12R	7,3	24,0	33,0	4,4	30,1	0,4	75,0	8,0	17,0	33,0	58,0	8,0	0,0	27,5	0,0	39,2	33,3	0,0	33,3
13R	8,0	20,0	61,0	10,4	39,5	0,3	17,0	83,0	0,0	42,0	58,0	0,0	0,0	14,2	2,5	78,3	5,0	0,0	0,0
14R	7,7	19,7	44,0	22,9	31,0	0,4	58,0	58,0	0,0	8,0	83,0	8,0	0,0	0,0	0,0	92,5	7,5	0,0	16,7
15A	5,8	23,9	26,0	2,5	57,4	0,0	9,0	36,0	55,0	100,0	0,0	0,0	0,0	97,5	2,5	0,0	0,0	0,0	83,3
16R	7,4	26,4	65,0	5,2	19,9	0,3	83,0	25,0	0,0	45,0	55,0	0,0	0,0	35,8	5,8	28,3	30,0	0,0	16,7
17Q	7,8	20,9	52,0	4,1	31,4	0,5	50,0	50,0	8,0	25,0	58,0	17,0	0,0	11,7	16,7	30,8	40,8	0,0	100,0
18R	7,5	22,2	89,0	6,4	24,4	0,2	67,0	33,0	0,0	75,0	25,0	0,0	0,0	70,0	0,0	0,0	30,0	0,0	0,0
19R	7,8	20,1	43,0	7,7	49,4	0,5	25,0	42,0	33,0	25,0	42,0	33,0	0,0	30,8	2,5	22,5	44,2	0,0	0,0
20R	7,7	20,2	64,0	8,4	32,0	0,7	50,0	58,0	0,0	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0	22,5	53,3	15,8	8,3	25,0
21Q	7,4	17,3	51,0	4,0	30,2	0,8	50,0	58,0	0,0	8,0	17,0	75,0	0,0	8,3	8,3	16,7	50,0	16,7	66,7
22Q	4,4	16,1	188,0	6,1	23,9	0,9	83,0	33,0	0,0	0,0	27,0	73,0	0,0	2,5	2,5	38,3	48,3	8,3	75,0

T=temperatura del agua; CE=conductividad eléctrica; A=anchura media; P=profundidad media; V=velocidad media; B= baja; M=moderada; A=alta, MA=muy alta, F=fino, G=grava, CR=canto rodado, PI=piedras, R=rocas y S=sombra

m/s); asimismo, el pH (4,4-8,8), la temperatura del agua (16,1-29 °C) y la conductividad eléctrica (26-188 $\mu\text{S}/\text{cm}$) aumentaron a medida que el gradiente disminuyó. El sustrato fino y el de canto rodado dominaron en las estaciones bajas. El porcentaje de sombra varió desde la condición abierta (0 %) hasta la totalmente cubierta (100 %).

Mediante los análisis de clasificación y ordenamiento de los datos ambientales registrados en las estaciones de muestreo, se conformaron cuatro grupos significativamente diferentes ($p < 0,05$) (**Figura 2A**). El grupo I (10R, 20R, 21Q y 22Q), conformado por estaciones ubicadas en las mayores altitudes, con excepción de la estación 10R (ubicada en altitudes medias), se caracterizó por el pH ligeramente alcalino (7,6; 7,7 y 7,4), excepto en la 22Q (4,4), mayores velocidades y predominio de sustratos de piedras y rocas. En las del grupo IV (08R, 12R, 15A, 16R, 17Q, 18R y 19R), de estaciones ubicadas en altitudes altas y medias, predominaron las conductividades eléctricas bajas, las velocidades y profundidades bajas y moderadas, y el sustrato fino y de piedras (**Figura 2B**). En las estaciones del grupo II (01R, 04Q, 06R, 07R, 11R, 13R y 14R), ubicadas en la parte media y baja, se observaron velocidades medias, predominó el canto rodado en los fondos y hubo menor cobertura. En las del grupo III (02R, 03A, 05Q y 09Q), ubicadas en la parte baja, las profundidades y velocidades fueron bajas, predominó el sustrato fino y hubo mayor cobertura.

Los dos primeros componentes del ACP explicaron un poco más del 50 % de las características: el CP1 (31,9 %) relacionado con la temperatura, la velocidad media, baja y alta y los sustratos rocosos y de piedras, y el CP2 (18 %), con el pH, el ancho, la velocidad moderada, y los sustratos finos y de canto rodado con sombra.

Composición de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos

La curva de rarefacción (**Figura 3**) reveló poco aumento en la riqueza de taxones por encima de las primeras 21 estaciones, con lo que se constató que una gran parte de la riqueza se recolectó en las muestras del estudio.

Se recolectaron 7.187 individuos de 56 taxones distribuidos en los órdenes Acari, Ephemeroptera, Coleoptera, Diptera, Hemiptera, Megaloptera, Odonata, Plecoptera, Trichoptera y Decapoda (**Tabla 3**). La clase más abundante y diversa fue Insecta, cuyo orden Ephemeroptera presentó el mayor número de individuos (2.596), con 5 familias (Baetidae, Euthyplociidae, Leptohiphidae, Leptophlebiidae y Oligoneuriidae) y ocho géneros, seguido del orden Diptera (2.060 individuos, 8 familias y 10 géneros, dos de ellos indeterminados).

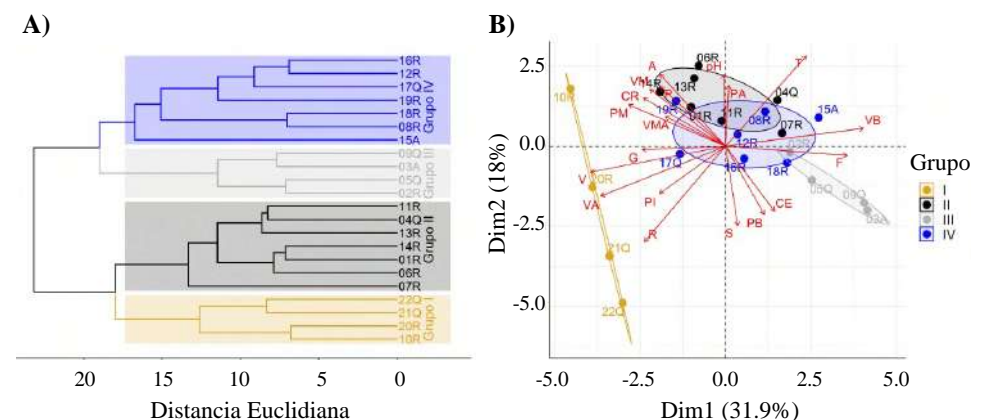


Figura 2. A) Dendrograma de agrupamiento de las 22 estaciones de muestreo en base a variables ambientales (características fisicoquímicas del agua y del hábitat fluvial). **B)** Diagrama de dispersión biespacial del análisis de componentes principales (ACP) basados en las variables ambientales según agrupamiento de las estaciones de muestreo (grupos I, II, III y IV) de la cuenca del río Alto Madre de Dios (Perú). T=temperatura del agua; CE=conductividad eléctrica; A=anchura media; P=profundidad media; V=velocidad media; B= baja; M=moderada; A=alta, MA=muy alta, F=fino, G=grava, CR=canto rodado, PI=piedras, R=rocas y S=sombra

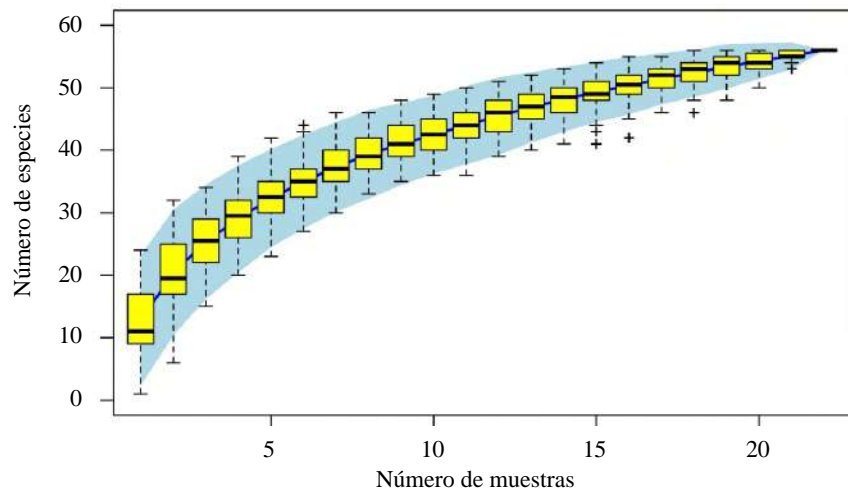


Figura 3. Curva de acumulación según el número de muestras tomadas en la cuenca del río Alto Madre de Dios (Perú)

La familia Chironomidae fue la más abundante, con 21 % del total (1.550 individuos), seguido de los géneros *Baetodes* (614 individuos), *Thraulodes* (603 individuos) y *Anacroneria* (528 individuos), distribuidos en todo el gradiente altitudinal evaluado, así como los géneros *Americabaetis* (198 individuos) y *Smicridea* (171) (**Tabla 3**). Por otro lado, Plecoptera registró 1.040 individuos, dos familias y dos géneros, Trichoptera (954 individuos, 9 familias y 11 géneros), Coleoptera (532 individuos, 7 familias y 11 géneros, con dos indeterminados), Hemiptera (308 individuos, 3 familias y 5 géneros), Odonata (147 individuos, 4 familias y 4 géneros), Decapoda (76 individuos, 2 familias, 2 géneros y un género indeterminado) y Acari (15 individuos de una familia y un género no determinado).

Las estaciones del grupo I (zonas más elevadas con altas velocidades de corriente) presentaron 33 taxones y 2.284 individuos, predominantemente del orden Plecoptera (833 individuos y 2 géneros), seguido del orden Ephemeroptera, Diptera y Trichoptera, este último con una mayor diversidad en las estaciones ubicadas a altitudes altas y medias. En el grupo II (velocidades medias con canto rodado) se registraron 37 taxones y 2.647 individuos, con predominio de Ephemeroptera (1.322 individuos y 7 géneros), siendo los más importantes los géneros *Camelobaetidius* y *Thraulodes*. El grupo III (zona baja con velocidades bajas y sustrato fino) presentó 21 taxones y 1.081 individuos, con predominio del orden Diptera (734 individuos y 3 géneros), y dentro de este, la familia Chironomidae (673 individuos). Por último, el grupo IV (altitudes altas y medias con profundidades y velocidades bajas a moderadas), fue el más diverso, con 40 taxones y 1.787 individuos y el predominio de los órdenes Diptera, Ephemeroptera y Trichoptera y de la familia Chironomidae (232 individuos) y el género *Nectopsyche* (189 individuos).

Según los rangos altitudinales y las abundancias relativas (porcentaje) de los órdenes de los macroinvertebrados (**Figura 4**) (**Tabla 4**), entre los más persistentes y abundantes se encontraron Ephemeroptera, con los géneros *Baetodes*, *Thraulodes* y *Americabaetis*, Diptera (Chironomidae), Trichoptera (*Smicridea*) y Plecoptera (*Anacroneria*), este último abundante a mayor altitud y en aguas relativamente ácidas.

Por otra parte, la riqueza específica (S) varió considerablemente, desde un solo taxón en la estación 03A a 24 en el sitio 17Q, en tanto que la mayor abundancia se registró en la estación 09Q (722 individuos) y la menor en la 03A (7 individuos). Según los grupos de estaciones (**Figura 2A**), la riqueza varió entre 21 taxones en el grupo III y 40 en el grupo IV, en tanto que la mayor abundancia de individuos, 2.647 se registró en el grupo II y la menor en el III (1.081 individuos).

Tabla 3. Macroinvertebrados acuáticos registrados en las estaciones de muestreo de la cuenca del río Alto Madre de Dios (Perú)

Clase	Orden	Familia	Género	Clase	Orden	Familia	Género
Arachnida	Acari	Indeterminado	Indeterminado	Insecta	Hemiptera	Gerridae	<i>Eurygerris</i> <i>Trepobates</i>
Insecta	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Americabaetis</i>			Naucoridae	<i>Cryphocricos</i> <i>Pelocoris</i>
			<i>Andesiops</i>			Veliidae	<i>Rhagovelia</i>
			<i>Baetodes</i>		Megaloptera		Corydalidae
			<i>Camelobaetidius</i>		Odonata	Aeshnidae	<i>Aeshna</i>
		Euthyplociidae	<i>Euthyplocia</i>		Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	
		Leptohyphidae	<i>Leptohyphes</i>		Coenagrionidae	<i>Argia</i>	
		Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>		Libellulidae	<i>Dhytemis</i>	
		Oligoneuriidae	<i>Lachlania</i>		Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>
		Coleoptera	Elmidae			<i>Macrelmis</i>	Gripopterygidae
					<i>Heterelmis</i>	Trichoptera	Calamoceratidae
<i>Stenelmis</i>	Helicopsychidae				<i>Helicopsyche</i>		
<i>Cyloopus</i>	Hydrobiosidae				<i>Atopsyche</i>		
Gyrinidae	<i>Gyrinus</i>		Hydropsychidae		<i>Leptonema</i> <i>Smicridea</i>		
Hydrophilidae	<i>Hydrophilus</i>		Hydroptilidae		<i>Ochrotrichia</i>		
Ptylodactylidae	Indeterminado		Glossosomatidae		<i>Mortoniella</i>		
Psephenidae	<i>Psephenus</i>		Leptoceridae		<i>Nectopsyche</i> <i>Grumichella</i>		
	<i>Psephenops</i>		Philopotamidae		<i>Chimarra</i>		
Staphylinidae	Indeterminado		Odontoceridae		<i>Marilia</i>		
Scirtidae	<i>Scirtes</i>	Malacostraca	Decapoda		Trichodactylidae	Indeterminado	
Diptera	Blephariceridae				<i>Limonicola</i>	Palaemonidae	<i>Macrobrachium</i> amazonicum <i>Macrobrachium</i> 1
	Ceratopogonidae		Indeterminado				
			<i>Alluaudomyia</i>				
	Chironomidae		Indeterminado				
	Empididae		<i>Hemerodromia</i>				
	Ephydriidae		<i>Ephydra</i>				
	Simuliidae	<i>Simulium</i>					
	Tabanidae	<i>Tabanus</i>					
	Tipulidae	<i>Hexatoma</i>					
		<i>Tipula</i>					

Composición taxonómica según características ambientales

El ordenamiento en el ACC (41,4 % de la varianza total) con base en la abundancia de los taxones y las variables ambientales (**Figura 5**) evidenció relaciones importantes entre las comunidades de macroinvertebrados y los rangos de velocidades. Para el caso de Chironomidae, *Dhytemis* y *Alluaudomyia*, sus abundancias se asociaron a velocidades bajas; las de *Psephenus*, *Heterelmis*, *Camelobaetidius* y *Simulium* se relacionaron con las velocidades medias, y *Baetodes*, *Anacroneuria*, *Atopsyche*, *Smicridea* y *Tipula* se asociaron con velocidades altas y mayores altitudes. También se registraron asociaciones entre *Thraulodes* y *Americabaetis* y el ancho promedio del cauce, así como de *Ochrotrichia* y *Leptonema* y la profundidad.

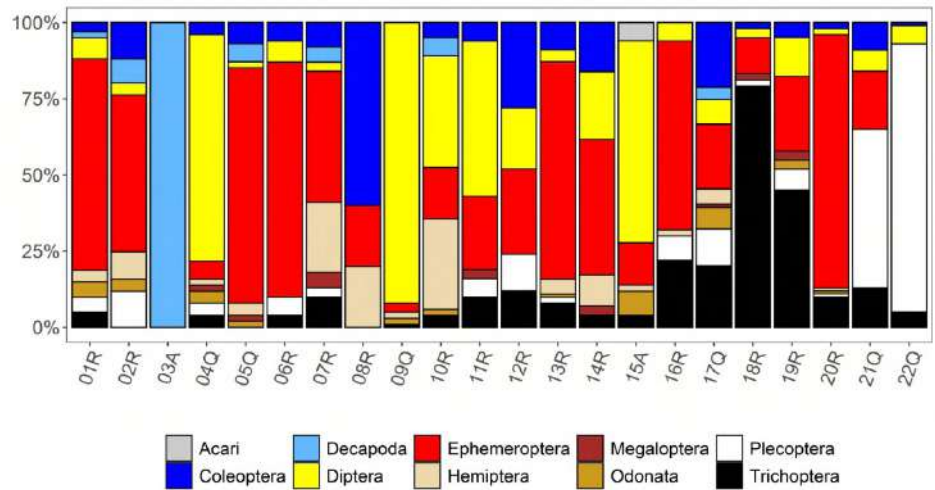


Figura 4. Porcentaje de órdenes de macroinvertebrados acuáticos registrados en cada estación de la cuenca del río Alto Madre de Dios (Perú)

Tabla 4. Distribución altitudinal y abundancia de taxones de macroinvertebrados acuáticos registrados en la cuenca del río Alto Madre de Dios (Perú)

Taxones	Rangos altitudinales (msnm)					Abundancia (n° individuos)
	2411-2000	2000-1500	1500-1000	1000-500	500-398	
Chironomidae						1550
Baetodes						614
Thraulodes						603
Anacroneuria						528
Leptohyphes						516
Claudioperla						485
Camelobaetidius						372
Nectopsyche						233
Americabaetis						198
Smicridea						171
Cylloepus						163
Ochrotrichia						159
Rhagovelia						148
Pelocoris						134
Leptonema						128
Simulium						114
Atopsyche						104
Tipula						103
Corydalus						71
Dhytemis						71
Ptylodactylidae						70

Taxones	Rangos altitudinales (msnm)					Abundancia (n° individuos)
	2411-2000	2000-1500	1500-1000	1000-500	500-398	
<i>Psephenus</i>						70
<i>Heterelmis</i>						52
<i>Macrobrachium amazonicum</i>						50
<i>Hexatoma</i>						49
<i>Phylloicus</i>						45
<i>Aeshna</i>						42
<i>Alluaudomyia</i>						40
<i>Euthyplocia</i>						26
<i>Psephenops</i>						26
<i>Macrelmis</i>						22
<i>Stenelmis</i>						22
<i>Macrobrachium</i>						22
<i>Helicopsyche</i>						19
<i>Acari</i>						15
<i>Marilia</i>						15
<i>Ephydra</i>						11
<i>Eurygerris</i>						11
<i>Trepobates</i>						11
<i>Grumichella</i>						11
<i>Chimarra</i>						11
<i>Lachlania</i>						8
<i>Hydrophilus</i>						8
<i>Andesiops</i>						7
Staphylinidae						7
<i>Scirtes</i>						7
Ceratopogonidae						7
<i>Hemerodoromia</i>						7
<i>Gyrinus</i>						4
<i>Limonicola</i>						4
<i>Tabanus</i>						4
<i>Cryphocricos</i>						4
<i>Hetaerina</i>						4
<i>Mortoniella</i>						4
Trichodactylidae						4
<i>Argia</i>						3
Total, taxones (n°)	18	13	28	48	25	7187

■ Presencia

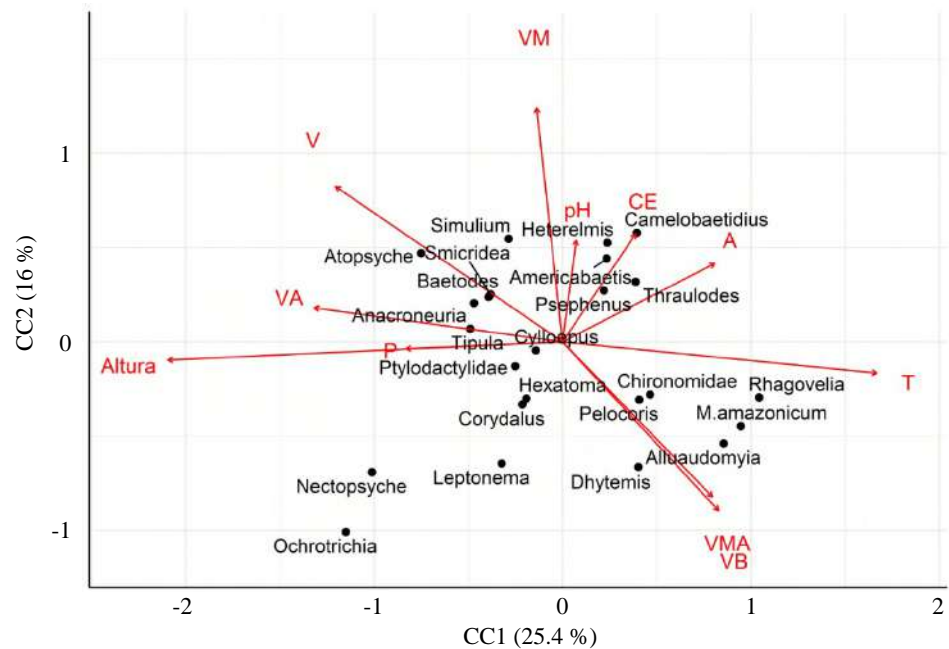


Figura 5. Diagrama de ordenación del análisis de correspondencia canónica (ACC) que muestra la relación entre los taxones más abundantes registrados en los sitios de muestreo de la cuenca del río Alto Madre de Dios (CUSCO-MADRE DE DIOS). T=temperatura del agua; CE=conductividad eléctrica; A=anchura media; P=profundidad media; V=velocidad media; B= baja; M=moderada; A=alta y MA=muy alta

Discusión

Según la distancia que recorren (orden al cual pertenecen), los ríos muestran cambios morfológicos y ambientales (grosor de las partículas del lecho, ancho y velocidad del cauce, forma del valle, entre otros) (Gordon, *et al.*, 2004), de la fisicoquímica del agua, la conductividad eléctrica, la dureza, la temperatura y la turbidez (Roldán & Ramírez, 2008), los cuales condicionan las características del ensamble de las comunidades biológicas (Vannote, *et al.*, 1980). Esta relación se manifiesta como influencia natural del gradiente altitudinal, que determina las adaptaciones a las condiciones ambientales en las que se desarrollan y han evolucionado (Roldán, 1996; 2003). Tales cambios también ocurren en el curso de los ríos estudiados bajo la influencia de características ambientales como el gradiente altitudinal, determinante en la dinámica de los organismos acuáticos y clave en la estructura de las comunidades acuáticas (Mendes, *et al.*, 2018).

La biodiversidad tiende a disminuir a mayor latitud y con el incremento del gradiente altitudinal (Whittaker, *et al.*, 2001; Willig, *et al.*, 2003) en respuesta a factores ambientales más restrictivos (Vannote, *et al.*, 1980; Rahbek, 1995). En el caso de los macroinvertebrados acuáticos, dicha relación es menos clara, tal vez por la falta de un mayor número de estudios (Jacobsen, 2004). En este sentido, Cressa (2000) en 28 arroyos de Venezuela y Monaghan, *et al.* (2000) en 45 arroyos ecuatorianos, no hallaron ninguna o poca relación con la altitud. En nuestros resultados, la riqueza de taxones de las 22 estaciones de muestreo no reveló un comportamiento regular con la altitud, siendo mayor la diversidad a altitudes medias, lo que coincide con otros estudios (Jacobsen, 2004; Henriques-Oliveira & Nessimian, 2010; Lujan, *et al.*, 2013; Arana & Cabrera, 2017; Carrasco, *et al.*, 2020).

Debido a la influencia del hombre hoy la biodiversidad en ecosistemas acuáticos epicontinentales se está perdiendo (Dudgeon, *et al.*, 2006), efecto que se observa sobre todo en aquellos que se hallan próximos a centros urbanos (Meyer, *et al.*, 2005; Roldán-Pérez,

2016) como consecuencia de los cambios en sus características fisicoquímicas naturales. Aparentemente dicho efecto no se manifiesta en los ríos estudiados por hallarse rodeados mayormente de bosques primarios, pese a que varias estaciones de muestreo se encontraban próximas a centros urbanos pequeños. Por ello se considera que la información recopilada corresponde a lugares poco o no alterados, y de ahí su importancia para conocer más sobre el ensamble de los macroinvertebrados y aproximarse a una mejor comprensión de sistemas fluviales (Paggi, 1999) tan poco descritos.

El número de taxones registrados en este estudio fue mayor a lo reportado en los cuerpos de agua ubicados dentro del área de influencia de la comunidad nativa de Puerto Arturo, en la confluencia del río Las Piedras con el río Madre de Dios, y la asociación de mineros de Manuani, donde se reportaron 42 taxones distribuidos en 6 clases, 13 órdenes y 31 familias (Araujo, 2010). También es mayor a lo reportado por Ortega, *et al.* (2007), quienes identificaron 20 géneros en parte de la cuenca hidrográfica del río Huallaga; sin embargo, en el Bajo Urubamba (Cusco Ucayali) Ortega, *et al.* (2010) reportaron 112 taxones a partir de un monitoreo biológico entre el 2003 y 2009. Las diferencias halladas probablemente se deban a la magnitud del esfuerzo desplegado.

Los organismos responden con adaptaciones fisiológicas y morfológicas a las exigencias del medio en el cual se hallan (Krebs, 2009; Molles, 2015; Smith & Smith, 2015), por ello, los componentes de los macroinvertebrados presentan adaptaciones según el grupo taxonómico al cual pertenecen, y responder a las variables del medio donde se desarrollan (Florencio, *et al.*, 2010) manteniendo su presencia o ausentándose (mediciones cuantitativas) y la magnitud de la abundancia (mediciones cualitativas) según las características del rango de tolerancia frente a las variables ambientales (González, 2006).

Chironomidae (Diptera) estaba presente en todo el gradiente altitudinal, con mayores abundancias en zonas donde la velocidad de la corriente es baja y el sedimento fino, gracias a que se ha adaptado para sobrevivir en entornos más extremos (Lods-Crozet, *et al.*, 2001; Scheibler, *et al.*, 2014), con abundante materia orgánica y periodos de anoxia (Vimos-Lojano, *et al.*, 2017). El orden Ephemeroptera también fue uno de los más abundantes y con mayor distribución; *Camelobaetidius* se asoció con velocidades medias y menores altitudes; *Baetodes* con mayores velocidades y altitudes, al igual que *Anacroneturia* (Plecoptera), *Atopsyche* y *Smicridea* (Trichoptera), que presentan adaptaciones para esos tipos de hábitats (Bispo, *et al.*, 2006; Schmitt, *et al.*, 2016). Entre los Coleoptera están los asociados a corrientes con velocidades medias: *Psephenus* (Psephenidae) y *Heterelmis* (Elmidae), aunque este último es característico de ambientes con altas velocidades y elevado contenido de oxígeno (Manzo, 2013; González-Córdoba, *et al.*, 2020), así como larvas de *Simulium* (Diptera) (Coscarón-Arias, 2009), que pueden sobrevivir en condiciones temporales de anoxia alimentándose de materia orgánica, por lo que están presentes en diferentes ambientes (Docile, *et al.*, 2015), tal como se recoge en el análisis de ACC.

La composición y la abundancia de los macroinvertebrados en el río Alto Madre de Dios se atribuyen a la velocidad y la cantidad del flujo de las corrientes, las cuales moldean los sustratos y controlan la acumulación de nutrientes y sedimentos en los lechos fluviales (Scholl, *et al.*, 2015; Wolters, *et al.*, 2018). Ello confirma que el gradiente altitudinal (en el que está inmerso el efecto de las variables ambientales) tiene un efecto en la composición, riqueza y abundancia de macroinvertebrados (García-Ríos, *et al.*, 2020). La heterogeneidad de la riqueza, la composición y la abundancia observadas en el gradiente altitudinal se ajusta a lo planteado en el modelo de río continuo, el cual sostiene que las comunidades biológicas se modifican de acuerdo al incremento del orden del río (dimensión fluvial) (Vannote, *et al.*, 1980), sin descartar la influencia antropogénica.

Conclusiones

La diversidad del ensamble de los macroinvertebrados acuáticos se relacionó con las condiciones físicas y ambientales de la cuenca del río Alto Madre de Dios, determinadas por el gradiente altitudinal, registrándose mayores valores de composición y abundancia

en el rango intermedio de 1.000 a 500 m s.n.m. Las variables de mayor importancia fueron la velocidad de la corriente y la profundidad del cauce, sumadas a la posible influencia de la actividad antrópica en las poblaciones aledañas.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Gobierno de España, Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación, AECID (Código A1/040396/11) y la Asociación de Amigos Universidad de Navarra. Agradecemos especialmente a la Asociación para la Conservación de la Cuenca Amazónica (ACCA) y a Andrea Pino del Carpio por el apoyo logístico y durante el muestreo. También queremos agradecer a los miembros de los departamentos de Ictiología y Limnología del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por su ayuda y asistencia, así como al Bachiller en Ingeniería Geográfica Isaias Quispe Quevedo por el diseño cartográfico.

Contribución de los autores

Todos los autores participaron en el proceso de conceptualización de la revisión, la recolección de los datos y el tratamiento de la información, y la escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Arana, J. & Cabrera, C.** (2017). Macroinvertebrados acuáticos y caracterización ecológica de los ambientes dulceacuícolas del área de influencia del gasoducto PERÚ LNG en los departamentos de Ica y Huancavelica. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. **20** (40): 86-93. Doi: 10.15381/iigeo.v20i40.14394
- Araujo, J.** (2010). Informe Hidrobiológico Reserva Nacional Tambopata y Parque Nacional Bahuaja Sonene Epoca Seca-2010. PE, AIDER.
- Armantrout, N. B.** (1998). Glossary of aquatic habitat inventory terminology. American Fisheries Society. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015013229>
- Bispo, P. C., Oliveira, L. G., Bini, L. M., & Sousa, K. G.** (2006). Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera assemblages from riffles in mountain streams of Central Brazil: Environmental factors influencing the distribution and abundance of immatures. *Brazilian Journal of Biology*. **66** (2B): 611-622. Doi: 10.1590/S1519-69842006000400005
- Brack, A. & Mendiola, C.** (2000). Ecología del Perú. Bruño. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300056262>
- Campbell, A. J., Carvalheiro, L. G., Maués, M. M., Jaffé, R., Giannini, T. C., Benjamin Freitas, M. A., Teixeira Coelho, B. W., Menezes, C.** (2018). Anthropogenic disturbance of tropical forests threatens pollination services to açai palm in the Amazon river delta. *Journal of Applied Ecology*. **55** (4): 1725-1736. Doi: 10.1111/1365-2664.13086
- Carrasco, C., Rayme, C., Alarcón, R. del P., Ayala, Y., Arana, J., Aponte, H.** (2020). Macroinvertebrados acuáticos en arroyos asociados con bofedales altoandinos, Ayacucho, Perú. *Revista de Biología Tropical*. **68** (S2): S116-S161. Doi: 10.15517/rbt.v68iS2.44344
- Castro, D. M. P., Callisto, M., Solar, R. R. C., Macedo, D. R., Fernandes, G. W.** (2019). Beta diversity of aquatic invertebrates increases along an altitudinal gradient in a Neotropical mountain. *Biotropica*. **51** (3): 399-411. Doi: 10.1111/btp.12660
- Cressa, C.** (2000). Macroinvertebrate community structure of twenty-eight Venezuelan streams. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*. **27** (5): 2511-2518. Doi: 10.1080/03680770.1998.11898116
- Coscarón-Arias, C.** (2009). Diptera Simuliidae. En *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología* (pp. 365-381). Fundación Miguel Lillo. San Miguel de Tucumán. Argentina.
- De León, L. F., Cornejo, A., Gavilán, R. G., Aguilar, C.** (2020). Hidden biodiversity in Neotropical streams: DNA barcoding uncovers high endemism of freshwater macroinvertebrates at small spatial scales. *PLOS ONE*. **15** (8): e0231683. Doi: 10.1371/journal.pone.0231683

- Docile, T. N., Figueiró, R., Gil-Azevedo, L. H., Nessimian, J. L.** (2015). Contaminación del agua y distribución de la mosca negra (Diptera: Simuliidae) en el bosque Atlántico, Brasil. *Revista de Biología Tropical*. **63** (3): 683-693. Doi: 10.15517/rbt.v63i3.16195
- Domínguez, E. & Fernández, H.** (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y Biología (1.^a ed.). Fundación Miguel Lillo. pp 47-623. San Miguel de Tucumán. Argentina.
- Domínguez, E., Molineri, C., Pescador, M. L., Hubbard, M., Nieto, C.** (2006). Ephemeroptera of South America (2.^a ed.). Pensoft Publishers. pp 29-587. San Miguel de Tucumán. Argentina.
- Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z.-I., Knowler, D. J., Lévêque, C., Naiman, R. J., Prieur-Richard, A.-H., Soto, D., Stiassny, M. L. J., Sullivan, C. A.** (2006). Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*. **81** (2): 163-182. Doi: 10.1017/S1464793105006950
- Figuroa, J. & Stucchi, M.** (Eds.). (2010). Biodiversidad de los alrededores de Puerto Maldonado. Línea base ambiental del EIA del lote, 111. (IPyD ingenieros-Ingeniería de Proyectos y Desarrollo EIRL. y AICB-Asociación para la Investigación y Conservación de la Biodiversidad.).
- Florencio, M., Serrano, L., Gómez-Rodríguez, C., Millán, A., Díaz-Paniagua, C.** (2010). Inter- and intra-annual variations of macroinvertebrate assemblages are related to the hydroperiod in Mediterranean temporary ponds. En B. Oertli, R. Céréghino, J. Biggs, S. Declerck, A. Hull, & M. R. Miracle (Eds.), *Pond Conservation in Europe* (pp. 323-339). Springer Netherlands. Doi: 10.1007/978-90-481-9088-1_27
- García-Ríos, R. F., Moi, D. A., Peláez, O. E.** (2020). Effects of altitudinal gradient on benthic macroinvertebrate assemblages in two hydrological periods in a Neotropical Andean river. *Ecología Austral*. **30** (1): 033-044. Doi: 10.25260/EA.20.30.1.0.995
- González, A. R.** (2006). *Ecología: métodos de muestreo y análisis de poblaciones y comunidades*. Pontificia Universidad Javeriana. pp 50-59. Bogotá. Colombia.
- González-Córdoba, M., Zúñiga, M. del C., Manzo, V.** (2020). La familia Elmidae (Insecta: Coleoptera: Byrrhoidea) en Colombia: riqueza taxonómica y distribución. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **44** (171): 522-553. Doi: 10.18257/raccefyn.1062
- Gordon, N. D., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Gippel, C. J., Nathan, R. J.** (2004). *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists* (Second Edition). John Wiley and Sons. pp 56-61. Chichester. Inglaterra.
- Hamilton, S. K., Kellendorfer, J., Lehner, B., Tobler, M.** (2007). Remote sensing of floodplain geomorphology as a surrogate for biodiversity in a tropical river system (Madre de Dios, Peru). *Geomorphology*. **89** (1): 23-38. Doi: 10.1016/j.geomorph.2006.07.024
- Henriques-Oliveira, A. L. & Nessimian, J. L.** (2010). Aquatic macroinvertebrate diversity and composition in streams along an altitudinal gradient in Southeastern Brazil. *Biota Neotropica*. **10** (3): 115-128. Doi: 10.1590/S1676-06032010000300012
- Jacobsen, D.** (2004). Contrasting patterns in local and zonal family richness of stream invertebrates along an Andean altitudinal gradient. *Freshwater Biology*. **49** (10): 1293-1305. Doi: 10.1111/j.1365-2427.2004.01274.x
- Jézéquel, C., Tedesco, P. A., Darwall, W., Dias, M. S., Frederico, R. G., Hidalgo, M., Hugueny, B., Maldonado-Ocampo, J., Martens, K., Ortega, H., Torrente-Vilara, G., Zuanon, J., Oberdorff, T.** (2020). Freshwater fish diversity hotspots for conservation priorities in the Amazon Basin. *Conservation Biology*. **34** (4): 956-965. Doi: 10.1111/cobi.13466
- Krebs, C. J.** (2009). *Ecology: The Experimental Analysis of Distribution and Abundance* (Sixth Edition). Pearson Benjamin Cummings. pp 28-41. Harlow. Inglaterra.
- Laurance, W. F., Sayer, J., Cassman, K. G.** (2014). Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in Ecology & Evolution*. **29** (2): 107-116. Doi: 10.1016/j.tree.2013.12.001
- Lê, S., Josse, J., Husson, F.** (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*. **25** (1): 1-18. Doi: 10.18637/jss.v025.i01
- Lessmann, J., Guayasamín, J. M., Casner, K. L., Flecker, A. S., Funk, W. C., Ghalambor, C. K., Gill, B. A., Jácome-Negrete, I., Kondratieff, B. C., Poff, L. N., Schreckinger, J., Thomas, S. A., Toral-Contreras, E., Zamudio, K. R., Encalada, A. C.** (2016). Freshwater vertebrate and invertebrate diversity patterns in an Andean-Amazon basin: Implications for conservation efforts. *Neotropical Biodiversity*. **2** (1): 99-114. Doi: 10.1080/23766808.2016.1222189
- Lods-Crozet, B., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Snook, D. L., Velle, G., Brittain, J. E., Castella, E., Rossaro, B.** (2001). Chironomid (Diptera: Chironomidae) communities in six European glacier-fed streams. *Freshwater Biology*. **46** (12): 1791-1809. Doi: 10.1046/j.1365-2427.2001.00859.x

- Lujan, N. K., Roach, K. A., Jacobsen, D., Winemiller, K. O., Meza-Vargas, V., Rimarachín-Ching, V., Arana-Maestre, J.** (2013). Aquatic community structure across an Andes-to-Amazon fluvial gradient. *Journal of Biogeography*. **40** (9): 1715-1728. Doi: 10.1111/jbi.12131
- Manzo, V.** (2005). Key to the South America genera of Elmidae (Insecta: Coleoptera) with distributional data. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*. **40** (3): 201-208. Doi: 10.1080/01650520500140619
- Manzo, V.** (2013). Los élmidos de la región Neotropical (Coleoptera: Byrrhoidea: Elmidae): diversidad y distribución. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. **72** (3-4): 199-212.
- Mayor, P., & Bodmer, R.** (2009). *Pueblos Indígenas de la Amazonía Peruana* (1.ª ed.). Centro de Estudios Teológicos de la Amazonía (CETA). pp 18-28. Iquitos. Perú.
- Mendes, T. P., Luiza-Andrade, A., Cabette, H. S. R., Juen, L.** (2018). How Does Environmental Variation Affect the Distribution of Dragonfly Larvae (Odonata) in the Amazon-Cerrado Transition Zone in Central Brazil? *Neotropical Entomology*. **47** (1): 37-45. Doi: 10.1007/s13744-017-0506-2
- Merritt, R. W., Cummins, K. W., Berg, M. B.** (2008). *An Introduction to the aquatic insects of North America*. (4.ª ed.). United States of America: Kendall/Hunt Publishing Company. pp 181-967. Iowa. USA. Doi: 10.5860/choice.45-3789
- Meyer, J. L., Paul, M. J., Taulbee, W. K.** (2005). Stream ecosystem function in urbanizing landscapes. *Journal of the North American Benthological Society*. **24** (3): 602-612. Doi: 10.1899/04-021.1
- Molles, M. C.** (2015). *Ecology: Concepts and Applications* (8th Edition). McGraw-Hill Education. pp 11-149. New York. USA.
- Monaghan, K. A., Peck, M. R., Brewin, P. A., Masiero, M., Zarate, E., Turcotte, P., Ormerod, S. J.** (2000). Macroinvertebrate distribution in Ecuadorian hill streams: The effects of altitude and land use. *Archiv Für Hydrobiologie*. **149** (3): 421-440.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., Wagner, H.** (2017). *vegan: Community Ecology Package* (2.5-7) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Ortega, H., Chocano, L., Palma, C., Samané, I.** (2010). Biota acuática en la Amazonía peruana: diversidad y usos como indicadores ambientales en el Bajo Urubamba (Cusco - Ucayali). *Revista Peruana de Biología*. **17** (1): 29-36.
- Ortega, H., Rengifo, B., Samané, I., Palma, C.** (2007). Diversidad y el estado de conservación de cuerpos de agua Amazónicos en el nororiente del Perú. *Revista Peruana de Biología*. **13** (3): 185-194.
- Oyanedel, A., Valdovinos, C., Azocar, M., Moya, C., Mancilla, G., Pedreros, P., Figueroa, R.** (2008). Patrones de distribución espacial de los macroinvertebrados bentónicos de la cuenca del río Aysen (Patagonia Chilena). *Gayana (Concepción)*. **72** (2): 241-257. Doi: 10.4067/S0717-65382008000200011
- Paggi, A.** (1999). Los Chironomidae como indicadores de calidad de ambientes dulceacuáticos. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. **58** (1-2): 202-207.
- Rahbek, C.** (1995). The Elevational Gradient of Species Richness: A Uniform Pattern? *Ecography*. **18** (2): 200-205.
- Roldán, G.** (1996). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia. pp 14-218. Medellín. Colombia.
- Roldán, G.** (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: propuesta para el uso del método BMWP/Col. (1.ª ed.). Universidad de Antioquia. pp 10-17. Medellín. Colombia.
- Roldán, G. & Ramírez-Restrepo, J. J.** (2008). *Fundamentos de limnología neotropical* (2.ª ed.). Universidad de Antioquia. pp 141-238. Medellín, Colombia.
- 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.
- Sarremejane, R., Cid, N., Stubbington, R., Datry, T., Alp, M., Cañedo-Argüelles, M., Cordero-Rivera, A., Csabai, Z., Gutiérrez-Cánovas, C., Heino, J., Forcellini, M., Millán, A., Paillex, A., Pařil, P., Polářek, M., Tierno de Figueroa, J. M., Usseglio-Polatera, P., Zamora-Muñoz, C., Bonada, N.** (2020). DISPERSE, a trait database to assess the dispersal potential of European aquatic macroinvertebrates. *Scientific Data*. **7** (1): 1-9. Doi: 10.1038/s41597-020-00732-7

- Scheibler, E. E., Roig-Juñent, S. A., Claps, M. C.** (2014). Chironomid (Insecta: Diptera) assemblages along an Andean altitudinal gradient. *Aquatic Biology*. **20** (2): 169-184. Doi: 10.3354/ab00554
- Schmitt, R., Siegloch, A. E., Lemes da Silva, A. L., Kleba Lisboa, L., Mello Petrucio, M.** (2016). Temporal variation in the Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera community in response to environmental drivers in a subtropical stream. *Journal of Insect Biodiversity*. **4** (19): 1-12. Doi: 10.12976/jib/2016.4.19
- Scholl, E. A., Rantala, H. M., Whiles, M. R., Wilkerson, G. V.** (2015). Influence of Flow on Community Structure and Production of Snag-Dwelling Macroinvertebrates in an Impaired Low-Gradient River. *River Research and Applications*. **32** (4): 677-688. <https://doi.org/10.1002/rra.2882>
- Smith, T. M. & Smith, R. L.** (2015). *Elements of Ecology* (9th edition). Pearson. pp 175-35. Madrid. España.
- Touron-Poncet, H., Bernadet, C., Compin, A., Bargier, N., Céréghino, R.** (2014). Implementing the Water Framework Directive in overseas Europe: A multimetric macroinvertebrate index for river bioassessment in Caribbean islands. *Limnologia*. **47**: 34-43. Doi: 10.1016/j.limno.2014.04.002
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., Cushing, C. E.** (1980). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **37** (1): 130-137. Doi: 10.1139/f80-017
- Vimos-Lojano, D. J., Martínez-Capel, F., Hampel, H.** (2017). Riparian and microhabitat factors determine the structure of the EPT community in Andean headwater rivers of Ecuador. *Ecohydrology*. **10** (8): e1894. Doi: 10.1002/eco.1894
- Walteros, J. M. & Castaño, J. M.** (2020). Composición y aspectos funcionales de los macroinvertebrados acuáticos presentes en una microcuenca de cabecera en los Andes de Risaralda, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **44** (171): 581-592.
- Whittaker, R. J., Willis, K. J., Field, R.** (2001). Scale and species richness: Towards a general, hierarchical theory of species diversity. *Journal of Biogeography*. **28** (4): 453-470. Doi: 10.1046/j.1365-2699.2001.00563.x
- Willig, M. R., Kaufman, D. M., Stevens, R. D.** (2003). Latitudinal Gradients of Biodiversity: Pattern, Process, Scale, and Synthesis. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. **34** (1): 273-309. Doi: 10.1146/annurev.ecolsys.34.012103.144032
- Wolters, J.-W., Verdonschot, R. C. M., Schoelynck, J., Verdonschot, P. F. M., Meire, P.** (2018). The role of macrophyte structural complexity and water flow velocity in determining the epiphytic macroinvertebrate community composition in a lowland stream. *Hydrobiologia*. **806** (1): 157-173. Doi: 10.1007/s10750-017-3353-6
- Yu, D. W., Hendrickson, T., Castillo, A.** (1997). Ecotourism and conservation in Amazonian Perú: Short-term and long-term challenges. *Environmental Conservation*. **24** (2): 130-138.

Artículo original

Caracterización espacio-temporal de la avifauna del cañón de Las Herosas, Chaparral, Tolima, Colombia

Space-time characterization of the avifauna in Las Herosas Canyon, Chaparral, Tolima, Colombia

✉ Jessica Nathalia Sánchez-Guzmán*, ✉ Juan Camilo Váquiro-García,
✉ Sergio Losada-Prado

Grupo de Investigación en Zoología, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Tolima, Colombia

Resumen

El Cañón de las Herosas constituye una de las regiones menos exploradas del suroccidente del Tolima. Pese a albergar una gran diversidad de fauna, la información disponible sobre las aves de esta región y sus interacciones a nivel de comunidad es poca. Nuestro objetivo fue documentar la avifauna de la cuenca del río Amoyá y analizar su dinámica espacio-temporal durante el periodo 2013-2018. Utilizando las metodologías tradicionales de observación y redes de niebla registramos 252 especies, de las cuales siete son endémicas, 22 casi-endémicas, 17 migratorias y cinco están en peligro. A escala espacial, detectamos dos picos de mayor riqueza en las estaciones más altas y bajas, y cuatro ensamblajes de aves a lo largo del gradiente, en tanto que temporalmente observamos similitudes de 43,4 a 63,5 % en la composición de especies entre los años y una riqueza fluctuante a lo largo del tiempo. A pesar de que la cuenca del río Amoyá constituye un ecosistema altamente intervenido, las particularidades de su avifauna permiten postularlo como un área importante para la conservación.

Palabras claves: Dinámica temporal; Ecología de comunidades; Gradiente altitudinal; Río Amoyá; Temporada climática.

Abstract

Las Herosas Canyon is one of the least explored regions in southwestern Tolima. Despite hosting a great diversity of fauna, the information available on the birds of this region and their interactions at the community level is scarce. Our aim was to document the avifauna of the Amoyá river basin and analyze its space-time dynamics during the period 2013-2018. Using mist nets, we observed and recorded 252 species, seven of them endemic, 22 quasi-endemic, 17 migratory, and five in danger. On a spatial scale, we detected two peaks of greater richness in the highest and lowest stations and four assemblages of birds along the gradient while temporarily we observed similarities of 43.4 to 63.5% in the composition of species between years and richness fluctuating through time. Although the Amoyá River basin is a highly intervened ecosystem, the characteristics of its avifauna justify postulating it as an important area for conservation.

Keywords: Altitude gradient; Amoyá River; Climatic season; Community ecology; Temporal dynamics.

Introducción

Colombia es uno de los países más diversos del mundo y alberga alrededor del 10 % de la diversidad biológica en cerca del 0,7 % del área mundial (Romero *et al.*, 2008). La heterogeneidad de sus ecosistemas (Romero, *et al.*, 2008) y la gran cantidad de áreas protegidas para la conservación de las aves (AICA) (o *important bird areas*, IBA) (Calidris, 2017), han permitido que en su territorio se registre una multiplicidad de flora y fauna, en especial de aves, uno de los componentes biológicos más carismáticos a nivel mundial.

Citación: Sánchez-Guzmán JN, Váquiro-García JC, Losada-Prado S. Caracterización espacio-temporal de la avifauna del cañón de Las Herosas, Tolima, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1113-1127, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefnyn.1394>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Jessica Nathalia Sánchez-Guzmán;
jnsanchez@ut.edu.co

Recibido: 12 de febrero de 2021

Aceptado: 16 de septiembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

El territorio tolimense constituye un punto de encuentro entre las áreas de mayor importancia para la biodiversidad del país, como el Chocó Biogeográfico y la Amazonía, y cuenta, además, con tres de los principales parques naturales nacionales: Los Nevados, Nevado del Huila y Las Hermosas (**Grupo de Investigación en Zoología-GIZ & ISAGEN**, 2014). Este último se localiza en el municipio de Chaparral y en él se ubica la cuenca del río Amoyá, que por su geoforma y gran diversidad de ecosistemas ofrece condiciones ambientales muy heterogéneas y propicias para el establecimiento de una amplia variedad de especies (**Corporación Autónoma Regional del Tolima-Cortolima**, 2005), de las que se tiene poca información sobre su composición, estructura y dinámica comunitaria.

De hecho, la información sobre la diversidad y las interacciones ecológicas de las poblaciones de aves en el Tolima permanece incompleta, pues se cuenta únicamente con listados de especies en algunas cuencas como las de los ríos Anamichú, Coello, Gualí, Prado, Recio, Toche, Tohecito, Totare, y Venadillo, entre otras (**López-Lanús, et al.**, 2000; **Cortolima**, 2004; **Losada-Prado, et al.**, 2005; **Cortolima**, 2009, 2014; **Molina-Martínez**, 2014; **Molina-Martínez**, 2015; **Corporación de Cuencas del Tolima-Corcuencas**, 2016). Se destaca el vacío de información sobre el sur del departamento, en donde los permanentes problemas de orden público han impedido la exploración del territorio.

Ante este panorama, el objetivo de este estudio fue caracterizar la avifauna y analizar su dinámica espacio-temporal en la cuenca del río Amoyá, en el cañón de Las Hermosas, municipio de Chaparral, Tolima. Esta información no solo contribuye a la generación de conocimiento sobre las especies de aves de la región, sino que también aporta evidencia sobre su ecología y la importancia de proteger los sistemas naturales y las formaciones vegetales asociadas con las actividades agrícolas tradicionales con las que interactúa la avifauna.

Metodología

Área de estudio

El río Amoyá se ubica en la zona suroccidental del Tolima, en el cañón de Las Hermosas; comprende cerca de 143.530 ha que representan aproximadamente el 6 % del área total del departamento y el 68 % del municipio de Chaparral (**Cortolima**, 2005). La longitud del cauce principal es de cerca de 141 km; nace en la laguna La Rusia en el páramo de Las Nieves (cordillera Central), a 3.900 m, y desemboca en la cuenca mayor del río Saldaña, a 400 m, en las ramificaciones del cerro Aponte (**Cortolima**, 2005).

Los suelos de la cuenca generalmente cuentan con coberturas compuestas en un alto porcentaje por vegetación protectora de bosque natural, secundario o plantado, y flora herbácea y arbustiva, así como pastos naturales y manejados, rastrojos para el pastoreo, cultivos semestrales o anuales de algodón, hortalizas y café (con sus diferentes asociaciones), y otros cultivos permanentes, semipermanentes, transitorios o de pancoger, como leguminosas y frutales, entre otros (**Cortolima**, 2005).

El estudio se desarrolló a partir de los datos recolectados en siete muestreos realizados por el Grupo de Investigación en Zoología-GIZ de la Universidad del Tolima entre diciembre de 2013 y noviembre de 2018 y uno de la Universidad Católica de Oriente en febrero de 2013 (**Tabla 1**) (**Universidad Católica de Oriente**, 2013; **GIZ & ISAGEN**, 2018). Se evaluaron diez estaciones a lo largo de la cuenca del río Amoyá situadas en cinco veredas (VC: Vega Chiquita; LV: La Virginia; DJ: Davis Janeiro; AB: Agua Bonita y LS: Los Sauces) dentro de un rango altitudinal entre los 970 y los 2.095 m aproximadamente (**Figura 1**) (**Tabla 2**) en las zonas de vida de bosque seco tropical, bosque húmedo premontano y bosque húmedo montano bajo (**Holdridge**, 1987), las cuales tienen un régimen bimodal de lluvias entre los meses de marzo y mayo y octubre y diciembre (**Cortolima**, 2005).

Métodos de muestreo

Usando binoculares (aumento 10x42), se contaron, identificaron y registraron las aves detectadas (visual o auditivamente) como observaciones libres en horario de 05:00-18:00 h o desde puntos de conteo (50 m de radio) (**Ralph, et al.**, 1996), hasta acumular un total

Tabla 1. Esfuerzo y estaciones evaluadas en cada uno de los muestreos (M) realizados a lo largo de la cuenca del río Amoyá, cañón de Las Hermosas (Chaparral, Tolima)

M	Fecha	Estaciones										Observaciones	Redes		
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Q1	Q2	Q3-RN				
1	feb-13		X					X						340 min	144 h/red
2	dic-13	X				X	X							500 min	216 h/red
3	mar-14		X			X	X							1200 min	240 h/red
4	nov-15	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1180 min	259 h/red
5	may-16	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1060 min	217 h/red
6	sep-16	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	855 min	137 h/red
7	sep-18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	810 min	441 h/red
8	nov-18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1050 min	384 h/red

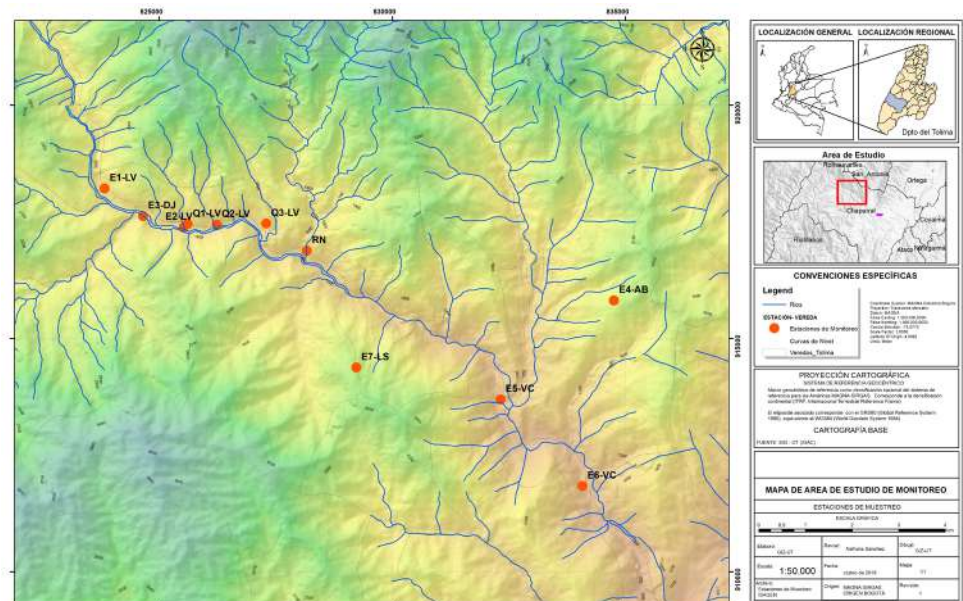


Figura 1. Ubicación de las estaciones para el monitoreo de aves a lo largo del río Amoyá, cañón de Las Hermosas (Chaparral, Tolima). La Virginia (LV): E1, E2, Q1, Q2, Q3-RN; Davis Janeiro (DJ): E3; Agua Bonita (AB): E4; Vega Chiquita (VC): E5, E6; Los Sauces (LS): E7

de 6.995 minutos de trabajo (Tabla 1). Además, con el fin de registrar el mayor número posible de especies asociadas a los estratos bajos de la vegetación, se emplearon entre tres y cinco redes de niebla (2,5 m de alto x 12 m de largo y 36 mm de ojo de malla) operadas durante un día en cada estación en los horarios de 06:00-11:00 h y de 15:30-18:00 h (Ralph, et al., 2008), en un esfuerzo de muestreo total de 1.918 h/red (Tabla 1). En la determinación hasta el nivel de especie de los individuos capturados y observados se emplearon guías de campo (Hilty & Brown, 2001; Ayerbe-Quiñones, 2018) y el listado general de las aves se hizo siguiendo la nomenclatura sugerida por Remsen, et al. (2020).

Análisis de datos

Con el fin de calcular el número de especies registradas a nivel de taxón, estación, año y temporada climática, se diseñó una matriz para agrupar los datos obtenidos con las diferentes metodologías empleadas durante los ocho muestreos realizados en el área de

Tabla 2. Estaciones de monitoreo a lo largo de la cuenca del río Amoyá, cañón de Las Herosas (Chaparral, Tolima)

Estación-Vereda	Coordenadas Altura (m)	Características
E6: Túnel de descarga- Vega Chiquita (VC)	3°47'51,5" N 75°34'15,8" W 972 m	Ubicada sobre el cauce principal del río Amoyá; se observa un paisaje dominado por una matriz antropogénica de cultivos de café, plátano y yuca, así como relictos de bosque secundario y vegetación ribereña.
E5: Casa de Máquinas- Vega Chiquita (VC)	3°48'51,8" N 75°35'12,9" W 1077 m	Ubicada sobre el cauce principal del río Amoyá, está cubierta por una matriz de vegetación boscosa en sus primeros estados sucesionales, pasturas y matorrales.
Q2: Quebrada La Alcancia-La Virginia (LV)	3°50'53,4" N 75°38'30,4" W 1404 m	Ubicada al margen izquierdo del río Amoyá; se encuentra inmersa en una matriz de vegetación arbórea y arbustiva de poca altura.
E2: Después de captación-La Virginia (LV)	3°50'51,4" N 75°38'53,4" W 1437 m	Ubicada sobre el cauce principal del río Amoyá; sus márgenes están cubiertos por vegetación arbustiva, cultivos mixtos de café, plátano y suelos desnudos.
Q3-RN: Quebrada La Arenosa hasta Río Negro-La Virginia (LV)	3°50'54,2" N 75°37'56,1" W 1450 m 3°50'35,3" N 75°37'27,7" W 1305 m	Ubicada al margen izquierdo del río Amoyá; ambos márgenes están cubiertos por vegetación arbórea y arbustiva de poca altura. Río Negro (RN en Figura 1): corresponde a uno de los principales tributarios del río Amoyá; registra vegetación ribereña, matorrales, pasturas y pequeños parches de bosque secundario.
E3: Patio Bonito-Davis Janeiro (DJ)	03°50'59,2" N 75°39'53,4" W 1463 m	Ubicada al margen derecho del río Amoyá; se localiza en un área escarpada cubierta por cultivos de café, leguminosas, caña, plátano, entre otros, y algunos fragmentos de bosques intervenidos.
Q1: Quebrada La Virginia-La Virginia (LV)	03°50'52,1" N 75°38'50,3" W 1465 m	Ubicada al margen izquierdo del río Amoyá; se registran principalmente pastos y vegetación herbácea de poca altura.
E1: Antes de captación-La Virginia (LV)	03°51'18,5" N 75°39'48,4" W 1530 m	Ubicada sobre el cauce principal del río Amoyá; sus márgenes están cubiertos por vegetación arbustiva riparia. Presenta un paisaje dominado por una matriz de cultivos de café, cercas vivas y potreros.
E4: Finca Luxemburgo-Agua Bonita (AB)	03°50'1,0" N 75°33'54,2" W 1935 m	Presenta un paisaje mixto dominado por cultivos de café, tomate, granadilla, entre otros, bosques secundarios poco intervenidos, rastrojos y pequeños afluentes.
E7: Predio Porvenir-Los Sauces (LS)	03°49'13,9" N 75°36'53,3" W 2095 m	Localizada sobre una zona de restauración por lo cual predominan coberturas vegetales nativas, bosques secundarios, pastos naturales y rastrojos.

estudio (**Tabla 1**). A cada especie se le consignó la información correspondiente a su tipo de residencia, endemismo, migración (**Avendaño, et al., 2017; Ayerbe-Quiñones, 2018**), categoría de amenaza nacional (**Renjifo, et al., 2014**), apéndice CITES (**Roda, et al., 2003**) y categoría ecológica (C-E: I. Especies de bosque: a. primario, b. secundario, bordes o hábitats arbolados cerca del bosque primario. II. Especies de bosque secundario. III. Especies de áreas abiertas o con vegetación baja. IV. Especies acuáticas: a. con vegetación densa al borde; b. orillas abiertas o vegetación baja. V. Especies aéreas: a. con parches de bosque; b. indiferentes al bosque) (**Stiles & Bohórquez, 2000**).

Debido a las diferencias en el esfuerzo de muestreo, la representatividad del estudio se evaluó mediante una curva de acumulación de especies de cada estación, graficando los valores obtenidos con los estimadores no paramétricos ICE y Chao 2 (más riguroso y menos sesgado para muestras pequeñas) (Villareal, *et al.*, 2004), y las especies representadas solo en una muestra (“uniques”) o solo en dos (“duplicates”) (Moreno, 2001) mediante el programa EstimateS versión 9.1.0 (Colwell, 2013).

Asimismo, se graficó el total de especies registradas, estimadas y el número de especies de interés por estación, con el fin de observar el comportamiento de la riqueza a lo largo del gradiente altitudinal. Además, se hizo un análisis empleando modelos lineales generalizados (GLM) a partir de cuatro modelos, así: M1, sin relación entre elevación y riqueza; M2, con relación lineal entre elevación y riqueza; M3, con un solo pico en la riqueza de especies a lo largo de la elevación; M4, con dos picos de riqueza a lo largo del gradiente altitudinal. El mejor modelo se seleccionó siguiendo el criterio de información bayesiano (BIC).

Por otra parte, se evaluó la similitud entre las estaciones, los años y los muestreos a partir de una matriz de presencia-ausencia empleando el índice de Jaccard, así como un análisis de escalamiento no métrico multidimensional (nMDS, únicamente para las estaciones), utilizando como variables ambientales la elevación y la distancia desde la localidad más baja mediante el programa PAST 3.16 (Hammer, *et al.*, 2001). Dado que algunos de los grupos obtenidos estaban compuestos por menos de dos estaciones, no se hizo análisis multivariado de similitud (ANOSIM) para determinar la significancia estadística de las agrupaciones obtenidas.

Además, en este análisis se excluyeron las especies observadas sobrevolando (*Accipiter bicolor*, *Amazona mercenarius*, *Bubulcus ibis*, *Buteogallus meridionalis*, *B. solitarius*, *Caracara cheriway*, *Cathartes aura*, *Chaetura chapmani*, *Coragyps atratus*, *Cypseloides chieriei*, *Falco femoralis*, *F. sparverius*, *Geranoaetus polyosoma*, *Herpetotheres cachinnans*, *Micrastur ruficollis*, *Milvago chimachima*, *Panyptila cayennensis*, *Psittacara wagleri*, *Rupornis magnirostris*, *Streptoprocne rutila* y *S. zonaris*) debido a la proximidad entre algunos puntos (por ejemplo E2 y Q1), la cual generaba incertidumbre sobre la estación en la cual se encontraba el o los individuos. No obstante, todas las especies registradas figuran en el listado general (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1394/3152>).

Las diferencias en la composición de la avifauna entre los periodos climáticos se evaluaron empleando los datos correspondientes al número de especies y de registros obtenidos en cada uno de los muestreos mediante un análisis de Kruskal-Wallis usando InfoStat (Di Rienzo, *et al.*, 2020) y teniendo en cuenta los promedios de precipitación mensual de los últimos 40 años en la región (estación 22060080, corriente Amoyá) (IDEAM, 2019).

Resultados y discusión

Durante el periodo 2013-2018 se registraron en el área de estudio 252 especies pertenecientes a 187 géneros, 46 familias y 21 órdenes (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1394/3152>). Este valor constituye el 35,4 % de las especies registradas en la ecorregión de los Valles Interandinos y el Caribe (Salaman, *et al.*, 2007), el 31,4 % de las aves del Tolima (EBird, 2020) y cerca del 13,2 % de la avifauna colombiana (Avenidaño, *et al.*, 2017), superando el número de especies reportado para otras cuencas del departamento (López-Lanús, *et al.*, 2000; Cortolima, 2009, 2014; Molina-Martínez, 2015; Corcuencas, 2016).

Según los estimadores ICE y Chao 2, la representatividad del muestreo varió entre el 61,8 % y el 84,8 % en las estaciones, así: E1 (riqueza estimada, RE: ICE, $IC_{95\%}$: 169,9-181,7; Chao 2, $IC_{95\%}$: 153,6-205,6); E2 (RE: ICE, $IC_{95\%}$: 122,7-127,3; Chao 2, $IC_{95\%}$: 118,9-154,9); E3 (RE: ICE, $IC_{95\%}$: 101,5-108,9; Chao 2, $IC_{95\%}$: 95,2-129,9); E4 (RE: ICE, $IC_{95\%}$: 170,4-185; Chao 2, $IC_{95\%}$: 153,6-189,5); E5 (RE: ICE, $IC_{95\%}$: 142,3-146,2; Chao 2, $IC_{95\%}$: 139,7-180,6); E6 (RE: ICE, $IC_{95\%}$: 142,9-148,1; Chao 2, $IC_{95\%}$: 132-158,6); E7 (RE: ICE,

IC_{95%}: 140,6-147,1; Chao 2, IC_{95%}: 121,3-158,5); Q1 (RE: ICE, IC_{95%}: 109,7-116,5; Chao 2, IC_{95%}: 94,2-121,1); Q2 (RE: ICE, IC_{95%}: 109,3-117,2; Chao 2, IC_{95%}: 106,5-152,8); Q3-RN (RE: ICE, IC_{95%}: 105,8-116; Chao 2, IC_{95%}: 103,2-138,8) (**Figura 2**), de manera que la diferencia entre la riqueza observada y la estimada aún es amplia, lo cual implica que la prospección fue insuficiente para obtener un inventario completo.

Asimismo, las curvas correspondientes a los “uniques” y “duplicates” no mostraron una tendencia clara al descenso (**Figura 2**), lo que prueba que todavía es posible registrar especies nuevas en todas las estaciones evaluadas. Sin embargo, según **Kery & Royle (2008)**, durante el desarrollo de un inventario es común que no se registre la totalidad de taxones de una región, ya que muchos de ellos son raros, pueden estar ausentes transitoriamente o el investigador no los reconoce, por lo cual los porcentajes obtenidos serían aceptables teniendo en cuenta el tamaño del área evaluada, aunque es necesario realizar más muestreos.

El orden Passeriformes registró el mayor número de especies (165), géneros (111) y familias (20), seguido por Apodiformes (30 especies, 25 géneros y dos familias); el resto de órdenes, presentaron entre una y nueve especies y entre una y tres familias. La gran riqueza de especies Passeriformes se asocia con el hecho de que este orden es el más diverso dentro de la clase aves, de modo que más de dos tercios de las especies pertenecen a él (**Hilty & Brown, 2001; Ricklefs, 2012; Clements, et al., 2019**). Además, constituye uno de los grupos más diversos en el país debido a su gran radiación adaptativa en las zonas tropicales (**Manchado & Peña, 2000; Tabilo-Valdivieso, 2006; Ríos, et al., 2007**), lo que coincide con lo reportado en otras cuencas del Tolima (**López-Lanús, et al., 2000; Cortolima, 2004; Losada-Prado, et al., 2005; Cortolima, 2009, 2014; Molina-Martínez, 2014; Molina-Martínez, 2015; Corcuencas, 2016**).

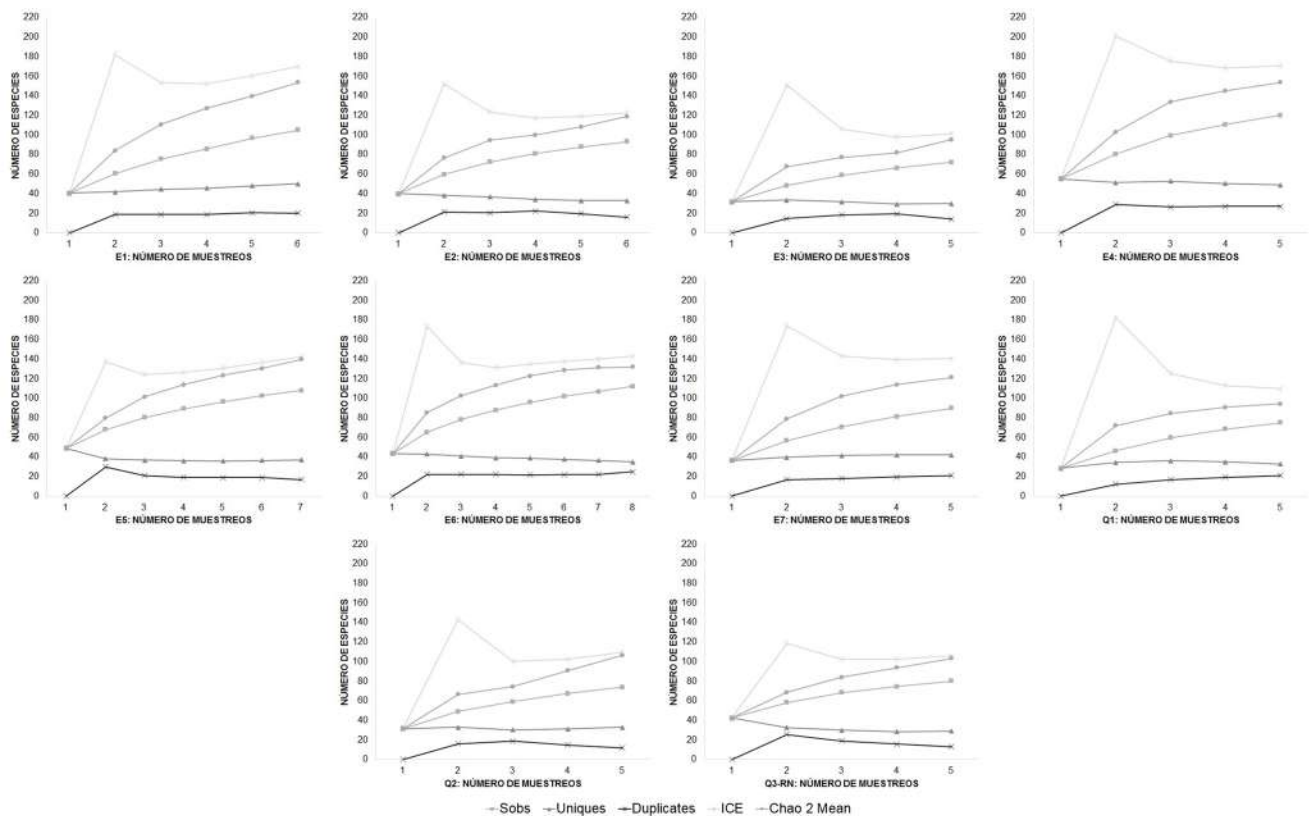


Figura 2. Curvas de acumulación de especies para la avifauna asociada a las estaciones de muestreo ubicadas en la cuenca del río Amoyá, cañón de Las Herosas, Chaparral-Tolima

En cuanto a las familias, Thraupidae y Tyrannidae presentaron el mayor número de especies, correspondiente al 31,3 % de ellas. Según autores como **Traylor (1977)**, **Ohlson, et al. (2008)** y **Burns, et al. (2014)**, estas dos familias se encuentran entre las más diversas en el Neotrópico, y la mayoría de sus especies se registran en Suramérica, en donde ocupan ambientes muy variados (**Isler & Isler, 1987**; **Hilty & Brown, 2001**; **Fitzpatrick, et al., 2004**), incluidas áreas con intervención antrópica (**Corporación Autónoma Regional de Risaralda-Carder & Wildlife Conservation Society-WCS, 2012**).

Además, del total de especies, el 2,8 % correspondió a endemismos, el 8,7 % a casi-endemismos, el 2,8 % a especies migratorias con poblaciones residentes y el 6,7 % a especies exclusivamente migratorias (5,9 % de ellas australes y 94,1 % boreales). En cuanto a las especies objeto de conservación, del total registrado, el 1,6 % se categoriza como vulnerable y el 0,4 %, en peligro crítico, en tanto que el 17,5 % se encuentra consignado dentro del apéndice II del CITES (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1394/3152>).

También se destaca la dominancia de especies correspondientes a las C-E II (45,6 %), III (26,5 %), y Ib (14,3 %) y, en menor medida, a las categorías Ia (5,6 %), IVa (2,8 %), Vb (2 %), IVb (1,6 %) y Va (1,6 %) (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1394/3152>), de manera que el 86,5 % de las especies registradas se encontró asociado a bosques secundarios, bordes de bosque y áreas abiertas con poca cobertura vegetal, siendo altamente tolerantes e independientes de un tipo de bosque específico (**Stiles & Bohórquez, 2000**). Este resultado se asemeja a lo reportado por **Losada-Prado & Molina-Martínez (2011)** y se debe a que parte del cañón y la mayoría de las estaciones se encuentran notablemente intervenidas, con coberturas afines a los sistemas productivos de la región, como pastizales, matorrales y algunos remanentes de bosque.

Por todo ello, la vegetación podría estar jugando un papel sustancial en la composición de la avifauna dentro del área de estudio, tal como lo señalan **MacArthur & MacArthur (1961)**, y ser importante, por ejemplo, en función de sus comportamientos de forrajeo (**Müller, et al., 2010**) o de sus gremios tróficos (**Laurance & Bierregaard, 1997**). En este contexto, en el trópico se ha reportado que los hábitats modificados suministran de forma casi permanente recursos cuantiosos (alimentación, percha, agua, entre otros) a una gran variedad de especies (**Loiselle & Blake, 1994**; **Ramírez-Albores, 2010**; **Carder & WCS, 2012**), principalmente generalistas; sin embargo, debido a que no se cuenta con datos sobre las variables de vegetación, es difícil dilucidar cuáles de sus características explicarían mejor la variación de la diversidad de aves en las estaciones (por ejemplo, la diversidad de árboles, la cobertura del dosel, la heterogeneidad estructural, entre otras) (**Heikkinen, et al., 2004**; **Vilchez, et al., 2008**).

Análisis espacial

Nuestros resultados muestran un patrón particular con dos picos de mayor riqueza, el primero entre los 972 y los 1.077 m (especialmente en E6, con 112 especies registradas y 132 a 143 estimadas), y el segundo, entre los 1.530 y los 2.095 m (siendo este el más alto, principalmente en E4, con 120 especies observadas y 154 a 170 estimadas) (**Figura 3**). En los GLM hechos con los datos de los estimadores ICE y Chao 2 se encontró que los modelos con mejor ajuste fueron el M4 (BIC= 96,4) y el M1 (BIC= 94,4), respectivamente, aunque las diferencias con respecto al segundo modelo de menor BIC son bajas (M1: BIC=96,1 con el ICE y M4: BIC=95,1 con el Chao 2), por lo que no hubo evidencia que permitiera favorecer un modelo frente al otro.

Por otro parte, el análisis en que se empleó la abundancia total (datos crudos) mostró un mayor apoyo a la existencia de dos picos de riqueza a lo largo del gradiente de elevación (M4, BIC=87,1 frente a M1, BIC=89), lo que respalda los resultados cualitativos descritos previamente. Este patrón difiere de los descritos por **McCain & Grytnes (2010)** y de los observados en otros estudios realizados en ecosistemas neotropicales en los que la

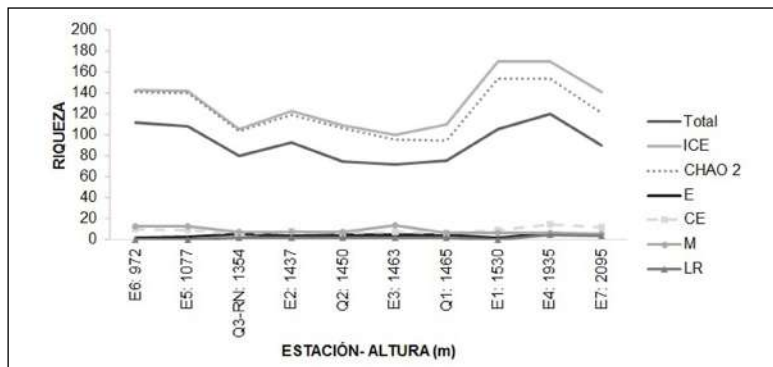


Figura 3. Riqueza de especies de aves en cada estación ubicada en la cuenca del río Amoyá, cañón de Las Hermosas (Endémica: E; casi endémica: CE; migratoria: M; LR: Libro rojo de aves de Colombia)

riqueza decrece con la elevación (Kattan & Franco, 2004; Herzog, *et al.*, 2005; Jaime-Escalante, *et al.*, 2016; Moreno-Palacios & Losada-Prado, 2016) o los valores más altos se registran en las alturas medias (1.000-2.000 m) (Molina-Martínez, 2014).

No es posible plantear que el alto número de especies en las estaciones altas se relacione estrictamente con diferencias en el esfuerzo de muestreo, pues las estaciones bajas y algunas medias (E2, E5 y E6) se evaluaron en un mayor número de ocasiones (Tabla 1), por lo tanto, los menores valores de riqueza en las estaciones localizadas en las veredas LV y DJ podrían relacionarse principalmente con el hecho de que algunas de ellas presentaban una menor diversidad de hábitats (Jobin, *et al.*, 2001; Hurlbert, 2004; Tews, *et al.*, 2004) (Tabla 2), lo cual restringe su oferta de recursos para las especies (Schneider, *et al.*, 2012; Santamaría-Rivero, *et al.*, 2016).

Por otra parte, según Loaiza-G (2017), los cambios en la composición de especies a lo largo de un gradiente altitudinal reflejan la existencia de factores que condicionan sus patrones de distribución de forma individual, tales como los recursos presentes a ciertas altitudes y los patrones históricos de diversificación de las aves (Terborgh, 1971, 1977; Blake & Loiselle, 2000, McCain, 2009; Jankowski, *et al.*, 2013). En este sentido, la variación en la composición de la comunidad de aves a lo largo de un gradiente altitudinal se ha registrado en otros trabajos (Jankowski, *et al.*, 2013; Moreno-Palacios & Losada-Prado, 2016; Martínez & Rechberger, 2007; Loaiza-G, 2017, entre otros), en los que la existencia de especies asociadas a hábitats específicos resulta en la formación de comunidades particulares (Jankowski, *et al.*, 2009; Suárez-Sanabria & Cadena, 2014; Loaiza-G, 2017).

De hecho, en nuestro estudio algunas especies restringieron su presencia a ciertas estaciones, de modo que en la E7 se reportaron 22 especies únicas: *Atlapetes albinucha*, *Heliodoxa rubinoides* y *Poecilatriccus ruficeps*; en la E4, 16 especies: *Atlapetes schistaceus*, *Boissonneaua flavescens* y *Pharomachrus auriceps*; en la E6, 14 especies, en la E5, siete especies, entre ellas, *Thamnophilus atrinucha* y *Veniliornis kirkii* y en las demás estaciones, entre seis y una especie: *Cinclus leucocephalus*, *Habia cristata* y *Rupicola peruvianus*, entre otras, a diferencia de E3 y Q3, en donde no se registraron especies exclusivas. Sin embargo, como lo reportaron Moreno-Palacios & Losada-Prado (2016) y Martínez & Rechberger (2007), se registraron algunas especies como *Coereba flaveola*, *Myiothlypis fulvicauda*, *Ramphocelus dimidiatus*, *Stelpnia cyanicollis*, *Thraupis episcopus*, *Tyrannus melancholicus*, entre otras nueve, con una amplia distribución y tolerancia a los cambios ambientales, por lo que no aportarían en la diferenciación composicional a lo largo del gradiente ambiental.

Por otro lado, el análisis de Jaccard y el nMDS (Stress: 0,16) fueron congruentes entre sí, mostrando la formación de cuatro grupos con similitudes de 18,8 a 63,8 % (E6 y E7 y Q2 y Q3-RN, respectivamente) (Figura 4A). Según esto, la variación en los porcentajes

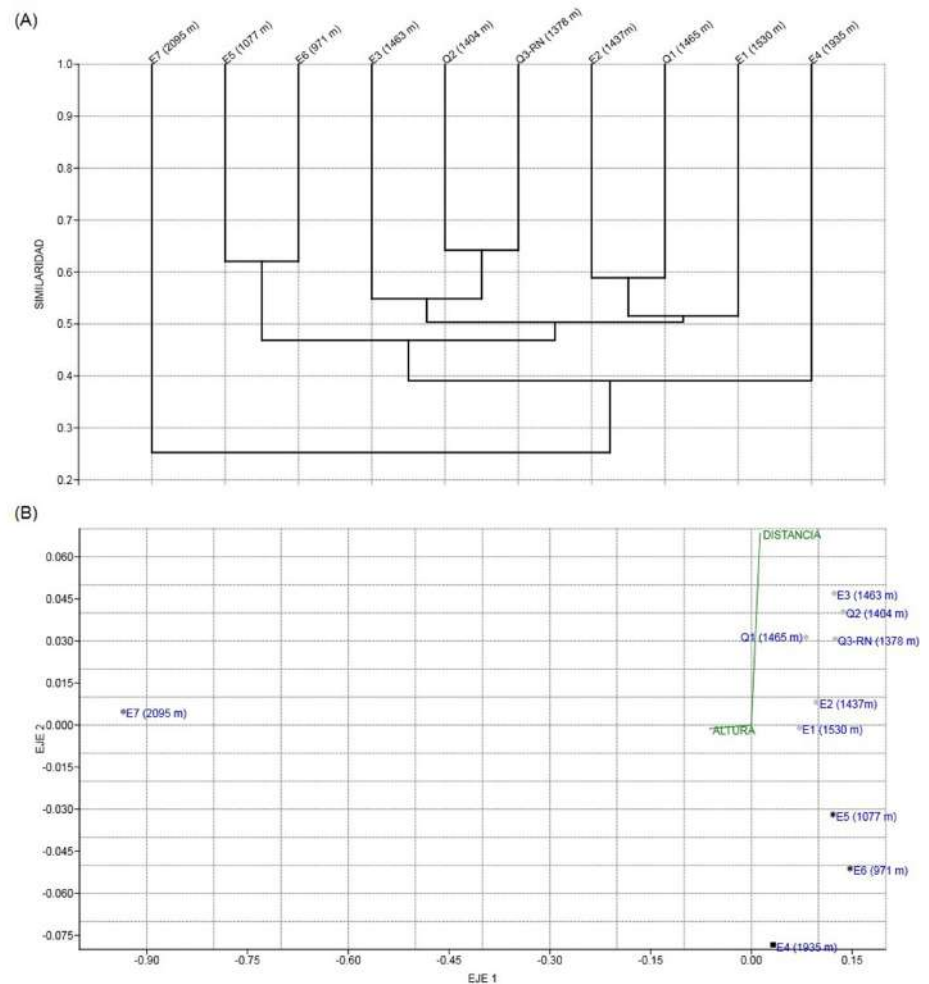


Figura 4. Análisis (A) de similitud (coeficiente de Jaccard) y (B) nMDS con datos de presencia-ausencia de las especies registradas en las estaciones de la cuenca del río Amoyá, cañón de Las Hermosas, Chaparral-Tolima

de similitud entre las estaciones estaría ligada al hecho de que cada una de ellas presenta una estructura de paisaje y vegetación distintiva, así como otras características físicas y ecológicas que podrían estar relacionadas con su altitud (principalmente en E7) (Terborgh, 1971) y su cercanía geográfica (E1 a E6 y Q1 a Q3-RN) (Figura 4B), lo que desembocó en que la estación E7 (por encima de los 2.000 m) se encontrara completamente separada de las demás, las cuales tuvieron una similitud entre unas y otras de cerca del 50 %.

Este resultado se ajusta parcialmente a lo reportado por Rahbek (1997), quien menciona que en los Andes suramericanos las zonas entre el nivel del mar y los 1.500 m de altura muestran una composición y diversidad de especies homogénea entre elevaciones. Sin embargo, como se observa en la Figura 4, estas variables cambiaron (especialmente la riqueza, la cual aumentó) particularmente en las zonas por debajo de los 1.100 m, de forma similar a lo encontrado por Blake & Loiselle (2000), lo cual contribuyó a la formación de un grupo más pequeño en el dendrograma y la gráfica del nMDS, conformado por las estaciones E5 y E6 (Figura 4).

Análisis temporal

Los valores más altos en cuanto al número de especies se registraron durante el 2018 con 179, seguido del 2016, con 163; los demás años presentaron entre 91 y 145 especies

(2014, 2013 y 2015 en orden ascendente). En cuanto a la similitud, en la escala anual se encontraron valores entre el 43,4 y el 63,5 % (2014, 2016; 2013, 2014, respectivamente), observándose la formación de tres grupos (2013-2014, 2018 y 2015-2016), mientras que los muestreos mostraron valores entre el 39,4 y el 66,5 % (feb-13, sep-16; sep-18, y nov-18, respectivamente), con agrupaciones iguales a las observadas entre los años.

Dado que durante el periodo de estudio las estaciones no mostraron cambios drásticos en su vegetación o un aumento en la intervención antrópica, la variación en la composición de la comunidad pudo deberse a las diferencias en el número y las estaciones muestreadas, así como a procesos de migración, colonización y extinciones locales (Wiens, 1992), los cuales comúnmente se presentan de manera equilibrada a lo largo del tiempo (Nichols, *et al.*, 2006), lo que da lugar a algunos periodos transicionales en los que se registran incrementos o pérdidas leves en el número de especies que obedecen a un recambio natural en la riqueza y la composición (Fleishman, *et al.*, 2006; Husté & Boulmier, 2007).

En este sentido, en el área de estudio algunas especies se registraron durante un solo año (2013: 14 especies; 2014: dos especies; 2015: nueve especies; 2016: 19 especies y 2018: 28 especies exclusivas), otras como *Setophaga fusca*, *Dacnis lineata* y *Saltator maximus* (E1, E2 y E5, respectivamente), en determinadas estaciones presentaron registros en los primeros muestreos y se ausentaron hasta el año 2018, en tanto que especies como *Serpophaga cinerea* (E6), *Icterus mesomelas* (E5) y *Cyanocorax affinis* (E2), únicamente se registraron durante los muestreos finales.

Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas en las detecciones (Kruskal-Wallis: $H=0,20$; $p=0,786$) ni en el número efectivo de especies entre las temporadas climáticas (212 especies en lluvias y 207 en época seca; Kruskal-Wallis: $H=0,56$; $p=0,571$), por lo cual el registro de algunas especies más durante el periodo de lluvias (212 *versus* 207 de la época seca) se asoció con el hecho de que los muestreos realizados durante esta temporada se solaparon con gran parte del periodo de migración boreal (Ocampo-Peñuela, 2010).

En este sentido, en total se registraron 15 especies migratorias durante las lluvias, y de ellas siete estuvieron restringidas a esta temporada (*Contopus virens*, *Catharus minimus*, *Pheucticus ludovicianus*, *Empidonax traillii*, *Coccyzus americanus*, *G. polyosoma* y *Setophaga castanea*) y diez a la época seca, entre las cuales *Empidonax alnorum* y *Piranga olivacea* fueron exclusivas de este periodo. En cuanto a las especies residentes, pese a que su composición varió entre las temporadas, se encontraron 38 únicas durante las lluvias (entre las que se destacan *Stelgidopteryx ruficollis* y *Mionectes olivaceus*) y en el periodo seco (con una detección alta de *P. wagleri*) y su riqueza fue igual, con 197 especies en cada temporada.

Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por Zambrano-Chávez (2010) en Lima y por Cárdenas & Hurtado (2019) en Cuzco, Perú, quienes no encontraron diferencias significativas en la riqueza y el número de detecciones de aves entre el periodo seco y el de lluvias. Dado que se reconoce ampliamente que factores como la disponibilidad de energía y agua están fuertemente correlacionados con la riqueza de especies (Hawkins, *et al.*, 2003; Currie, *et al.*, 2004; Turner, 2004), nuestro resultado indicaría que en la región la oferta y el acceso a los recursos es constante a lo largo del año.

Conclusiones

A pesar de que la cuenca del río Amoyá en el cañón de Las Herosas constituye una región con alta intervención antrópica y en ella prevalecen especies tolerantes a dichas condiciones, es posible postularla como un área importante para la conservación de la avifauna tolimense, ya que cuenta con una gran riqueza de taxones comparada con otras cuencas del departamento y también acoge a un número relevante de especies endémicas, migratorias y amenazadas.

Además, pese a la alta prevalencia de aves generalistas y su homogeneidad en el área de estudio, nuestros resultados sugieren la existencia de cuatro ensamblajes: la comunidad de tierras bajas (estaciones por debajo de los 1.100 m), la de tierras medias (estaciones

entre los 1.400 y 1.550 m), la de tierras medias-altas (1.935 m) y la de zonas altas (2.095 m), la cual resulta la menos similar (**Figura 4**). Asimismo, a escala temporal la comunidad mostró ligeras variaciones en su riqueza a través del tiempo, lo que podría deberse tanto a las diferencias en el esfuerzo de muestreo como a los procesos relacionados con su dinámica poblacional (migración, colonización, extinción local); sin embargo, es necesario contar con más información para dilucidar la forma en que estos procesos se están llevando a cabo.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Zoología de la Universidad del Tolima y a Isagen por el suministro de datos (Convenio No. 47/821). Al programa “Jóvenes Investigadores e Innovadores 812-18” del Ministerio de Ciencia por la beca-pasantía otorgada a J. N. Sánchez-Guzmán, de la cual deriva este artículo. A Cristhian Gaitán-García por la ayuda en la recolección de datos y el trabajo de campo.

Información suplementaria

Tabla 1S. Aves registradas en la cuenca del río Amoyá, Cañón de Las Hermosas (Chaparral, Tolima) (EST: estatus; Endémico: E; Casi endémico: CE; Migratorio austral: Ma; Migratorio boreal: Mb; Int: Introducido; LR: Libro rojo de aves de Colombia; CR: En peligro crítico; VU: Vulnerable; LC: Preocupación menor; DD: Datos deficientes; NP: No presenta; C-E: Categorías ecológicas). Lataxonomíasigue a **Remsen *et al.*** (2020). Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1394/3152>

Contribución de los autores

JNSG-SLP: concepción del estudio, metodología, análisis formal, recolección de datos; JNSG-SLP-JCVG: redacción y preparación del manuscrito, revisión crítica y comentarios; SLP: supervisión y administración del proyecto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses que pueda afectar el contenido de este artículo.

Referencias

- Avendaño, J.E., Bohórquez, C.I., Rosselli, L., Arzuza-Buelvas, D., Estela, F.A., Cuervo, A.M., Stiles, F.G., Renjifo, L.M.** (2017). Lista de chequeo de las aves de Colombia: una síntesis del estado del conocimiento desde Hilty y Brown (1986). *Ornitología Colombiana*. **16**: 1-83.
- Ayerbe-Quiñones, F.** (2018). Guía ilustrada de la avifauna Colombiana. Bogotá D. C., Colombia: Wildlife Conservation Society.
- Blake, J.G. & Loiselle, B.A.** (2000). Diversity of birds along an elevational gradient in the Cordillera Central, Costa Rica. *Auk*. **117** (3): 663-686. Doi: 10.1642/0004-8038(2000)117[0663:dobaae]2.0.co;2
- Burns, K.J., Shultz, A.J., Title, P.O., Mason, N.A., Barker, F.K., Klicka, J., Lanyon, S.M., Lovette, I.J.** (2014). Phylogenetics and diversification of tanagers (Passeriformes: Thraupidae), the largest radiation of Neotropical songbirds. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. **75**: 41-77. Doi: 10.1016/j.ympev.2014.02.006
- Calidris.** (2017). Información actualizada sobre las AICAS reconocidas para el país, con la identificación de la AICAS con potencial para el aviturismo: Informe técnico. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 17 pp.
- Cárdenas, W.N. & Hurtado, L.B.** (2019). Variación de la abundancia y diversidad de aves en el humedal Lucre-Huacarpay, Quispicanchi/Cusco/Perú, durante el periodo de “El Niño” 2015-2016. *Ecología Aplicada*. **18** (2): 111-114. Doi: 10.21704/rea.v18i2.1330
- Clements, J.F., Schulenberg, T.S., Iliff, M.J., Billerman, S.M., Fredericks, T.A., Sullivan, B.L., Wood, C.L.** (2019). The eBird/Clements Checklist of Birds of the World: v2019. Fecha de consulta: mayo de 2019. Disponible en: <https://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/download/>

- Colwell, R.K.** (2013). Estimates: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9. <purl.oclc.org/estimates>
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda-Carder & Wildlife Conservation Society (WCS)** (2012). Caracterización de fauna (ranas y aves) y flora en seis humedales del departamento de Risaralda: Informe técnico. Pereira, Colombia: Carder. 77 pp.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima)** (2004). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Prado: Fase II Diagnóstico: Informe técnico. Ibagué, Colombia: Cortolima. 892 pp.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima-Cortolima** (2005). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Amoyá: Fase II Diagnóstico: Informe técnico. Ibagué, Colombia: Cortolima. 619 pp.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima-Cortolima** (2009). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Anamichú- Biodiversidad: Informe técnico. Ibagué, Colombia: CORTOLIMA. 758 pp.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima-Cortolima** (2014). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Gualí. Fase II Diagnóstico- Capítulo III componente biótico: Informe técnico. Ibagué, Colombia: Cortolima. 257 pp.
- Corporación de Cuencas del Tolima-Corcuenas** (2016). Actualización POMCA río Recio y Venadillo- Caracterización de fauna: Informe técnico. Ibagué, Colombia: CORCUENCAS. 117 pp.
- Currie, D.J., Mittelbach, G.G., Cornell, H.V., Field, R., Guegan, J.-F., Hawkins, B.A., Kaufman, D.M., Kerr, J.T., Oberdorff, T., O'Brien, E., Turner, J.R.G.** (2004). Predictions and tests of climate-based hypotheses of broad-scale variation in taxonomic richness. *Ecology Letters*. 7 (12): 1121-1134. Doi: 10.1111/j.1461-0248.2004.00671.x
- Di Rienzo, J.A., Casanove, F., Bal Zarini, M.G., González, L., Tabla Da, M., Robledo, C.W.** (2020). InfoStat versión 2020, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- EBird.** (2020). Ebird, Aves del Tolima, Colombia. Fecha de consulta: mayo de 2020. Disponible en: <https://ebird.org/region/CO-TOL?yr=all>
- Fitzpatrick, J., Bates, J., Bostwick, K., Caballero, I., Clock, B., Farnsworth, A., Hosner, P., Joseph, L., Langham, G., Lebbin, D., Mobley, J., Robbins, M., Scholes, E., Tello, J., Walther, B., Zimmer, K.** (2004). Family Tyrannidae (Tyrant-flycatchers). En J. del Hoyo, A. Elliot y D. Christie (Eds.). *Handbook of the Birds of the World*. Vol. 9. Cotingas to Pipits and Wagtails (170-463). Barcelona, España: Lynx Ediciones.
- Fleishman, E., Noss, R., Noon, B.R.** (2006). Utility and limitations of species richness metrics for conservation planning. *Ecological Indicators*. 6: 543-553. Doi: 10.1016/j.ecolind.2005.07.005
- Grupo de Investigación en Zoología (GIZ) & ISAGEN.** (2014). Monitoreo de vertebrados terrestres (anfibios, reptiles, aves y mamíferos) asociados a la central hidroeléctrica del río Amoyá la Esperanza: Informe técnico. Ibagué, Colombia: Universidad Del Tolima. 194 pp.
- Grupo de Investigación en Zoología (GIZ) & ISAGEN.** (2018). Evaluación limnológica del río Amoyá y sus tributarios La Arenosa, La Alcancía y La Virginia; Monitoreo de fauna vertebrada silvestre asociada a la Central Hidroeléctrica río Amoyá- La Esperanza y seguimiento a la colisión de aves en la Línea de Transmisión Amoyá- Tuluni. COMPONENTE II: Monitoreo de fauna vertebrada silvestre asociadas a la central hidroeléctrica río Amoyá. (2013-2018): Informe técnico. Ibagué, Colombia: Universidad Del Tolima. 344 pp.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Paleontología Electrónica*. 4 (1): 9.
- Hawkins, B.A., Field, R., Cornell, H.V., Currie, D.J., Guègan, J.-F., Kaufman, D.M., Kerr, J.T., Mittelbach, G.G., Oberdorff, T., O'Brien, E.M., Porter, E.E., Turner, J.R.G.** (2003). Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*. 84 (12): 3105-3117. Doi: 10.1890/03-8006
- Heikkinen, R.K., Luoto, M., Virkkala, R., Rainio, K.** (2004). Effects of habitat cover, landscape structure and spatial variables on the abundance of birds in an agricultural-forest mosaic. *Journal of Applied Ecology*. 41 (5): 824-835. Doi: 10.1111/j.0021-8901.2004.00938.x
- Herzog, S.K., Kessler, M., Bach, K.** (2005). The elevational gradient in Andean bird species richness at the local scale: a foothill peak and a high-elevation plateau. *Ecography*. 28 (2): 209-222. Doi: 10.1111/j.0906-7590.2005.03935.x
- Hilty, S.L. & Brown, W.L.** (2001). Guía de las aves de Colombia. Edición en español. Cali, Colombia: American Bird Conservation (ABC).

- Holdridge, L.** (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 216 p.
- Hurlbert, A.H.** (2004). Species-energy relationships and habitat complexity in bird communities. *Ecology Letters*. **7** (8): 714-720. Doi: 10.1111/j.1461-0248.2004.00630.x
- Husté, A. & Boulinier, T.** (2007). Determinants of local extinction and turnover rates in urban bird communities. *Ecological Applications*. **17** (1): 168-180. Doi: 10.1890/1051-0761(2007)017[0168:doleat]2.0.co;2
- IDEAM** (2019). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estación 22060080, corriente Amoyá. Fecha de consulta: 28 de mayo de 2019. Disponible en: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Isler, M.L. & Isler P.R.** (1987). *The Tanagers: natural history, distribution and identification*. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press. 404 p.
- Jaime-Escalante, N.G., Figueroa-Esquivel, E.M., Villaseñor-Gómez, J.F., Jacobo-Sapien, E.A., Puebla-Olivares, F.** (2016). Distribución altitudinal de la riqueza y composición de “ensamblajes” de aves en una zona montañosa al sur de Nayarit, México. *Revista de Biología Tropical*. **64** (4): 1537-1551. Doi: 10.15517/rbt.v64i4.20255
- Jankowski, J.E., Ciecka, A.L., Meyer, N.Y., Rabenold, K.N.** (2009). Beta diversity along environmental gradients: implications of habitat specialization in tropical montane landscapes. *Journal of Animal Ecology*. **78** (2): 315-327. Doi: 10.1111/j.1365-2656.2008.01487.x
- Jankowski, J.E., Merkord, C.L., Ríos, W.F., Cabrera, K.G., Revilla, N.S., Silman, M.R.** (2013). The relationship of tropical bird communities to tree species composition and vegetation structure along an Andean elevational gradient. *Journal of Biogeography*. **40** (5): 950-962. Doi: 10.1111/jbi.12041
- Jobin, B., Choinière, L., Bélanger, L.** (2001). Bird use of three types of field margins in relation to intensive agriculture in Québec, Canada. *Agriculture, ecosystems & environment*. **84** (2): 131-143. Doi: 10.1016/S0167-8809(00)00206-1
- Kattan, G.H. & Franco, P.** (2004). Bird diversity along elevational gradients in the Andes of Colombia: area and mass effects. *Global Ecology and Biogeography*. **13** (5): 451-458. Doi: 10.1111/j.1466-822X.2004.00117.x
- Kery, M. & Royle, J.A.** (2008). Hierarchical Bayes estimation of species richness and occupancy in spatially replicated surveys. *Journal of Applied Ecology*. **45** (2): 589-598. Doi: 10.1111/j.1365-2664.2007.01441.x
- Laurance, W.F. & Bierregaard, R.O.Jr.** (1997). *Tropical forest remnants: ecology, management, and conservation of fragmented communities*. Chicago, USA: University of Chicago Press. 632 p.
- Loaiza-G, C.** (2017). Dinámica temporal y espacial de una comunidad de aves en un gradiente altitudinal de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica, vertiente Caribe. *Caldasia*. **39** (2): 310-325. Doi: 10.15446/caldasia.v39n2.60647
- Loiselle, B.A. & Blake, J.G.** (1994). Annual variation in birds and plants of a tropical second-growth woodland. *The Condor*. **96** (2): 368-380. Doi: 10.2307/1369321
- López-Lanús, B., Salaman, P.G., Cowley, T.P., Arango-Caro, S., Rengifo, L. M.** (2000). The threatened birds of the Río Toche, Cordillera Central, Colombia. *Cotinga*. **14**: 17-23.
- Losada-Prado, S., Carvajal-Lozano, A.M., Molina-Martínez, Y.G.** (2005). Listado de especies de aves de la cuenca del río Coello (Tolima, Colombia). *Biota Colombiana*. **6** (1): 101-115.
- Losada-Prado, S. & Molina-Martínez, Y.** (2011). Avifauna del bosque seco tropical en el departamento del Tolima (Colombia): análisis de la comunidad. *Caldasia*. **33** (1): 271-294.
- MacArthur, R.H. & MacArthur, J.W.** (1961). On Bird Species Diversity. *Ecology*. **42** (3): 594-598. Doi: 10.2307/1932254
- McCain, C.M.** (2009). Global analysis of bird elevational diversity. *Global Ecology and Biogeography*. **18** (3): 346-360. Doi: 10.1111/j.1466-8238.2008.00443.x
- McCain, C.M. & Grytnes, J.A.** (2010). Elevational gradients in species richness. *Encyclopedia of Life Sciences (eLS)*. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester. Doi: 10.1002/9780470015902.a0022548
- Manchado, M. & Peña, G.** (2000). Estructura numérica de la comunidad de aves del orden Passeriformes en dos bosques con diferentes grados de intervención antrópica en los corregimientos de Salero y San Francisco de Icho. (Tesis de Pregrado). Chocó: Universidad Tecnológica del Chocó, Facultad de Ciencias Básicas. 55 pp.
- Martínez, O. & Rechberger, J.** (2007). Características de la avifauna en un gradiente altitudinal de un bosque nublado andino en La Paz, Bolivia. *Revista Peruana de Biología*. **14** (2): 225-236. Doi: 10.15381/rpb.v14i2.1745

- Molina-Martínez, Y.G.** (2014). Birds of the Totare River Basin, Colombia. *Check List*. **10** (2): 269-286. Doi: 10.15560/10.2.269
- Molina-Martínez, Y.G.** (2015). Evaluación rápida de las aves de la parte baja de la cuenca del río Anamichú, municipio de Río Blanco-Tolima. *Tumbaga*. **2** (10): 72-93.
- Moreno, C.E.** (2001). Manual de métodos para medir la biodiversidad. Zaragoza, España: M&T-Manuales y Tesis SEA.
- Moreno-Palacios, M. & Losada-Prado, S.** (2016). Avifauna del complejo de páramos Chilí-Barragán (Tolima, Colombia). *Biota Colombiana*. **17** (Supl 2-Páramos): 114-133. Doi: 10.21068/C2016v17s02a07
- Müller, J., Stadler, J., Brandl, R.** (2010). Composition versus physiognomy of vegetation as predictors of bird assemblages: The role of lidar. *Remote Sensing of Environment*. **114** (3): 490-495. Doi: 10.1016/j.rse.2009.10.006
- Nichols, J.D., Hines, J.E., Sauer, J.R., Boulinier, T., Cam, E.** (2006). Intra-guild compensation regulates species richness in desert rodents: comment. *Ecology*. **87**: 2118-2121. Doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[2118:icrsrj]2.0.co;2
- Ocampo-Peñuela, N.** (2010). El fenómeno de la migración en aves: una mirada desde la Orinoquia. *Orinoquia*. **14** (2): 188-200. ISSN-e 0121-3709.
- Ohlson, J., Fjeldså, J., Ericson, P.G.** (2008). Tyrant flycatchers coming out in the open: phylogeny and ecological radiation of Tyrannidae (Aves, Passeriformes). *Zoologica Scripta*. **37** (3): 315-335. Doi: 10.1111/j.1463-6409.2008.00325.x
- Rahbek, C.** (1997). The relationship among area, elevation, and regional species richness in Neotropical birds. *The American Naturalist*. **149** (5): 875-902. Doi: 10.1086/286028
- Ralph, C.J., Geupel, G.R., Pyle, P., Martin, T.E., De Sante, D.F., Milá, B.** (1996). Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Albany, USA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture.
- Ralph, C.J., Widdowson, M., Widdowson, B., O'donnell, B., Frey, R.I.** (2008). Tortuguero bird monitoring station protocol for the Tortuguero integrated bird monitoring program: Informe técnico. Arcata, USA: U.S. Forest Service, Redwood Sciences Laboratory.
- Ramírez-Albores, J.E.** (2010). Diversidad de aves de hábitats naturales y modificados en un paisaje de la Depresión Central de Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*. **58** (1): 511-528. Doi: 10.15517/rbt.v58i1.5225
- Remsen, J.V., Areta, J.I., Cadena, C.D., Jaramillo, A., Nores, M., Pacheco, J.F., Pérez-Emán, J., Robbins, M.B., Stiles, F.G., Stotz, D.F., Zimmer, K.J.** Versión 09 de marzo de 2020. A classification of the bird species of South America. American Ornithologists Union. Obtenido de South American Classification Committee, American Ornithological Society. <http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/SACCBaseline.html>
- Renjifo, L.M., Gómez, M.F., Velásquez-Tibatá, J., Amaya-Villarreal, A.M., Kattan, G.H., Amaya-Espinel, J.D., Burbano-Girón, J.** (2014). Libro rojo de las aves de Colombia Volumen 1: bosques húmedos de los Andes y la costa Pacífica. Bogotá D. C., Colombia: Editorial Pontificia Universidad Javeriana e Instituto von Humboldt.
- Ricklefs, R.E.** (2012). Naturalists, Natural History, and the Nature of Biological Diversity. *The American Naturalist*. **179** (4): 423-435. Doi: 10.1086/664622
- Ríos, M.O., García, H., Renjifo-Mosquera, J.T.** (2007). Inventario de aves Passeriformes en áreas de expansión urbana en el municipio de Quibdó, Chocó, Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó*. **26**: 79-89. ISSN-e 1657-349.
- Roda, J., Franco, A.M., Baptieste, M.P., Munera, C., Gómez-Cely, M.** (2003). Manual de identificación CITES de aves de Colombia. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Romero, M., Cabrera, E., Ortíz, N.** (2008). Informe sobre el estado de la biodiversidad en Colombia 2006-2007: Informe técnico. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación Alexander von Humboldt. 181 pp.
- Salaman, P., Donegan, T., Caro, D.** (2007). Listado de avifauna colombiana. *Conservación Colombiana*. **5**: 1-85.
- Santamaría-Rivero, W., Leyequién, E., Hernández-Stefanoni, J.L., Wood, P.** (2016). Influence of landscape structure and forest age on the richness and abundance of different bird feeding guilds and forest-dependent birds in a seasonal dry tropical forest of Yucatán, México. *Tropical Ecology*. **57**: 313-332. Doi: 10.1023/A:1008805230673

- Schneider, N.A., Low, M., Arlt, D., Pärt, T.** (2012). Contrast in edge vegetation structure modifies the predation risk of natural ground nests in an agricultural landscape. *Plos One*. **7** (2): 1-6. Doi: 10.1371/journal.pone.0031517
- Stiles, F.G. & Bohórquez C.I.** (2000). Evaluando el estado de la biodiversidad: el caso de la avifauna de la Serranía de las Quinchas, Boyacá, Colombia. *Caldasia*. **22** (1): 61-92.
- Suárez-Sanabria, N. & Cadena, C.D.** (2014). Diversidad y estructura de la avifauna del Valle de Lagunillas, Parque Nacional Natural El Cocuy, Colombia. *Ornitología Colombiana*. **14**: 48-61.
- Tabilo-Valdivieso, E.** (2006). Avifauna del humedal Tambo-Puquios. *Geoecológica de los Andes desérticos*. En J. Cepeda, F. Squeo, A. Cortés, J. Oyarzun y H. Zavala (Eds.). Humedal Tambo-Puquios en la Alta Montaña del Valle del Equil (355-379). La Serena, Chile: Ediciones Universidad de la Serena.
- Terborgh, J.** (1971). Distribution on elevational gradients: theory and a preliminary interpretation of distributional patterns in the avifauna of the Cordillera Vilcabamba, Perú. *Ecology*. **52** (1): 23-40. Doi: 10.2307/1934735
- Terborgh, J.** (1977). Bird species diversity on an Andean elevational gradient. *Ecology*. **58** (5): 1007-1019. Doi: 10.2307/1936921
- Tews, J., Brose, U., Grimm, V., Tielbörger, K., Wichmann, M.C., Schwager, M., Jeltsch, F.** (2004). Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*. **31** (1): 79-92. Doi: 10.1046/j.0305-0270.2003.00994.x
- Traylor, M.A.** (1977). A classification of the Tyrant Flycatchers (Tyrannidae). *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology*. **148**: 129-184. Doi: 10.5962/bhl.part.2949
- Turner, J.R.G.** (2004). Explaining the global biodiversity gradient: energy, area, history and natural selection. *Basic and Applied Ecology*. **5** (5): 435-448. Doi: 10.1016/j.baae.2004.08.004
- Universidad Católica de Oriente.** (2013). Muestreo y seguimiento de la diversidad biológica del Río Amoyá: Informe técnico. Río Negro, Colombia: Universidad Católica de Oriente. 194 pp.
- Vílchez, S., Harvey, C., Sánchez-Merlo, D., Medina, A., Hernández, B., Taylor, R.** (2008). Diversidad y composición de aves en un agropaisaje de Nicaragua. En C. Harvey y J. Sáenz (Eds.) (547-576). *Evaluación y conservación de Biodiversidad en paisajes fragmentados de Mesoamérica*. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Instituto Nacional de Biodiversidad.
- Villareal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M. y Umaña A.M.** (2004). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Wiens, J.A.** (1992). *The Ecology of Bird Communities*. Volume 1 (Foundations and Patterns). Cambridge, Great Britain: Cambridge University Press. 560 p.
- Zambrano-Chávez, S.A.** (2010). Distribución y abundancia de las aves del Bosque de Zárate, 2004–2005. (Tesis de Pregrado). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Biológicas. 167 pp.

Artículo original

Estructura de tallas, crecimiento y tasa de explotación de *Potamorhina altamazonica* (Characiformes: Curimatidae) en el río Ucayali (Perú)

Length structure, growth, and mortality of *Potamorhina altamazonica* (Characiformes: Curimatidae) in Ucayali River (Perú)

Stive Flores-Gómez^{1,*}, José Riofrío-Quijandría², Lilia Salazar-Ramírez¹,
Javier Zavaleta-Flores¹

¹ Instituto del Mar del Perú, Chucuito - Callao, Perú

² Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Resumen

La llambina (*Potamorhina altamazonica*) es un recurso importante en la pesquería comercial de la región de Ucayali (Perú). En dicho contexto, el presente estudio se fijó como objetivo determinar su estructura de tallas, parámetros de crecimiento y tasa de explotación en el río Ucayali. Se analizaron las muestras tomadas de las capturas de pesca comercial en Pucallpa, ciudad donde se concentra la mayor flota pesquera de esta región. Los resultados se basan en ejemplares muestreados entre enero del 2008 y diciembre del 2012. Se determinó que la talla media de captura fue menor en la región de Ucayali que en la de Loreto, lo que evidencia una mayor presión de la pesca de este recurso en la primera. Los parámetros de crecimiento estimados para sexos combinados fueron $L_{\infty}=31,45$ cm y $K=0,37$ año⁻¹. Mediante la función de von Bertalanffy se describió satisfactoriamente el crecimiento determinado a partir del análisis electrónico de la frecuencia de longitudes; se observó que la especie creció rápidamente durante el primer año, lo que le permitiría alcanzar una longevidad de 8,1 años en teoría. La tasa de mortalidad total (Z) estimada fue relativamente alta (1,69 año⁻¹), en tanto que la de explotación, considerando el coeficiente de mortalidad natural ($M=0,90$ año⁻¹) y de mortalidad por pesca ($F=0,79$ año⁻¹), fue de 0,47 año⁻¹, lo que indica que el recurso se encontraba próximo al nivel óptimo de explotación ($E=0,5$).

Palabras clave: Amazonia; Biología; Estado; Pesca; Población.

Abstract

The llambina *Potamorhina altamazonica* is one of the most important resources for the commercial fishery in the Ucayali region. In this context, we conducted this study to determine the size structure, growth parameters, and exploitation rate of the llambina in the Ucayali River (Ucayali region). We analyzed samples taken from commercial fishing catches in Pucallpa, which concentrates the largest fishing fleet in the region. Our results are based on specimens sampled between January 2008 and December 2012. We determined that the average catch size of llambina was lower in the Ucayali region compared to that of Loreto evidencing a higher fishing pressure in Ucayali. The estimated growth parameters for combined sexes were $L_{\infty} = 31.45$ cm and $K = 0.37$ year⁻¹. The von Bertalanffy function satisfactorily described the growth in length determined by the electronic analysis of length frequency and allowed us to observe that the species grows rapidly during the first year and it reaches the theoretical longevity at 8,1 years. The estimated total mortality rate (Z) was relatively high (1.69 year⁻¹) while the exploitation rate considering the natural mortality coefficient ($M = 0.90$ year⁻¹) and the fishing mortality rate ($F = 0.79$ year⁻¹) was estimated at 0.47 year⁻¹, which indicates that the resource is almost at the optimal level of exploitation ($E = 0.5$).

Keywords: Amazonia; Biology; Catch; Condition; Population.

Citación: Flores-Gómez S, Riofrío-Quijandría J, Salazar-Ramírez L, Zavaleta-Flores J. Estructura de tallas, crecimiento y tasa de explotación de *Potamorhina altamazonica* (Characiformes: Curimatidae) en el río Ucayali (Perú). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1128-1136, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1460>

Editor: Arturo Acero

***Correspondencia:**
Stive Flores-Gómez;
danstive@gmail.com

Recibido: 29 de abril de 2021

Aceptado: 5 de septiembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Introducción

La cuenca amazónica es el mayor sistema de aguas tropicales del mundo (Novoa, 1996); sus aguas albergan un gran número de especies de peces que constituyen un importante recurso para la alimentación y la economía local (Pinedo & Soria, 2006). En el río Ucayali uno de los recursos pesqueros de mayor importancia en la pesquería comercial es la llambina (*Potamorhina altamazonica*), especie cuyos volúmenes de desembarque compiten con los de otras como el “boquichico” (*Prochilodus nigricans*), la “sardina” (*Triporthesus angulatus*) o la “palometa” (*Mylossoma albiscopum*), y sustentan la industria pesquera local (Riofrío, 1998; Zorrilla, *et al.*, 2016; García, *et al.*, 2009).

Dada a la importancia de *P. altamazonica* como recurso pesquero, resulta de elemental importancia conocer su biología para determinar las estrategias que permitan su conservación y uso racional, dado que cuando se trata de recursos pesqueros a menudo las deficientes políticas de manejo y conservación hacen insostenible la actividad pesquera (Pauly & Palomares, 2005; United Nations Environment Program - UNEP, 2004). En diversos estudios en los ríos de la cuenca amazónica se señala que la especie es bentopelágica y habita en las márgenes de lagos y ríos de aguas blancas y negras (Saint-Paul, *et al.*, 2000; Claro-Jr., 2003), y que en las regiones tropicales puede vivir a temperaturas de 22 a 26 °C (Baensch & Riehl, 1985). En los lagos suele capturarse en el bosque inundado y en aguas abiertas, principalmente durante el día (Corredor, 2004). Es iliófaga y posee una dieta constituida por materia orgánica, algas y microorganismos que viven en el cieno (Pouilly, *et al.*, 2004). Su estómago tiene paredes musculosas en forma de molino y un intestino largo especializado para la digestión del tipo de alimento que ingiere. Los peces jóvenes son capturados en la vegetación acuática (Sánchez-Botero & Araújo-Lima, 2001). Tiene hábitos diurnos, migra, su desove es total y su fecundación externa; en la época de reproducción forma grandes cardúmenes para desovar río arriba en ambientes de aguas blancas (Granado-Lorencio, *et al.*, 2005). La reproducción ocurre durante la creciente (Santos, 2006; Flores-Gómez, 2015). En el río Ucayali las hembras alcanzan la madurez gonadal cuando llegan a los 17,8 cm de longitud total y los machos a los 18,4 cm. El objetivo del presente estudio fue conocer las características poblacionales de *P. altamazonica* con énfasis en la estructura de tallas, los parámetros de crecimiento y la tasa de explotación, aspectos de importancia para su manejo y conservación en el río Ucayali.

Materiales y métodos

Área de estudio

Las muestras biológicas se obtuvieron mensualmente de los desembarques de la flota pesquera comercial en el puerto de Pucallpa (8°23'15.02" S - 74°31'42.43" W) entre el 2008 y el 2012, provenientes principalmente de las diferentes subcuencas que forman parte de la cuenca del río Ucayali (región Ucayali): Callería, Utuquinia, Abujao, Tamaya, Sheshea, Iparia y Aruya (Figura 1).

Obtención de información

Para obtener la información sobre las tallas (considerando la longitud total, LT), se registró un mínimo de 120 individuos por mes tomados de manera aleatoria de la captura total (Gulland & Rosemberg, 1992). En meses con desembarques significativos se muestrearon más de 120 especímenes. Los ejemplares se midieron con un ictiómetro calibrado a 0,5 cm. Para determinar la frecuencia de cada talla se consideraron clases de tallas de 1 cm.

Análisis de la información

Se determinó la ecuación de crecimiento de von Bertalanffy $L_t = L_{\infty} (1 - e^{-K(t-t_0)})$ mediante el análisis electrónico de frecuencia de longitudes (programa ELEFAN), y la rutina del paquete FiSAT- ICLARM Fish Stock Assessment Tools (Gayaniño & Pauly, 1997; Gayaniño, *et al.*, 2005), donde L_t es la talla del pez en la edad t ; L_{∞} es la longitud asintótica (longitud media que un pez alcanzaría si creciera indefinidamente), K es el coeficiente de

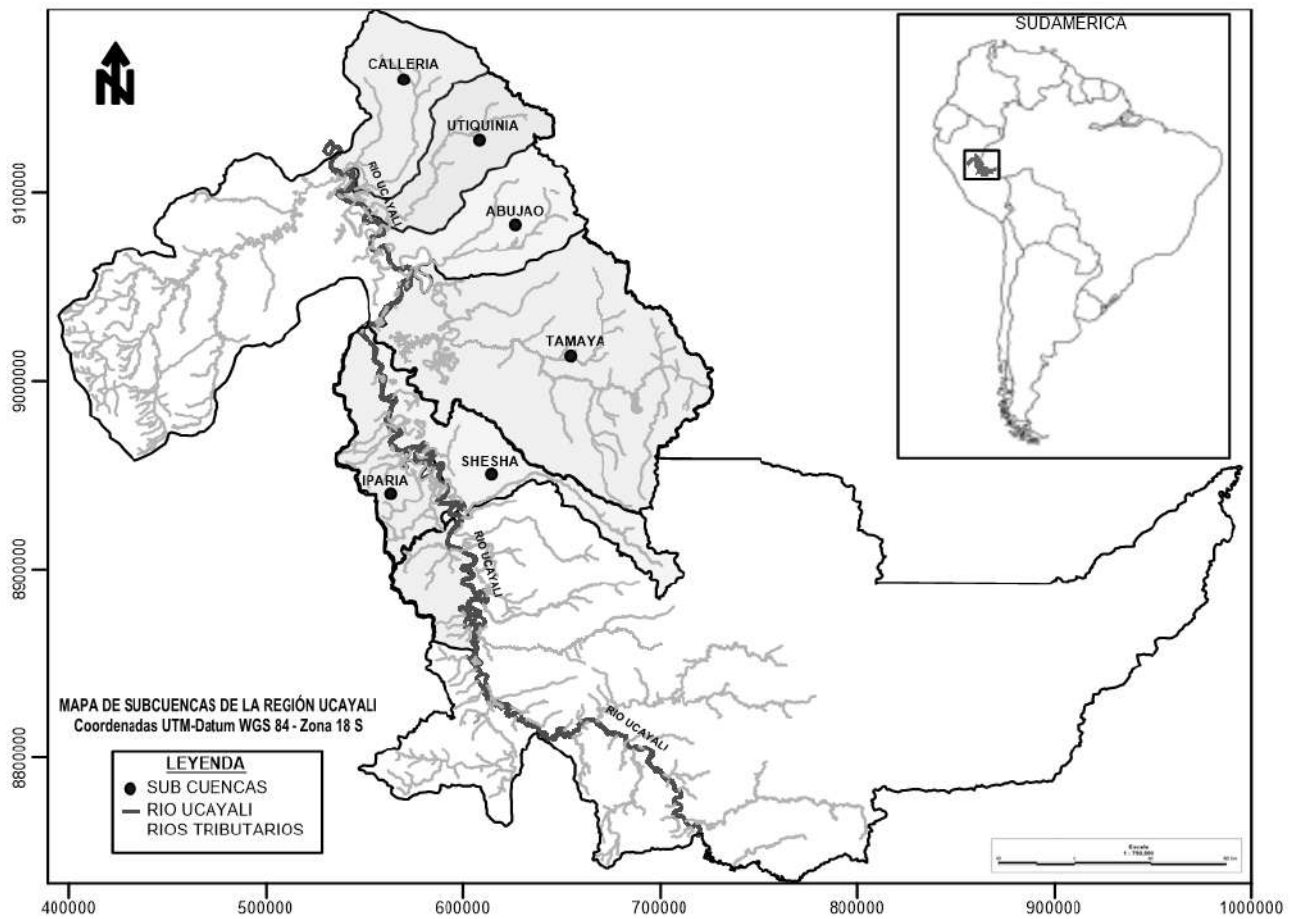


Figura 1. Mapa del área de estudio (región de Ucayali, Perú). Los puntos indican la ubicación de la zona de procedencia de las muestras analizadas. Imagen editada a partir del mapa de subcuencas de la región de Ucayali – PROYECTO UCRU (2010)

desaceleración del crecimiento; e es la base del logaritmo natural, y t_0 la edad teórica en la longitud cero. El inicio de la curva de crecimiento se ajustó al mes pico de actividad reproductiva. Para un buen ajuste de la curva de crecimiento se consolidó de forma mensual la información de tallas de los cinco años (2008-2012) siguiendo la metodología aplicada por **Palomares, et al.** (1987). El parámetro t_0 fue considerado como cero.

El coeficiente instantáneo de mortalidad total (Z) se estimó usando las longitudes convertidas en curva de capturas, lo que consiste en poner en conjunto todas las distribuciones de tallas manteniendo su importancia relativa para obtener una distribución de frecuencias única, lo que disminuye parte de los sesgos de muestreo (**Pauly, 1983**). El Z se calculó a partir de parte del descenso de la curva de capturas. El coeficiente instantáneo de mortalidad natural (M) se determinó usando la ecuación de **Pauly (1980)** basada en la L_∞ , K y la temperatura promedio anual del río (27 °C según **Guerra, 1995**). El coeficiente instantáneo de mortalidad por pesca (F) se calculó como $F = Z - M$. Para la estimación de Z , M y F se utilizó el paquete FISAT II.

La longevidad se calculó aplicando la ecuación de **Froese & Binohlan (2000)**, con la finalidad de conocer el número de clases anuales:

$$t_{\max} = 0,5496 + 0,957 \log_{10} (A_{50}), \text{ donde } A_{50} \text{ es la edad de madurez sexual.}$$

Métodos estadísticos aplicados

En el análisis de longitudes se determinaron las tallas mínima, máxima y media para cada año. Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar la diferencia

estadística ($p < 0,05$) en las tallas medias anuales y se compararon mediante la prueba de Tukey. Dichos análisis se efectuaron con el programa PAST, versión 4.05. Dado que los valores de la talla en longitud estándar (LE) y longitud a nivel de la horquilla (LH) están publicados para la especie, los resultados del presente estudio (expresados en LT) se transformaron utilizando las ecuaciones de la **tabla 1** propuestos por Flores-Gómez (2013).

Resultados

Estructura por tallas

Durante el periodo de 2008 a 2012 se registró la longitud de 23.952 ejemplares que midieron entre 12 y 31 cm LT (**Tabla 2**). El resultado del ANOVA evidenció que la talla media varió anualmente ($p < 0,05$) (**Tabla 3**) y el de la prueba Tukey permitió determinar que las medias comparadas entre los años 2008 y 2009, 2008 a 2010 y 2009 a 2011 no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) (**Tabla 4**).

Crecimiento, mortalidad y tasa de explotación

En el histograma ajustado al mes de reproducción se lograron establecer dos cohortes completas y una incompleta (**Figura 2**), y la curva de crecimiento se ajustó a los siguientes parámetros: $L_{\infty} = 31,45$ cm y $K = 0,37$ año⁻¹ (**Tabla 3**).

Tabla 1. Ecuaciones de regresiones lineales de LT, LH y LE para *P. altamazonica* en el río Ucayali (región de Ucayali – Perú) (tomado de Flores, 2013).

	LT	LH	LE
LT		LH=0,865LT+0,841 R ² =0,959	LE=0,809LT+0,133 R ² =0,941
LH	LT=1,109LH-0,063 R ² =0,959		LE=0,930LH-0,548 R ² =0,969
LE	LT=1,162LE+1,111 R ² =0,941	LH=1,042LE-1,166 R ² =0,969	

Tabla 2. Parámetros relacionados con la talla de *P. altamazonica* en el río Ucayali (región de Ucayali – Perú). N: número de ejemplares observados

Año/ parámetro	N	LT Mín.	LH* Mín.	LS* Mín.	LT Máx.	LH* Máx.	LS* Máx.	LT media	LH* media	LE* media
2008	4710	12,0	11,2	9,8	29,0	25,9	23,6	20,5	18,6	16,7
2009	6978	13,0	12,1	10,7	29,0	25,9	23,6	20,4	18,5	16,6
2010	2802	13,0	12,1	10,7	31,0	27,7	25,2	20,7	18,7	16,9
2011	3877	13,0	12,1	10,7	27,0	24,2	22,0	20,3	18,4	16,6
2012	1611	14,0	13,0	11,5	27,0	24,2	22,0	21,0	19,0	17,1
Total	23952	12,0	11,2	9,8	31	27,7	25,2	20,5	18,6	16,7

*Calculados usando ecuaciones de la **tabla 1** (para fines de discusión)

Tabla 3. Resultados del ANOVA relacionados con los registros anuales de la talla (LT)

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
Entre grupos	820,86	4	205,215	22,6	1,21E-18
Dentro de los grupos	181399	19973	9,08223		
Total	182220	19977	1,00E-05		

Las proyecciones de edad y crecimiento aplicando el modelo de von Bertalanffy evidenciaron un rápido crecimiento, que alcanzó 9,7 cm LT en el primer año, 16,4 cm en el segundo, y 21,1 cm en el tercero (**Figura 2**); es decir, que los ejemplares alcanzarían la longevidad a la edad teórica de 8,1 años (**Tabla 4**).

La tasa de mortalidad total (Z) obtenida fue de 1,69 año⁻¹ y la de mortalidad natural (M) de 0,90 año⁻¹; en consecuencia, se estimó que la tasa de mortalidad por pesca (F) fue de 0,79 año⁻¹ (**Tabla 5**). La tasa de explotación (E) fue de 0,47 año⁻¹, próxima al óptimo E de 0,5, señal del buen estado de las existencias (**Gulland & Carroz, 1968**).

Discusión

No se encontró información sobre el tema de estudio en relación con *P. altamazonica* en las bases Scopus y Web of Science, que concentran un gran número de revistas a nivel mundial (**Agbo, et al., 2021**), por lo que este constituye el primer estudio que proporciona

Tabla 4. Resultados de la prueba de Tukey de comparación entre medias anuales

Años	P	Diferencia
2008-2009	0,1449	NS
2008-2010	0,1628	NS
2008-2011	0,00186	**
2008-2012	0,00002	***
2009-2010	0,00016	**
2009-2011	0,33670	NS
2009-2012	0,00002	***
2010-2011	0,00002	***
2010-2012	0,00219	**
2011-2012	0,00002	***

NS: diferencia no significativa; ** significativa al 0,01; *** significativa al 0,001

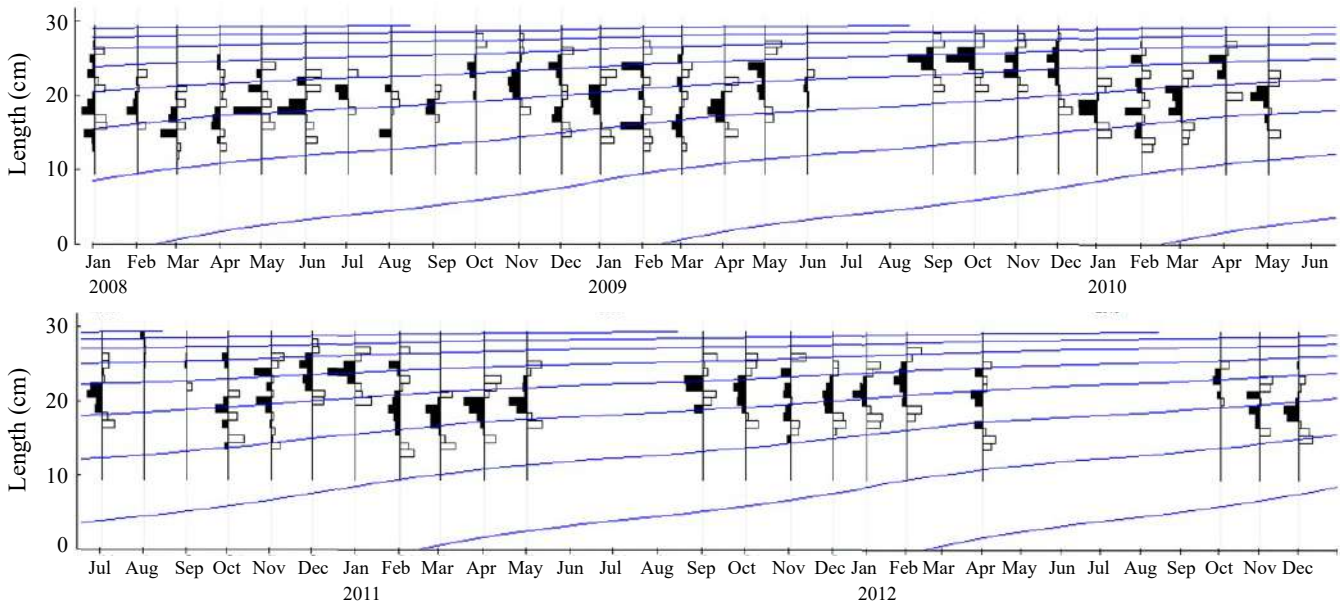


Figura 2. Histograma de la frecuencia de longitudes totales y la curva de crecimiento según la función de von Bertalanffy para la llambina en el río Ucayali (región de Ucayali – Perú)

Tabla 5. Parámetros poblacionales estimados para *P. altamazonica* en el río Ucayali (región de Ucayali – Perú)

Parámetros estimados	Símbolo	Valores
Longitud asintótica (LT)	L_{∞}	31,45
Coefficiente de crecimiento (año ⁻¹)	K	0,37
Longevidad (años)	t_{\max}	8,1
Tasa de mortalidad natural (años)	M	0,90
Tasa de mortalidad por pesca (año)	F	0,79
Tasa de mortalidad total	Z	1,69
Tasa de explotación	E	0,47

información sobre los parámetros poblacionales de la especie en la cuenca amazónica, información esencial para los modelos de evaluación pesquera necesarios para fines de manejo (Famhi, *et al.*, 2021; Navarro, *et al.*, 2021).

El conocimiento de la estructura de tallas de un recurso pesquero es importante porque permite estimar su vulnerabilidad y evaluar la salud de su población (Tagliafico, *et al.*, 2012). García & Montreuil (2004) determinaron para *P. altamazonica* desembarcada en Loreto una amplitud de tallas de 11 a 29 cm LH y García, *et al.* (2010) una de 8,6 a 26,6 cm (LE), valores relativamente próximos a los determinados en este estudio para Ucayali. En Colombia se ha reportado una talla máxima de 27 cm (Zapata & Usma, 2013), lo que contrasta con la registrada en este estudio y podría estar asociada con una mayor presión de pesca (Molina & Mejías, 2019).

Deza & Bazán (2007) determinaron una talla media de captura de 18,4 cm LH en la región de Ucayali y de 19,5 cm (LH) en la región de Loreto (García & Montreuil, 2004), valor este que supera el observado en este estudio para la región de Ucayali, lo cual podría estar asociado con el hecho de que en Loreto está prohibido el uso de redes cuyo tamaño de malla sea inferior a 50,8 mm para la captura de peces de escamas (Ordenanza Regional N° 020-2012-GRL-CR), medida que no se aplica en la región de Ucayali, donde buena parte de la pesca está en manos de la flota comercial y se hace con redes honderas, cuyo tamaño de malla es de 38 mm (Riofrío, 1998); ello evidencia cuán necesario es regular el uso de redes de pesca como medida de manejo.

En función del modelo de von Bertalanffy de $L_t = 33,45 (1 - e^{-0,37(t-0)})$, se evidenció que *P. altamazonica* es de rápido crecimiento y alcanzaría la longevidad a los 8,1 años, posibilitando la rápida recuperación de la población (Batista, *et al.*, 2012). No se encontraron artículos que brinden información sobre la edad y el crecimiento de esta especie, pero sí de otra del mismo género (*P. latior*) estudiada en los lagos de várzea de Manacapuru en Brasil, cuya ecuación es $LE = 29,93(1 - e^{-0,88(t-0,18)})$, con lo que se estimó que la especie alcanzaría los 19 cm (LE) en el primer año, 25 cm en el segundo y 27,5 cm en el tercero (Rocha, 2009), en contraste con los resultados de este estudio, que evidenciaron un crecimiento lento de *P. altamazonica*.

El rápido crecimiento de *P. amazonica* durante sus primeros meses de vida, que acontece en el periodo de inundación o creciente, es esencial para su supervivencia durante el periodo de descenso del nivel del río, durante el cual deben tener el tamaño suficiente para huir de sus depredadores (Welcomme, 1985; Araujo-Lima & Ruffino, 2003; Barthem & Fabré, 2004; Winemiller, 2004; Carvalho, *et al.*, 2007). La mayor amplitud y duración de la inundación de estas áreas son esenciales para el mejoramiento de la condición, el crecimiento y el reclutamiento de los peces (Gomes & Agostinho, 1997).

Los peces de ambientes lóticos pueden catalogarse como estacionales, en equilibrio, u oportunistas. Los peces estacionales son de rápido crecimiento y alcanzan la madurez sexual a una edad temprana, tienen gran fecundidad y presentan desove total sincronizado con el régimen de precipitaciones o de inundación, generalmente en aguas bien oxigenadas

(Winemiller, 1989; Winemiller & Rose, 1992; Ruffino & Issac, 1995; Godinho, *et al.*, 2010). Según los resultados de esta investigación, *P. altamazonica* es una especie cuyo desarrollo y crecimiento está estrechamente relacionado con los cambios hidrológico-ambientales estacionales.

En cuanto al estado de la población de *P. altamazonica* en el río Ucayali, la tasa de explotación estimada indica que la pesca no está teniendo un impacto negativo (Gulland, 1971; Guerrieri, *et al.*, 2015).

Agradecimientos

Al Instituto del Mar del Perú por el financiamiento del estudio.

Contribución de los autores

SFG: muestreos, análisis de datos y redacción del manuscrito; JCRQ: análisis de laboratorio y procesamiento de la información; LZR y JZF: análisis y redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Agbo, F.J., Oyelere, S.S., Suhonen, J., Tukiainen, M. (2021). Scientific production and thematic breakthroughs in smart learning environments: a bibliometric analysis. *Smart Learning Environments*. **8**: 1. <https://doi.org/10.1186/s40561-020-00145-4>
- Araujo-Lima, C.A.R. & Ruffino, M.L. (2003). Migratory fishes of the Brazilian Amazon. In: Carolsfeld J, Harvey B, Ross C (Eds.). *Migratory Fishes of South America: Biology, Fisheries and Conservation Status*. Canada. 372 p.
- Baensch, H.A. & Riehl, R. (1985). *Aquarien atlas*. Band 2. Mergus, Verlag für Naturund Heimtierkun de GmbH, Melle, Germany. 1216 p.
- Barthem, R.B. & Fabr e, N.N. (2004). Biologia e diversidade dos recursos pesqueiros da Amazônia. In: Ruffino, M.L. (coord.). *A pesca e os recursos pesqueiros na Amazônia brasileira*. IBAMA/PROV RZEA; p. 17-62. https://www.researchgate.net/publication/265594263_A_pesca_e_os_recursos_pesqueiros_na_Amazonia_Brasileira
- Barthem RB, Charvet-Almeida P, Montag LFA, Lanna AE. (2004). Global International Waters Assessment Amazon Basin, GIWA Regional assessment 40b. University of Kalmar, Kalmar, Sweden, 74 p. <https://iwlearn.net/documents/5043>
- Batista, V., Isaac, J.V., Fabr e, N.N., Alonso, J.C., Trinidad. O., Rivero, S., Nilo, J., Ruffino, M.L., Oliveira, C., Saint-Paul, U. (2012). Peixes e pesca no Solimões-Amazonas: uma avalia o integrada. Brasília: Ibama/ProV rzea; 276 p. <https://silo.tips/download/ibama-m-m-a-peixes-e-pesca-no-solimoes-amazonas-uma-avaliaao-integrada>
- Carvalho, L.N., Zuanon, J., Sazima, I. (2007). Natural history of Amazon fishes. En: del Claro K, Oliveira PS, Rico-Gray V, Ramírez A, Barbosa AAA, Bonet A, Scarano FR, Consoli FJ, Garzon FJM, Nakajima JN, Costello JA, Vinicius M. (Eds.). *Encyclopedia of Life Support System*. Oxford: EOLSS Publishers y UNESCO. 350 p.
- Claro-Jr, L.H. (2003). A influência da floresta alagada na estrutura trófica de comunidades de peixes em lagos de várzea da Amazônia Central. Disserta o de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, Brasil; 61 p. <https://bdt.d.inpa.gov.br/handle/tede/2892>
- Corredor, M.C.F. (2004). Influência das varia es temporais da disponibilidade de relativa de hábitats sobre a comunidade de peixes em um lago de várzea da Amazônia Central. Disserta o Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas/ Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas. 89 p. <https://bdt.d.inpa.gov.br/handle/tede/2813>
- Deza, S. & Bazán, R. (2007). Propuesta de manejo de poblaciones naturales de "lambina" *Potamorhina altamazonica* y "boquichico" *Prochilodus nigricans* para la región Ucayali. Proyecto Evaluación para el Manejo de Recursos Pesqueros Amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. Iquitos, Perú. 17 p.
- Fahmi, I.R. Tibbetts, M.B. Bennett, A. Ali, T. Krajangdara, C.L. Dudgeon. (2021). Population structure of the brown-banded bamboo shark, *Chiloscyllium punctatum* and its relation to fisheries management in the Indo-Malay region, *Fisheries Research*. **240**: 105972. Doi: 10.1016/j.fishres.2021.105972

- Flores-Gómez, V.S.** (2015). Parámetros reproductivos de llambina *Potamorhina altamazonica* (Characiformes: Curimatidae) en el Río Ucayali. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*. **26** (2): 223-234. Doi: 10.15381/rivep.v26i2.11004
- Froese, R. & Binohlan, C.** (2000). Empirical relationships to estimate asymptotic length, length at first maturity and length at maximum yield per recruit in fishes, with a simple method to evaluate length frequency data. *Journal of Fish Biology*. **56**: 758-773. Doi: 10.1111/j.1095-8649.2000.tb00870.x
- García, A. & Montreuil, V.** (2004). Utilización de la talla de primera maduración de llambina (*Potamorhina altamazonica*, COPE 1878) en la regulación de la explotación de sus poblaciones en la Amazonía peruana. En: Bodmer R, Puertas P, Antúnez M. (Eds.). Ponencias de la Memoria VI Congreso sobre Manejo de Fauna Silvestre en la Amazonía y Latinoamérica. Iquitos, Perú. 166 p.
- García, A., Vargas, G., Rodríguez, R., Montreuil, V., Ismiño, R., Sánchez, H., Tello, S., Dunpochelle, F.** (2010). Aspectos biológicos pesqueros de *Potamorhina altamazonica* llambina (Cope, 1878) en la región Loreto-Amazonía peruana. *Folia Amazónica IIAP*. **19** (1-2): 23-28. <http://revistas.iiap.org.pe/index.php/fofiaamazonica/article/view/338/408>
- García, A., Tello, S., Vargas, G., Duponchelle, F.** (2009). Patterns of commercial fish landings in the Loreto region (Peruvian Amazon) between 1984 and 2006. *Fish Physiology and Biochemistry*. **35**: 53-67
- Gayanilo, F.C. & Pauly, D.** (1997). FAO-ICLARM Stock Assessment Tools (FiSAT) Reference Manual. FAO Computerized Information Series (Fisheries) N° 8. Rom. 262 p.
- Gayanilo, F.C., Sparre, P., Pauly, D.** (2005). FAO-ICLARM Stock Assessment Tools II (FiSAT II). Revised version. User's guide. FAO Computerized Information Series (Fisheries) N° 8. Rome. 168 p.
- Godinho, A.L., Reis, I., Godinho, H.** (2010). Reproductive ecology of Brazilian freshwater fishes. *Environmental Biology of Fishes*. **87**: 143-162. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10641-009-9574-4>
- Gomes, L.C. & Agostinho, A.A.** (1997). Influence of the flooding regime on the nutritional states and juvenile recruitment of the curimba, *Prochilodus scrofa*, Steindachner, in upper Paraná River, Brazil. *Fisheries Management and Ecology*. **4**: 263-274.
- Granado-Lorencio, C., Araújo-Lima, C.A.R.M., Lobón-Cerviá, J.** (2005). Abundance – distribution relationships in fish assembly of the Amazonas floodplain lakes. *Ecography*. **28**: 515-520. Doi: 10.1111/j.0906-7590.2005.04176.x
- Guerra, H.** (1995). Estado actual del conocimiento de la pesquería en la Amazonia peruana. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana-IIAP. Documento Técnico N° 11. Iquitos, Perú. 53 p.
- Gulland, J.** (1971). Manual de métodos para la evaluación de las poblaciones de peces. Zaragoza, España: FAO.
- Gulland, J.A. & Carroz, J.E.** (1968). The management of fishery resources. *Adv Mar Biol*. **6**: 1-71. Doi: 10.1016/S0065-2881(08)60437-X
- Gulland, J.A. & Rosemberg, A.A.** (1992). Examen de los métodos que se basan en tallas para evaluar las poblaciones de peces. FAO Documento Técnico de Pesca N° 232, Roma, 122 p.
- Guerrieri, A., Eslava, N., Walter, L., Guevara, F.** (2015). Parámetros de crecimiento y mortalidad de *Orthopristis ruber* (Perciformes: Haemulidae) en el archipiélago Los Frailes, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*. **63** (1): 189-198.
- Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana - IIAP.** (1996). Propuesta de manejo de poblaciones naturales de ocho especies de peces de importancia comercial en Loreto. Proyecto: Manejo de Recursos Pesqueros Amazónicos (PESCA) en Iquitos. Programa de Investigación para el Uso y Conservación del Agua y sus Recursos – AQUAREC. Iquitos, Perú, 17 p.
- Molina, M. & Mejías, D.** (2019). Evidencias de sobrepesca y mal manejo del *Callinectes sapidus* (Rathbun, 1896) en el lago de Maracaibo, Venezuela. *Revista Ciencias Marinas y Costera*. **11** (1): 81-100.
- Navarro, M.R., Landa, L., Villamor, B., Domínguez-Petit, R.** (2021). First approach to the growth and age corroboration of Northeast Atlantic chub mackerel (*Scomber colias*) in Northern Iberian waters, Estuarine, Coastal and Shelf Science. **259**: 107433. ISSN 0272-7714. Doi: 10.1016/j.ecss.2021.107433
- Novoa, Z.** (1996). El origen del río Amazonas. *Revista Espacio y Desarrollo*. **8**: 115-160.
- Palomares, M.L., Muck, P., Mendo, J., Chuman, E., Gomez, O., Pauly, D.** (1987). Growth of the Peruvian Anchoveta (*Engraulis ringens*), 1953 to 1982. En: Pauly D, Tsukayama I. The

- Peruvian anchoveta and its upwelling ecosystem: three decades of change. Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Callao, Perú; Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), GmbH, Eschbom. Federal Republic of Germany and International Center for Living Aquatic Resources Management. ICLARM Studies and Reviews N° 15. Manila, Philippines. 351 p.
- Pauly, D. & Palomares, M.L.** (2005). Fishing down marine food web: it is far more pervasive than we thought. *Bulletin of Marine Science*. **76** (2): 197-211. https://www.researchgate.net/publication/216900499_Fishing_Down_Marine_Food_Web_It_is_Far_More_Pervasive_Than_We_Thought
- Pauly, D.** (1983). Algunos métodos simples para la evaluación de los recursos pesqueros tropicales. *FAO Documento Técnico de Pesca*. **234**: 1-49.
- Pauly, D.** (1980). On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. *ICES Journal of Marine Science*. **39** (2): 175-192. Doi: 10.1093/icesjms/39.2.175
- Pinedo, D. & Soria, C.** (2006). El manejo de las pesquerías en los ríos tropicales de Sudamérica. Instituto del Bien Común. Mayol Ediciones S. A. Bogotá, Colombia. 449 p.
- Pouilly, M., Yunoki, T., Rosales, C., Torres, L.** (2004). Trophic structure of fish assemblages from Mamoré River floodplain lakes (Bolivia). *Ecology of Freshwater Fish*. **13**: 245-257. Doi: 10.1111/j.1600-0633.2004.00055.x
- Riofrío, J. C.** (1998). Características de la pesquería comercial de consumo en Pucallpa (Ucayali - Perú). *Revistas de Investigaciones Pecuarias*. **9** (1): 67-7. <http://hdl.handle.net/123456789/3744>
- Rocha, D.** (2009). Parâmetros populacionais de *Pygocentrus nattereri* Kner, 1858 e *Potamorhina latior* (Spix & Agassiz, 1829) (Osteichthyes: Characiformes) em lagos de várzea da Região de Manacapuru, AM. Tesis de Posgrado, Faculdade de Ciências Agrárias Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil.
- Ruffino, M.L. & Isaac, V.J.** (1995). Life cycle and biological parameters of several amazon fish species. *NAGA, The ICLARM Quarterly*. **18** (4): 41-45.
- Saint-Paul, U., Zuanon, J., Villacorta, M.A., García, M., Fabr e, N.N., Berger, U., Junk, W.J.** (2000). Fish communities in central Amazonian white-and blackwater floodplains. *Environmental Biology of Fishes*. **57**: 235-250. Doi: 10.1023/A:1007699130333
- Sánchez-Botero, J.I. & Ara ujo-Lima, A.C.R.M.** (2001). As macrófitas aquáticas como ber ario para a ictiofauna da várzea do rio Amazonas. *Acta Amazonica*. **31** (3): 437-447. Doi: 10.1590/1809-43922001313447
- Santos, R. N.** (2006). Influência do ciclo hidrológico, maturac o gonadal e categoria trófica no teor de peixes em uma área de várzea da Amazônia Central. Disserta o de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas do Amazonas/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas. Brasil; 2006. 74 p. <https://bdtd.inpa.gov.br/handle/tede/1458>
- Tagliafico, A., Rago, N., L rez, A., Rangel, S.** (2012). Estructura de talla de 20 especies de peces capturados por la flota artesanal de la isla de Margarita, Venezuela. *Ciencia*. **20** (4): 213-228.
- United Nations Environment Program - UNEP.** (2004). Annual Evaluation Report. United States, 75 p. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/356/UNEP_Annual_Evaluation_Report_2004.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Welcomme, R.L.** (1985). *River Fisheries*. Food and Agriculture Organization Fisheries Technical Paper N° 262. FAO. Rome, 330 p.
- Winemiller, K.O. & Rose, K. A.** (1992). Patterns of life-history diversification in North American fishes: implications for population regulation. *Canadian Journal of Fish Aquatic Science*. **49**: 2196-2218. Doi: 10.1139/f92-242
- Winemiller, K. O.** (2004). Floodplain river food webs: generalizations and implications for fisheries management. En: Abell R, Thieme M, Brenner BL. (Eds.). *Ecoregion conservation for freshwater systems, with a focus on large rivers*. Proceedings of the second international symposium on the management of large rivers for fisheries. Volume II. FAO, Asia, 285 p.
- Winemiller, K. O.** (1989). Patterns of variation in life history among South American fishes in seasonal environments. *Oecologia*. **81**: 225-241. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00379810>
- Zapata, L. A., Usma, J. S. Usma.** (Editores). (2013). *Guía de las especies Migratorias de la Biodiversidad en Colombia. Peces. Vol. 2.* Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible / WWF-Colombia. Bogotá, D.C. Colombia. p. 486.
- Zorrilla, E., Vela, A., Muro, P., Dañino, A.** (2016). Características de la pesquería comercial en la cuenca del río Ucayali. *Folia Amazónica*. **25** (2): 159-166.

Artículo original

Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en bosques secos tropicales (BST) afectados por fuego y depósitos fluviovolcánicos en el departamento del Tolima, Colombia

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in the tropical dry forest affected by fire and fluviovolcanic deposits in the department of Tolima, Colombia

✉ Laura Daniela Devia-Grimaldo¹, ✉ Urley Adrián Pérez-Moncada²,
✉ Edwin Orlando López-D³, ✉ Maryeimy Varón-López^{1,*}

¹Grupo de Genética y Biotecnología Vegetal y Microbiana (GEBIUT), Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

²Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA, C.I.), Mosquera, Colombia

³Grupo de Investigación en Zoología, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

El bosque seco tropical concentra la mayor parte de la biodiversidad del mundo y, sin embargo, es uno de los ecosistemas más degradados en Colombia. Para su conservación es importante conocer la diversidad de microorganismos del suelo que lo integran, como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). En este estudio se evaluó el efecto del fuego y los depósitos fluviovolcánicos en la composición, abundancia y diversidad de los HMA en suelos de bosque seco tropical del departamento del Tolima, Colombia. El estudio se desarrolló en cuatro áreas: dos con vegetación nativa en la Reserva Natural Santafé de los Guaduales (RN) y en Armero (AN), otra afectada por el fuego de un incendio forestal (RQ) y la cuarta por depósitos fluviovolcánicos (ADV). La identificación de las morfoespecies de HMA se hizo mediante la extracción de esporas directamente del suelo (SD) y en cultivos trampa (CT) con el método de tamización en húmedo con posterior montaje en láminas y observación microscópica de la morfología de las esporas. Se identificaron 64 morfoespecies pertenecientes a cuatro órdenes, nueve familias y 17 géneros, de las cuales la familia Glomeraceae presentó el mayor número de morfoespecies indicadoras. En las cuatro áreas evaluadas se registraron diferencias significativas en la composición, abundancia y diversidad de las comunidades de HMA, siendo RQ el área con la mayor abundancia y diversidad, seguida de AN. Estos resultados representan un importante aporte al conocimiento de las comunidades de microorganismos del bosque seco tropical y su respuesta ante diferentes eventos antrópicos y naturales, y contribuye al inventario nacional de los HMA.

Palabras clave: Hongos que forman micorrizas arbusculares; Hongos del suelo; Cultivos trampa; Bosque seco tropical; Perturbaciones.

Abstract

The tropical dry forest (TDF) concentrates most of the world's biodiversity but currently it is one of the most degraded ecosystems in Colombia. For its conservation, it is important to understand the diversity of soil microorganisms that are part of it, such as the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). Here we evaluated the effect of fire and fluviovolcanic deposits on the composition, abundance, and diversity of the AMF in tropical dry forest soils in the department of Tolima, Colombia. We selected four areas: two with native vegetation in Santafé de Los Guaduales Natural Reserve (RN) and Armero (AN), one affected by a forest fire (RQ), and another one by fluviovolcanic deposits (ADV). We identified the AMF morphotypes by extracting spores directly from the soil (SD) and from trap cultures (TC) using the wet sieving method and subsequently mounting them on plates for the microscopic observation of their morphology. A total of 64 morphotypes were identified

Citación: Devia-Grimaldo LD, Pérez-Moncada UA, López-D EO, Varón-López M. Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en bosques secos tropicales (BST) afectados por fuego y depósitos fluviovolcánicos en el departamento del Tolima, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1137-1153, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1482>

Editor: Jairo Castaño Zapata

***Correspondencia:**

Maryeimy Varón López;
mvaronl@ut.edu.co

Recibido: 27 de mayo de 2021

Aceptado: 28 de septiembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

distributed in four orders, nine families, and 17 genera, the Glomeraceae family registering more indicator morphospecies. The four areas showed significant differences in their AMF communities' composition, abundance, and diversity; RQ was the area with the highest abundance and diversity followed by AN. Our results are an important contribution to the knowledge of TDF microorganism communities and their behavior in soils affected by different natural events. They also contribute to the national inventory of fungi with adaptive capacities.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi; Soil fungi; Trap crops; Tropical dry forest; Disturbances.

Introducción

El bosque seco tropical es uno de los hábitats más amenazados en el mundo por actividades antropogénicas como los incendios forestales y, con menor frecuencia, por eventos naturales como las erupciones volcánicas (Bocanegra-González, *et al.*, 2018). El fuego afecta los procesos biológicos y biogeoquímicos de los ecosistemas (Verma & Jayakumar, 2015, 2018) modificando las propiedades fisicoquímicas del suelo (Verma & Jayakumar, 2012), la diversidad de las comunidades vegetales y de microorganismos como los hongos totales, saprófitos y hongos micorrízicos arbusculares (HMA), contándose estos últimos entre los más susceptibles (Longo, *et al.*, 2014; Cofré, *et al.*, 2018; Day, *et al.*, 2019), especialmente en las estructuras miceliales y en la colonización micorrízica *in situ*; por el contrario, por ser estructuras de resistencia, las esporas no se ven drásticamente afectadas (Xiang, *et al.*, 2015; Sun, *et al.*, 2015; Holden, *et al.*, 2016), aunque algunas veces a cierta profundidad, el calor producido por el fuego rompe su latencia (Claridge, *et al.*, 2009).

Aunque los eventos naturales como las erupciones volcánicas no son frecuentes, al estudiar los HMA en suelos afectados por este fenómeno se ha encontrado que su riqueza y diversidad disminuyen, pero aumentan de nuevo al pasar los años (Gemma & Koske, 1990) mediante el establecimiento inicial de taxones generalistas y tolerantes con capacidades de adaptación y colonización que pueden tener implicaciones en la resiliencia de la vegetación después de una perturbación volcánica (Wu, *et al.*, 2007; Aguilera, *et al.*, 2018; Borie, *et al.*, 2019; Atunnisa & Ezawa, 2019).

Los HMA pertenecen al filo Glomeromycota y hacen parte de los microorganismos ecológicamente más importantes del planeta (van der Heyde, *et al.*, 2017), debido a que establecen simbiosis con el 72 % de las plantas vasculares, aumentando en estas la absorción de agua y de nutrientes como el fósforo y nitrógeno a cambio de los carbohidratos y lípidos asimilados por la planta (Keymer & Gutiahr, 2018; Lanfranco, *et al.*, 2018). Los HMA tienen un papel clave en los ecosistemas terrestres, pues regulan los ciclos de nutrientes (Smith, *et al.*, 2011), influyen en la estructura y multifuncionalidad del suelo (van der Heyde, *et al.*, 2009), establecen plántulas, descomponen la hojarasca, y forman y agregan el suelo (Rillig & Mummey, 2006; Lindahl, *et al.*, 2007). Además, confieren a las plantas tolerancia a la sequía, los metales pesados, las enfermedades, y los patógenos, entre otros factores (Auge, 2001; Girma, 2015; Zhang, *et al.*, 2015; Garcia, *et al.*, 2016; Brundrett & Tedersoo, 2018).

A pesar de que el fuego y las erupciones volcánicas reducen la diversidad de morfoespecies de HMA comparada con la de las áreas naturales preservadas (de Assis, *et al.*, 2018), si las condiciones climáticas, edáficas y de vegetación son favorables (Orgiazzi, *et al.*, 2016; Whitman, *et al.*, 2019), las comunidades pueden restablecerse en el curso de unos decenios, lo que contribuye a una rápida recuperación del ecosistema después de una perturbación de ese tipo (Dove & Hart, 2017; Saini & Sharma, 2019).

En Colombia los estudios sobre los HMA se han centrado principalmente en cultivos de frutas, hortalizas y legumbres (Gómez & Sánchez de Prager, 2012; Guzmán, *et al.*, 2013; Peña-Venegas, 2015; Rodríguez & Sanders, 2015; Montenegro-Gómez, *et al.*, 2017; Ramírez-Gómez, *et al.*, 2019; Sandoval-Pineda, *et al.*, 2020) como promotores del crecimiento y el rendimiento vegetal (Castillo, *et al.*, 2012; Hernández-Ortega, *et al.*, 2012) o por su efecto en la tolerancia de las plantas frente a factores fisicoquímicos (Aguilera, *et al.*, 2014; Seguel, *et al.*, 2016).

Los estudios sobre la asociación de las micorrizas en ecosistemas naturales (**Peña-Venegas, et al., 2019**) y el inventario de HMA en el país son escasos, principalmente en ecosistemas de bosque seco tropical con perturbaciones por el fuego y los depósitos fluviovolcánicos, los cuales pueden generar gran variabilidad en la respuesta microbiana debido al elevado número de factores que se ven alterados y que repercuten en los microorganismos. En este contexto surgió la pregunta sobre qué incidencia han tenido el fuego y los depósitos fluviovolcánicos en las comunidades de HMA del bosque seco tropical del departamento del Tolima. En este sentido, se plantea que en las áreas perturbadas por fenómenos antrópicos y naturales, la composición de los hongos micorrízicos está dominada por microorganismos tolerantes y que la abundancia y diversidad es menor que las de las áreas naturales. Por este motivo, el presente estudio se propuso evaluar el efecto del fuego y los depósitos fluviovolcánicos en la composición, la abundancia y la diversidad de los HMA en suelos de bosque seco tropical del departamento del Tolima, Colombia.

Materiales y métodos

Área de estudio y muestreo

El estudio se desarrolló en cuatro áreas del departamento del Tolima: dos se encuentran en el municipio de Ibagué, en la Reserva Ecológica Santafé de Los Guadales ($4^{\circ}24'17,84''$ N & $75^{\circ}11'46,02''$ O), a una distancia de 284 m entre ellas; otra, con condiciones de bosque nativo (RN), y la cuarta afectada por el fuego de un incendio forestal (RQ) ocurrido dos años antes del muestreo. La zona se encuentra a 1.090 m s.n.m. y presenta una temperatura promedio de $21,1^{\circ}\text{C}$. En el área RN domina la vegetación leñosa y en la RQ las herbáceas de la familia Poaceae del género *Brachiaria*.

Las otras dos áreas están ubicadas en el municipio de Armero ($4^{\circ}55'52,5''$ N & $74^{\circ}52'36,3''$ O), a una distancia de 4.881,2 m entre ellas, una con bosque nativo (AN) y otra afectada por depósitos fluviovolcánicos provenientes de la erupción del volcán Nevado del Ruiz en 1985 (ADV) (**Figura 1**). La zona se encuentra a 352 m s.n.m. y

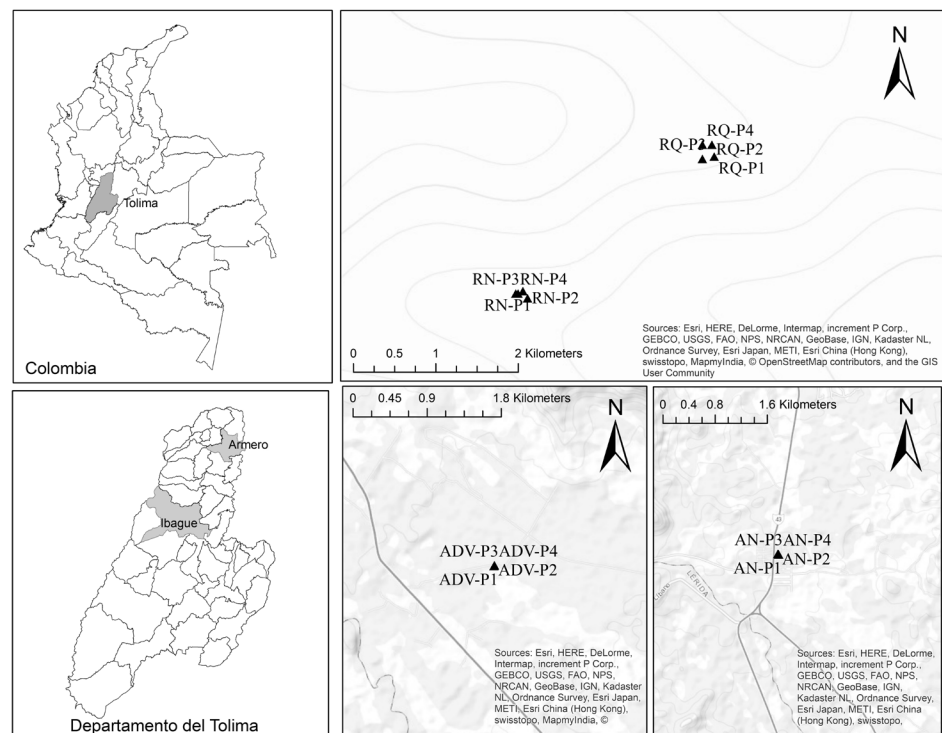


Figura 1. Áreas de muestreo de bosque seco tropical del departamento del Tolima, Colombia

presenta una temperatura promedio de 34,1 °C. La cobertura vegetal de AN está dominada principalmente por las familias Fabaceae, Poaceae, Asteraceae, Malvaceae y Euphorbiaceae (Esquivel, *et al.*, 2016), en tanto que la ADV es un área empleada en actividades agrícolas.

En puntos aleatorios de cada área se tomaron cuatro muestras compuestas de suelo desde el horizonte A, a una profundidad de 0 a 20 cm, con un barreno holandés. Las muestras se almacenaron a 4 °C hasta el momento de su análisis.

Multiplicación de HMA

Se hicieron cultivos trampa utilizando la metodología de Morton, *et al.* (1995), con el fin de detectar aquellas morfoespecies de HMA que no esporulaban en campo en el momento del muestreo (Posada, *et al.*, 2018). Los cultivos se establecieron a partir de la siembra de plántulas de sorgo (*Sorghum bicolor*) en macetas que tenían como sustrato una mezcla de suelo y arena en proporción 2:1 (v/v), colocadas en autoclaves durante una hora por 3 días a 121 °C y 15 lb/pulg². Posteriormente, el suelo extraído en campo se utilizó como inóculo. El sorgo es una planta de la familia Poaceae de rápida germinación y altamente micotrófica, por lo que se emplea como planta huésped para la multiplicación de estos hongos (Sánchez de Prager, *et al.*, 2010).

Los cultivos se mantuvieron en el invernadero del Grupo de Genética y Biotecnología Vegetal y Microbiana de la Universidad del Tolima (GEBIUT) durante tres meses, se regaron a capacidad de campo cada 48 horas y se fertilizaron cada 30 días empleando la solución nutritiva de Hoagland & Amon (1950). Después de 120 días, los cultivos se sometieron a estrés hídrico y mecánico para estimular la producción de esporas.

Extracción e identificación morfológica de esporas de HMA

Mediante el método de tamización en húmedo y centrifugación en gradiente de sacarosa (Gerdemann & Nicolson, 1963), se extrajeron las esporas de HMA a partir de 10 g de las muestras directas de suelo (SD) y de los cultivos trampa (CT). Las esporas se cuantificaron y separaron en placas de Petri de 80 mm con cuadrículas de 1 cm bajo un microscopio estereoscópico (Brundrett, *et al.*, 1994). Posteriormente, se agruparon y montaron en portaobjetos de vidrio con polivinil lactoglicerol (PVLG) y PVLG + reactivo de Melzer (1:1 v/v) (Morton, 1988). Estas se observaron a 40 x y 100 x en un microscopio compuesto Primo Star y se fotografiaron usando una cámara acoplada Axiocam ERc 5s de cinco megapíxeles en el programa Zen.

Con base en las características morfológicas de las esporas; color, diámetro, número de paredes, tamaño, forma de la conexión hifal y tipo de ornamentaciones, se hizo la identificación taxonómica teniendo como referencia el manual de Pérez & Schenk (1990) y la información disponible en los sitios web *International Culture Collection of Arbuscular & Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (<http://fungi.invam.wvu.edu/the-fungi/species-descriptions.html>), así como, la del profesor Janusz Blaszowski (<http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/index.html>). Además, se tuvieron en cuenta publicaciones científicas que dan soporte para la clasificación de género y morfoespecies (Blaszowski & Chwat, 2013; Sieverding, *et al.*, 2014; Pereira, *et al.*, 2015) y el apoyo de personal del laboratorio de microbiología agrícola de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Análisis del suelo

Se analizó el pH en suspensión de suelo y agua en proporción de 1:2,5 (p/v), la conductividad eléctrica (CE) según la norma colombiana NTC 5596:2008, la materia orgánica (MO) por el método de Walkley & Black, el fósforo disponible (P) por el método de Bray II y el calcio (Ca²⁺), el magnesio (Mg²⁺), el potasio (K⁺) y el sodio (Na⁺) intercambiable por acetato de amonio (CH₃COONH₄ 1M pH 7,0). Por último, la capacidad de intercambio catiónico (CICE) y la saturación de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, y Na⁺ se determinaron por cálculo. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Química Analítica del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA en Mosquera, Cundinamarca. Las variables químicas fueron evaluadas por área de muestreo.

Análisis ecológico

Se calculó la composición de los HMA correspondiente a las morfoespecies que componen cada una de las áreas y la abundancia de esporas a partir del número total de esporas en 10 g^{-1} de suelo, la abundancia relativa de cada morfoespecie y la diversidad a partir de los números efectivos de Hill. Las series de Hill incluyen la diversidad de orden, $q=0$, que equivale a la riqueza de morfoespecies; $q=1$, que se basa en el exponente de Shannon-Wiener (H') y corresponde al número de morfoespecies raras, y el orden $q=2$ a partir del inverso de Simpson (D'), que determina el número de morfoespecies muy abundantes o dominantes (Hill, 1973). Asimismo, a partir de las muestras de suelo extraídas directamente en campo (SD), se identificaron las morfoespecies “indicadoras” correspondientes a aquellas con alta especificidad y fidelidad a un área determinada (Dufrêne & Legendre, 1997).

Análisis estadístico

Para evaluar los cambios en la composición de la comunidad de HMA en los sitios de muestreo, se empleó un análisis de escalamiento no métrico multidimensional (ENMM) y un análisis de similitud (ANOSIM) utilizando la distancia de Bray Curtis. Las diferencias en la abundancia de esporas de HMA se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) con pruebas de normalidad (Shapiro-Wilks), homogeneidad de la varianza (prueba de Levene) y comparación de Tukey ($p \leq 0,05$). Sin embargo, no se cumplieron los supuestos de normalidad, por lo cual se recurrió a una Kruskal Wallis con prueba *post hoc* por pares.

Para determinar diferencias en la diversidad de los HMA, se hizo una extrapolación y una interpolación utilizando los números de Hill (Chao, *et al.*, 2014). Este análisis permitió establecer en qué suelos se registró una mayor diversidad de HMA. Con el fin de determinar las morfoespecies indicadoras en cada una de las áreas de SD, se utilizó el análisis indicador de especies propuesto por Dufrêne & Legendre (1997). Se consideraron los taxones con un valor indicador ($VI \geq 80\%$ y $p \leq 0,05$), como lo sugieren Tejada-Cruz, *et al.* (2008). Por último, se realizó un análisis canónico de correspondencias (ACC) a partir de la transformación de las abundancias (raíz cuadrada) para inferir la relación entre las comunidades de HMA y las características químicas del suelo. Todos los análisis estadísticos se hicieron en el programa estadístico “R” versión 3.4.1 (R Core Team, 2020).

Resultados

Composición de la comunidad de HMA

El análisis ENMM reveló que la composición de los HMA difirió significativamente entre las áreas de muestreo (Figura 2), lo que se confirmó en el ANOSIM en las muestras de SD ($R=0,9828$, $p=0,001$) y de CT ($R=0,937$, $p=0,001$). Sin embargo, a pesar de que

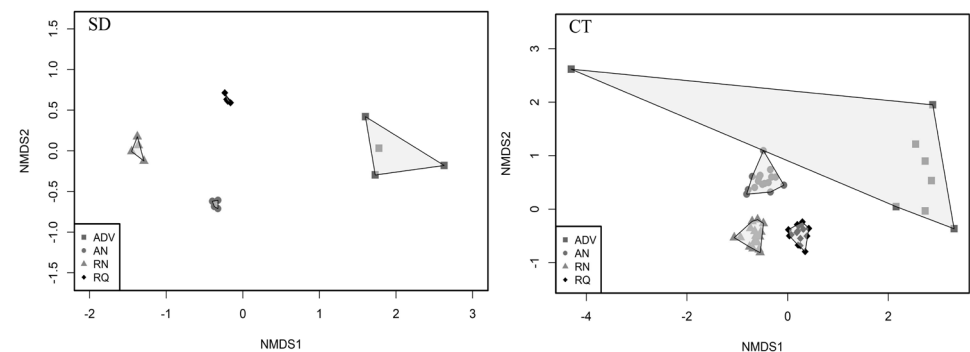


Figura 2. Diagrama de ordenación ENMM de la composición de HMA en las áreas de bosque seco tropical del departamento del Tolima

cada área evaluada exhibió su propia composición de HMA, se logró detectar que las áreas perturbadas desarrollaron una comunidad característica, en tanto que las naturales presentaron morfoespecies similares entre ellas.

Se registraron 64 morfoespecies pertenecientes a cuatro órdenes, nueve familias y 17 géneros en todas las áreas de muestreo desde SD y CT, con *Glomus* y *Acaulospora* como los géneros con más representantes (**Tabla 1**). En las áreas de la Reserva se recolectaron 50 morfoespecies, de las cuales 27 se encontraron en RQ y SD, 33 en RQ y CT, 15 en RN y SD y 19 en RN y CT. Por otra parte, Armero presentó 34 morfoespecies: 14 en AN y SD, 23 en AN y CT, 9 en ADV y SD y 19 en ADV y CT.

Orden	Familia	Morfoespecies de HMA	Abundancia relativa %								
			RN		RQ		AN		ADV		
			SD	CT	SD	CT	SD	CT	SD	CT	
Glomerales	Glomeraceae	<i>Funneliformis mosseae</i>	2,7	3,2	4,8			12,3	45,4		
		<i>Funneliformis geosporum</i>		2,1	2,7		1,9				
		<i>Glomus microcarpum</i>	10,4	11,4	4,3	6,7	71,3	29,7	3,4	0,4	
		<i>Glomus atrouva</i>		4,2	6,3	5,7		0,8	2,1	0,3	
		<i>Glomus badium</i>	2,1	6,4	8,6	7,2	2	8,3		1,1	
		<i>Glomus coremioides</i>			2,6					0,7	
		<i>Glomus albidum</i>			9,4			4,6	3,4	0,2	
		<i>Glomus aureum</i>		7,5	10,6	6,7	2	5,5	1,3	0,2	
		<i>Glomus caledonium</i>			4,2	5,8				0,2	
		<i>Glomus clavisporum</i>				2	1,2				
		<i>Glomus heterosporum</i>				0,6					
		<i>Glomus gibbosum</i>			1,9		2,4				
		<i>Glomus glomerulatum</i>					0,9				
		<i>Glomus tenerum</i>					0,4				
		<i>Glomus trufemi</i>					0,6				
		<i>Glomus coronatum</i>					0,5				
		<i>Glomus hyderabadensis</i>					0,5				
		<i>Glomus sp</i>			13,5	4,6					
		<i>Glomus sp1</i>				4,2		1,5			
		<i>Rhizoglomus fasciculatum</i>		6,2	5,3	7,1		1,9	9,1		1,3
		<i>Rhizoglomus agregatum</i>		12,1	5,5	3	5,6		4,8		
		<i>Rhizoglomus sp</i>							1		
		<i>Rhizoglomus sp1</i>					1,9				
		<i>Rhizoglomus intraradices</i>								1,3	
		<i>Rhizoglomus manihotis</i>		5,2	3,5	0,9	2				
		<i>Sclerocystis pachycaulis</i>				0,9					
		<i>Sclerocystis sinuosum</i>		3,8		6,6	4,7	2,7	2,7		
		<i>Sclerocystis rubiforme</i>				5,8	8,6				
		<i>Simiglomus hoi</i>						1,1			
		<i>Septoglomus constrictum</i>		2,1			1,2		1		
		<i>Septoglomus deserticola</i>		3,8	0,6		2,2				0,4

Glomerales	Entrophosporaceae	<i>Entrophospora</i> sp					0,3	
		<i>Entrophospora báltica</i>	10,3	8,4	7,1		1,3	
		<i>Claroideoglomus</i> sp			2,4	0,9		0,6
		<i>Claroideoglomus</i> sp1	3,5					
		<i>Claroideoglomus luteum</i>	1,4					
		<i>Claroideoglomus lamellosum</i>						0,7
		<i>Claroideoglomus etunicatum</i>						3,1
		<i>Acaulospora</i> sp	1,3					
		<i>Acaulospora</i> sp1			2,2	0,3		
		<i>Acaulospora morrowiae</i>	1,4					
Diversisporales	Acaulosporaceae	<i>Acaulospora spinosa</i>		6,4				
		<i>Acaulospora mellea</i>	1,4	1,1	1,9	3,5	7,5	
		<i>Acaulospora foveata</i>	0,6	2,8	3,4			
		<i>Acaulospora reducta</i>	22,9	5,5	3,4	6,4	4	
		<i>Acaulospora colombiana</i>	2,2	1,4	0,6			
		<i>Diversispora epigaea</i>	4,9			0,8	0,6	
		<i>Diversispora trimurales</i>	7,1					
		<i>Diversispora aurantia</i>			1,7			
		<i>Diversispora clara</i>	1					
		<i>Diversispora</i> sp					3	36,6
Diversisporaceae	<i>Diversispora</i> sp1	3,1						
	<i>Redeckera</i> sp					3	0,4	
	<i>Redeckera</i> sp1					3		
	<i>Redeckera</i> sp2	1,7	1,3					
	<i>Pacispora</i> sp				0,2			
	<i>Pacispora</i> sp1	0,8						
Archaeosporales	Ambisporaceae	<i>Ambispora</i> sp			0,6	0,2	71,5	0,2
		<i>Ambispora</i> sp1	1,4					
	Gigasporaceae	<i>Gigaspora</i> sp	0,8					
Gigasporales	Scutellosporaceae	<i>Scutellospora</i> sp			1	0,7		
		<i>Racocetra</i> sp		0,4				
	Racocetraceae	<i>Cetraspora pellucida</i>					0,3	

Abundancia de la comunidad de HMA en el bosque seco tropical

La abundancia presentó diferencias significativas entre las áreas de muestreo ($p \leq 0,05$), siendo mayor en RQ, con un total de 899 esporas en 10 g^{-1} de suelo en SD y 1.867 esporas en 10 g^{-1} de suelo en los CT. Las áreas naturales (RN y AN) mostraron abundancias similares en SD; sin embargo, en los CT fueron diferentes entre sí, con la mayor abundancia en RN. De todas las áreas evaluadas, ADV presentó la menor abundancia tanto en SD como en CT (**Figura 3**). En los CT aumentó 2,1 veces el número de esporas en RQ y RN, 1,83 veces en AN y 4,4 en ADV.

De todas las morfoespecies encontradas, las más abundantes fueron *Ambispora* sp. y *Funneliformis mosseae* en ADV en muestras de SD y CT, respectivamente, seguidas de *Glomus microcarpum* en AN-SD, AN-CT y RN-CT, *Acaulospora reducta* en RN-SD, *Glomus aureum* y *Sclerocystis rubiforme* en RQ en SD y CT, respectivamente (**Tabla 1**).

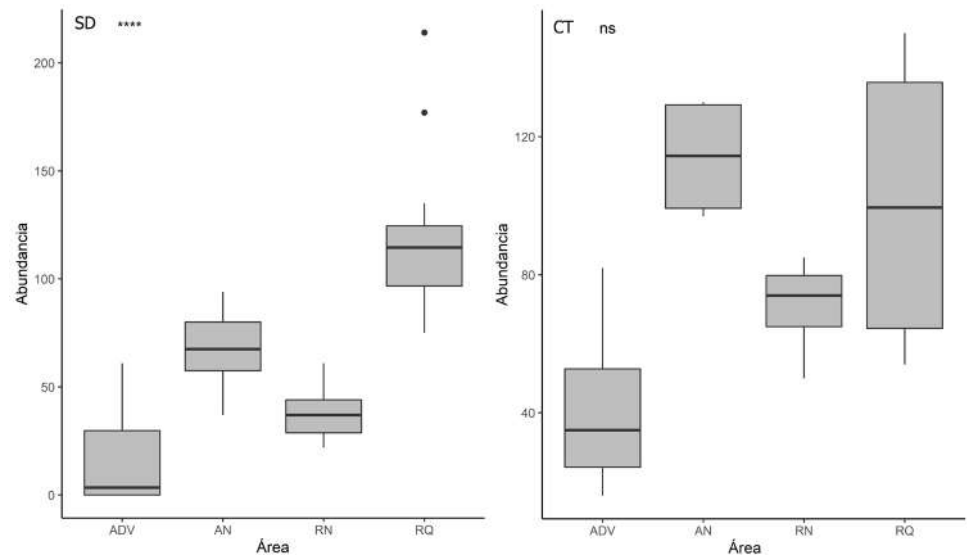


Figura 3. Abundancia de HMA en las áreas de estudio de bosque seco tropical del departamento del Tolima. ****= $p < 0,001$; ns = no significativo

Diversidad de HMA en el bosque seco tropical

A partir de la extrapolación e interpolación del número efectivo de especies ($q=0$, $q=1$ y $q=2$) en SD y CT, se determinó que RQ concentró la mayor riqueza y diversidad de morfoespecies; en contraste, las áreas AN y ADV registraron el menor número de morfoespecies. Los intervalos de confianza obtenidos en el análisis permitieron evidenciar diferencias significativas de la diversidad de HMA en las áreas evaluadas (**Figura 4**).

Morfoespecies de HMA indicadoras en bosque seco tropical

En la Reserva, RN presentó como morfoespecies indicadoras a *Glomus* sp. y *Septoglomus deserticola*; en RQ fueron *Acaulospora* sp., *Claroideoglomus luteum*, *Claroideoglomus* sp., *Funneliformis geosporum*, *Glomus caledonium*, *Sclerocystis pachycaulis*, *S. rubiforme*, *Glomus atrouva*, *G. albidum* y *G. aureum*. En la zona de Armero, las morfoespecies indicadoras de AN fueron *G. microcarpum* y *Scutellospora* sp., en tanto que en ADV fue *Ambispora* sp. (**Tabla S1**, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/1482/3154>).

Análisis del suelo

Los resultados indican que tres de las cuatro áreas de estudio (RQ, RN y AN) presentaron un pH ácido y solo ADV exhibió un pH alcalino y un alto contenido de P, K⁺, Mg²⁺, CICE y saturación de Ca²⁺. RQ se caracterizó por presentar bajos contenidos de nutrientes con excepción del Na⁺. Las áreas naturales (RN y AN) mostraron parámetros químicos similares, en los que se destaca un elevado contenido de Mg²⁺ y CE. Por último, la materia orgánica fue baja en las áreas de la Reserva y alta en Armero, principalmente en ADV (**Tabla S2**, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/1482/3155>).

Análisis canónico de correspondencias (ACC)

Ninguna de las variables químicas evaluadas influyó de manera significativa en la distribución de la comunidad de HMA. Sin embargo, en el diagrama de ordenación fue posible evidenciar una asociación positiva entre las variables de saturación de K y Na⁺ con las morfoespecies de las familias Glomeraceae y Acaulosporaceae. Además, fue posible identificar que las áreas naturales (RN y AN) exhibían una composición similar de la comunidad al compartir el 48 % de las morfoespecies y los altos niveles de Mg²⁺ y CE.

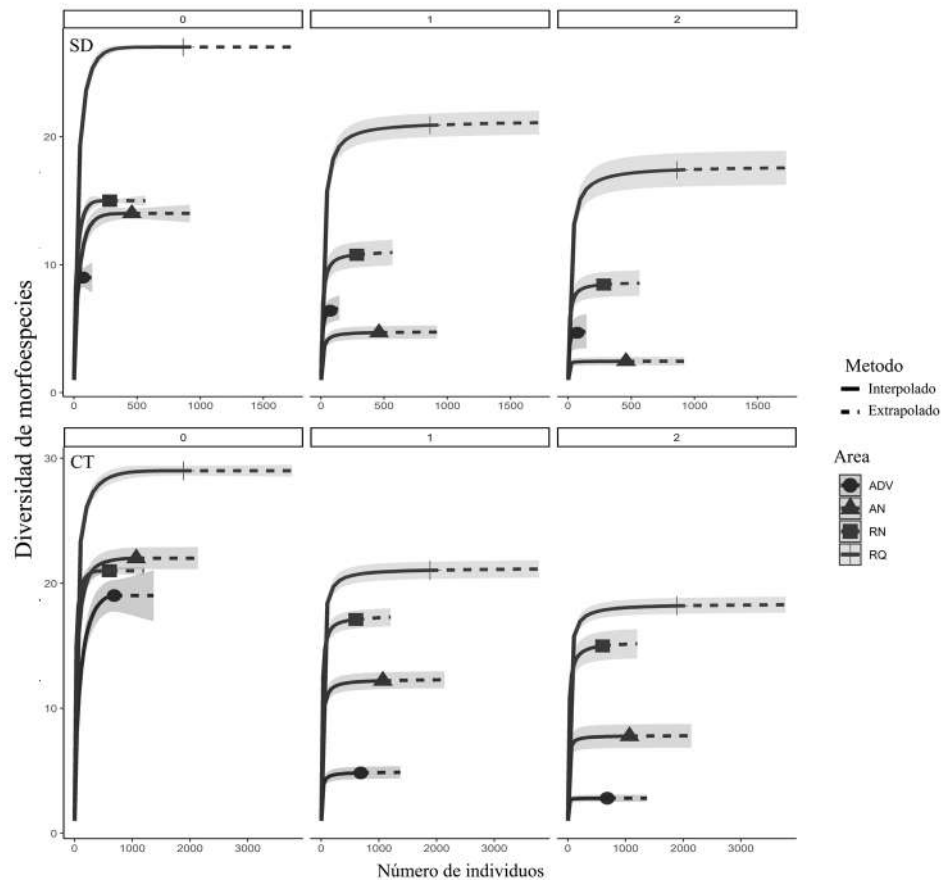


Figura 4. Diversidad de morfoespecies de HMA en las áreas de estudio de bosque seco tropical del departamento del Tolima

En ADV se registraron taxones como *Ambispora* sp., *Funneliformis mosseae*, *Redeckera* sp., *Rhizoglyphus intraradices* y *Diversispora* sp., los cuales podrían tener la capacidad de desarrollarse en pH alcalino con altos contenidos de nutrientes, principalmente P y K⁺ (Figura 5).

Discusión

En general, los resultados del estudio sugieren que la composición, abundancia y diversidad de las comunidades de HMA difirieron significativamente, especialmente en suelos afectados por el fuego, seguidos de las áreas naturales y menor medida en el área de depósitos fluviovolcánicos.

Los resultados observados en RQ pueden atribuirse a la cobertura vegetal presente en esta área, dominada por gramíneas del género *Brachiaria* (Leal, et al., 2013), las cuales encuentran mejores oportunidades de crecimiento y establecimiento en suelos afectados por el fuego debido a la eliminación de la cubierta del dosel y un aumento en la entrada de luz al sotobosque (Coroi, et al., 2004). Se ha reportado que algunas especies de este género son huéspedes potenciales de HMA debido a su fácil establecimiento simbiótico y asociación con una alta producción de esporas (Sánchez de Prager, et al., 2010; Álvarez-Lopezello, et al., 2019). En algunos trabajos se han reportado resultados similares, observándose un incremento en la abundancia de HMA después de experimentar incendios forestales, resultados que fueron atribuidos no al efecto del fuego y sí al aumento en la diversidad de herbáceas que se presentaron después del suceso (Dhillon, et al., 1988; Zhang, et al., 2004; Mirzaei, 2016; Dove & Hart, 2017; Carson, et al., 2019). Además,

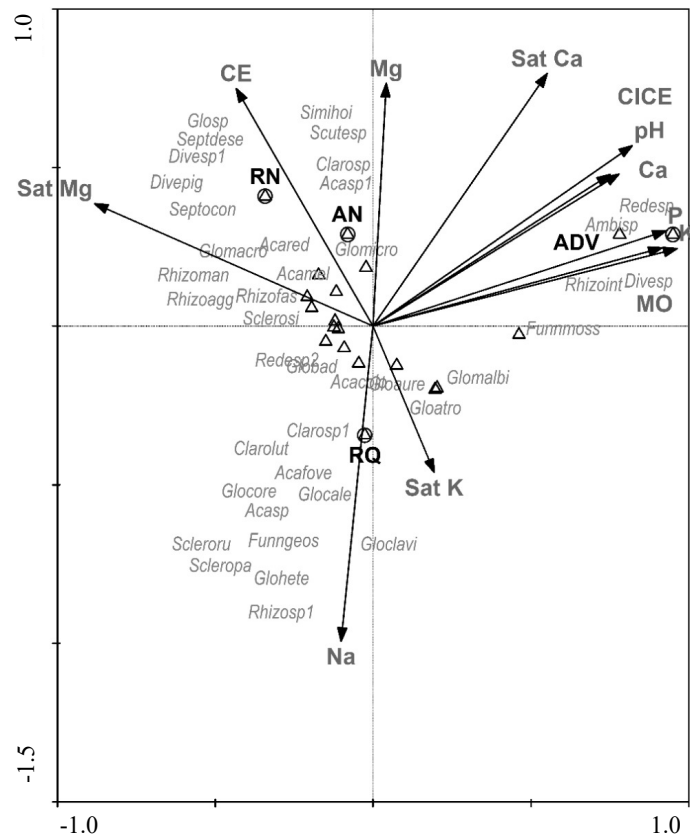


Figura 5. Diagrama trilíneo (*triplot*) del análisis canónico de correspondencias (ACC) de la abundancia de las morfoespecies de HMA y las variables químicas del suelo

algunas esporas de HMA son termotolerantes y su germinación es estimulada por el estrés frente al fuego (Dhillon, *et al.*, 1988; Purin & Rillig, 2007; Mirzaei, 2016; Ambrosino, *et al.*, 2018), sin embargo, es una reacción que depende de la intensidad del mismo (Holden, *et al.*, 2016; Verma & Jayakumar, 2018).

En el área de depósitos fluviovolcánicos, los menores valores observados pueden explicarse debido a que la erupción del volcán Nevado del Ruiz cubrió gran parte del suelo natural, modificando sus propiedades y eliminando la cobertura vegetal (Torres Benítez, 2013). A pesar de que en esta área se han iniciado nuevos procesos de formación de suelos, con una sucesión vegetal representada por 72 familias en las que se destacan Asteraceae, Malvaceae, Fabaceae, Euphorbiaceae y Poaceae (Esquivel, *et al.*, 2016), la abundancia y la diversidad de HMA después de 33 años de ocurrido el evento sigue siendo escasa. Estos resultados pueden deberse a las características generadas por la exposición a las cenizas volcánicas (Satti, *et al.*, 2007), o al efecto de la agricultura extensiva ejercida en la zona, la cual tiene un fuerte efecto negativo en la riqueza y diversidad de estos hongos debido al alto aporte de nutrientes producto de la fertilización que disminuye la dependencia simbiótica de las plantas y los HMA (Sieverding, 1991; Thirkell, *et al.*, 2017; Hage-Ahmed, *et al.*, 2019).

En las áreas naturales (RN y AN) se encontró que la composición y riqueza tiende a ser similar, pese a las diferencias significativas y a la localización en distintas zonas, lo que se explicaría por la similitud en las condiciones edafoclimáticas y de composición vegetal del bosque seco tropical conservado (Pizano & García, 2014). Estas áreas se caracterizaron por presentar las familias Scutellosporaceae, Gigasporaceae y Racocetraceae, las cuales se han reportado principalmente en zonas conservadas y se han catalogado como sensibles y

menos capaces de adaptarse a las perturbaciones por el gran tamaño de sus esporas ($>200 \mu\text{m}$) (Morton & Benny, 1990), lo cual las hace más susceptibles al daño físico (Tchabi, et al., 2008; Allen, et al., 2009; Turrini & Giovannetti, 2011; Chagnon, et al., 2013; van der Heyde, et al., 2017). De allí la importancia del cuidado de las áreas naturales, ya que son el reservorio de morfoespecies de HMA esenciales para el mantenimiento de los bosques nativos.

Una alta diversidad vegetal como la encontrada en las áreas naturales permite tener más morfoespecies raras de HMA debido a que existe un mayor número de huéspedes (Hontoria, et al., 2019; Davison, et al., 2020; Guzman, et al., 2021). Las morfoespecies raras o poco frecuentes son producto de la respuesta coevolutiva entre los HMA y las plantas para un mejor beneficio simbiótico; estas desarrollan capacidades funcionales según los requerimientos del huésped de su preferencia (van der Heijden, et al., 2003; Oliveira, et al., 2006; Helgason, et al., 2007). Por otro lado, la dominancia de algunas morfoespecies como las observadas en las áreas de depósitos fluviovolcánicos puede explicarse por la ausencia de distintos huéspedes y al establecimiento de hongos generalistas, los cuales tienen la capacidad de tolerar cambios o alteraciones en el ecosistema (Chagnon, et al., 2013) y de colonizar plantas en procesos de sucesión, generando competitividad e inhibiendo la incorporación de HMA de lenta germinación, sensibles y específicos (Helgason, et al., 2007).

El número de morfoespecies encontradas en este estudio fue mayor al registrado en otras investigaciones en bosque seco tropical (Chaudhary, et al., 2014; Balázs, et al., 2015; de Assis, et al., 2018; Carrillo-Saucedo, et al., 2018), con excepción de 80 morfoespecies registradas por Marinho, et al. (2019) en Brasil. Los principales géneros identificados en el presente trabajo fueron *Glomus* y *Acaulospora*, similar a lo reportado en otras zonas de bosque seco tropical del mundo (Holste, et al., 2016; de Assis, et al., 2018; Sousa, et al., 2018; Mahdhi, et al., 2019; Wang, et al., 2019; Rodrigues, et al., 2021) y de Colombia (García, et al., 2000; Herrera & Arana, 2010; Rodríguez-López, et al., 2015).

La familia Glomeraceae, con los géneros *Glomus*, *Sclerocystis*, *Funneliformis* y *Septoglomus*, presentó la mayoría de las morfoespecies indicadoras en todas las áreas de muestreo, con excepción de ADV, donde fue *Ambispora* sp. Esto puede deberse a que las especies de la familia Glomeraceae producen numerosas esporas de pequeño diámetro en un periodo corto de tiempo, tienen altas tasas de germinación, renovación de hifas, mayor eficiencia en el uso del carbono y tolerancia a condiciones extremas, lo que les confiere una gran capacidad adaptativa y amplia distribución en todo el mundo (Krüger, et al., 2015; Martínez-García, et al., 2015; Trejo, et al., 2016; Stürmer, et al., 2018; Carrillo, et al., 2018; Wang, et al., 2019). La familia Ambisporaceae ha sido registrada como indicadora de áreas alteradas y se ha encontrado que las concentraciones de P en el suelo tienen una menor influencia en esta comparada con otras familias de HMA (van der Heyde, et al., 2017; Phillips, et al., 2019; Marinho, et al., 2019). Sin embargo, el efecto de las variables ambientales cambia de un taxón a otro y se necesita una mejor comprensión de la respuesta de algunos géneros y familias frente algún tipo de estrés.

Por otro lado, en diversos trabajos se sugiere que las propiedades químicas, principalmente el pH y los nutrientes como el P, son factores particularmente importantes que afectan fuertemente la distribución de las morfoespecies y la germinación de esporas de micorrizas (Xiang, et al., 2015; Xu, et al., 2017; Sousa, et al., 2018; Tipton, et al., 2018; Day, et al., 2019; Řezáčová, et al., 2019; Dudinszky, et al., 2019; Jiang, et al., 2020), y a pesar de que en este estudio no se encontró una influencia estadísticamente significativa de las variables químicas y las comunidades de HMA, se observó en las morfoespecies de la familia Acaulosporaceae una mayor capacidad de establecerse en suelos ácidos (Phillips, et al., 2019; Wang, et al., 2019), como los de RQ, RN y AN. Asimismo, la familia Glomeraceae, capaz de tolerar diferentes condiciones químicas del suelo, se registró en las cuatro áreas evaluadas, así como morfoespecies como *Ambispora* sp. y *F. mosseae*, cuya

abundancia no se ve alterada en suelos con altas concentraciones de P, como el caso de ADV, además de ser tolerantes a las perturbaciones (van der Heyde, *et al.*, 2017; Zhang, 2016; Mahdhi, *et al.*, 2019).

Los resultados de este estudio evidencian la gran diversidad de morfoespecies de hongos micorrízicos que hacen parte del bosque seco tropical en comparación con otros ecosistemas. Este estudio informa sobre la composición, abundancia y diversidad de HMA basada en el muestreo de áreas perturbadas y naturales del bosque seco en el departamento del Tolima.

Conclusión

La composición, abundancia y diversidad difirieron entre las áreas de muestreo de bosque seco tropical, siendo mayores en la zona afectada por el fuego debido a la presencia de plantas herbáceas altamente micotróficas, como las gramíneas del género *Brachiaria*, y a la gran adaptabilidad y dominancia de las familias Glomeraceae y Acaulosporaceae.

Las áreas naturales se caracterizaron por presentar comunidades de HMA similares a pesar de estar distantes, probablemente por la semejanza en las condiciones edafoclimáticas y la vegetación particular del bosque seco tropical conservado, que permite el establecimiento de morfoespecies raras, sensibles y específicas con afinidad por suelos naturales y una mayor diversidad de huéspedes.

Agradecimientos

A la Universidad del Tolima y al Grupo de Investigación de Genética y Biotecnología Vegetal y Microbiana (GEBIUT), por permitir el desarrollo de este trabajo en su laboratorio de microbiología y micorrizas, y a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA, C.I.), por la capacitación en taxonomía.

Información Suplementaria

Tabla S1. Análisis de morfoespecies indicadoras de HMA en cuatro áreas de BST a partir de muestras de suelo extraídos directamente en campo (SD). Ver tabla S1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1482/3154>

Tabla S2. Características químicas de las áreas evaluadas de BST del departamento del Tolima. Ver tabla S2 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1482/3155>

Contribución de los autores

LDG: investigación, experimentación y escritura; MVL: administración de proyectos, recursos, supervisión, adquisición de fondos y escritura; UPM: identificación, conceptualización, supervisión de taxonomía y escritura; ELD: supervisión, análisis estadístico, conceptualización, edición y escritura

Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no existe conflicto de intereses que pueda afectar la publicación de este estudio.

Referencias

- Aguilera, P., Cornejo, P., Borie, F., Barea, J. M., von Baer, E., Oehl, F. (2014). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Triticum aestivum* L. plants growing in an Andosol with high aluminum level. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **186**: 178-184.
- Álvarez-Lopezello, J., Hernández-Cuevas, L. V., del Castillo, R. F., Robles, C. (2019). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Brachiaria brizantha* pastures in lowlands of Oaxaca, Mexico. *Grassland Science*. **65** (3): 197-201.
- Allen, E. B., Allen, M. F., Egerton-Warburton, L., Corkidi, L., Gómez-Pompa, A. (2003). Impacts of early-and late-seral mycorrhizae during restoration in seasonal tropical forest, Mexico. *Ecological Applications*. **13** (6): 1701-1717.

- Ambrosino, M. L., Cabello, M. N., Busso, C. A., Velázquez, M. S., Torres, Y. A., Cardillo, D. S., Rodríguez, G.** (2018). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi associated with perennial grasses of different forage quality exposed to defoliation. *Journal of Arid Environments*. **154**: 61-69.
- Auge, R.M.** (2001). Water relations, drought and vesicular–arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*. **11**: 3-42.
- Atunnisa, R. & Ezawa, T.** (2019). Nestedness in arbuscular mycorrhizal fungal communities in a volcanic ecosystem: selection of disturbance-tolerant fungi along an elevation gradient. *Microbes and environments*. ME19073.
- Balázs, T. K., Blaszkowski, J., Chwat, G., Góralaska, A., Gáspár, B. K., Lukács, A. F., Kovács, G. M.** (2015). Spore-based study of arbuscular mycorrhizal fungi of semiarid sandy areas in Hungary, with *Diversispora jakucsiae* sp. Nov. *Mycol. Prog.* **14**: 1-11.
- Bocanegra-González, K. T., Thomas, E., Guillemín, M. L., de Carvalho, D., Gutiérrez, J. P., Caicedo, C. A., González, M. A.** (2018). Genetic diversity of *Ceiba pentandra* in Colombian seasonally dry tropical forest: Implications for conservation and management. *Biological Conservation*. **227**: 29-37.
- Borie, F., Aguilera, P., Castillo, C., Valentine, A., Seguel, A., Barea, J. M., Cornejo, P.** (2019). Revisiting the nature of phosphorus pools in Chilean volcanic soils as a basis for arbuscular mycorrhizal management in plant acquisition. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. **19** (2): 390-401.
- Blaszkowski, J. & Chwat, G.** (2013). *Septoglomus deserticola* emended and new combinations in the emended definition of the family *Diversisporaceae*. *Acta Mycologica*. **48** (1): 89-103.
- Brundrett, D.L., Glytsis, E.N., Gaylord, T.K.** (1994). Modelos de capas homogéneas para rejillas de relieve superficial dieléctricas de alta frecuencia espacial: diseños de difracción cónica y antirreflejos. *Óptica aplicada*. **33** (13): 2695-2706.
- Brundrett, M. C. & Tedersoo, L.** (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*. **220** (4): 1108-1115.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Gavito, M. E., Siddique, I.** (2018). Arbuscular mycorrhizal fungal spore communities of a tropical dry forest ecosystem show resilience to land-use change. *Fungal Ecology*. **32**: 29-39.
- Carson, C. M., Jumpponen, A., Blair, J. M., Zeglin, L. H.** (2019). Soil fungal community changes in response to long-term fire cessation and N fertilization in tallgrass prairie. *Fungal Ecology*. **41**: 45-55.
- Castillo, C. G., Puccio, F., Morales, D., Borie, F., Sieverding, E.** (2012). Early arbuscular mycorrhiza colonization of wheat, barley and oats in Andosols of southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. **12** (3): 511-524.
- Cofré, N., Urcelay, C., Wall, L. G., Domínguez, L., Becerra, A.** (2018). El potencial de colonización micorrízico-arbuscular varía entre prácticas agrícolas y sitios en diferentes áreas geográficas de la región Pampeana. *Ecología Austral*. **28** (3): 581-592.
- Coroi, M., Skeffington, M. S., Giller, P., Smith, C., Gormally, M., O'Donovan, G.** (2004). Vegetation diversity and stand structure in streamside forests in the south of Ireland. *Forest Ecology and Management*. **202** (1-3): 39-57.
- Chao, A., Gotelli, N. J., Hsieh, T. C., Sander, E. L., Ma, K. H., Colwell, R. K., Ellison, A. M.** (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*. **84** (1): 45-67.
- Chagnon, P. L., Bradley, R. L., Maherali, H., Klironomos, J. N.** (2013). A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. *Trends in Plant Science*. **18** (9): 484-491.
- Chaudhary, V. B., O'Dell, T. E., Rillig, M. C., Johnson, N. C.** (2014). Multiscale patterns of arbuscular mycorrhizal fungal abundance and diversity in semiarid shrublands. *Fungal Ecology*. **12**: 32-43.
- Claridge, A. W., Trappe, J. M., Hansen, K.** (2009). Do fungi have a role as soil stabilizers and remediators after forest fire? *Forest Ecology and Management*. **257** (3): 1063-1069.
- Davison, J., Moora, M., Jairo, T., Vasar, M., Öpik, M., Zobel, M.** (2016). Reglas de ensamblaje jerárquico en comunidades de hongos micorrízicos arbusculares (AM). *Biología y Bioquímica del Suelo*. **97**: 63-70.
- Day, N. J., Dunfield, K. E., Johnstone, J. F., Mack, M. C., Turetsky, M. R., Walker, X. J., Baltzer, J. L.** (2019). Wildfire severity reduces richness and alters composition of soil fungal communities in boreal forests of western Canada. *Global Change Biology*. **25** (7): 2310-2324.
- de Assis, D. M. A., De Melo, M. A. C., da Silva, D. K. A., Oehl, F., da Silva, G. A.** (2018). Assemblages of arbuscular mycorrhizal fungi in tropical humid and dry forests in the Northeast of Brazil. *Botany*. **96** (12): 859-871.

- Dhillion, S.S., Andersen, R.C., Liberta, A.E.** (1988). Effect of fire on the mycorrhizal ecology of little bluestem (*Schizachyrium scoparium*). *Can. J. Bot.* **66**: 706-713.
- Dove, N. C. & Hart, S. C.** (2017). Fire reduces fungal species richness and in situ mycorrhizal colonization: a meta-analysis. *Fire Ecology*. **13** (2): 37-65.
- Dudinszky, N., Cabello, M. N., Grimoldi, A. A., Schalamuk, S., Golluscio, R. A.** (2019). Role of grazing intensity on shaping arbuscular mycorrhizal fungi communities in Patagonian semiarid steppes. *Rangeland Ecology and Management*. **72** (4): 692-699.
- Dufrêne, M. & Legendre, P.** (1997). Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*. **67** (3): 345-366.
- Esquivel, H. E., Tinoco, F., Torres, A. J.** (2016). La sucesión vegetal en los lodos fluviovolcánicos de Armero-Tolima-Colombia 30 años después de la erupción del volcán Arenas del Nevado del Ruiz: Plant succession in the fluvial-volcanic mud from Armero-Tolima-Colombia 30 years after the eruption of the “Nevado del Ruiz” Volcano. *Caldasia*. **38** (1): 101-116.
- García, C., Franco, D., Arturo, M., Quintero, J., Rao, I. M.** (2000). Catálogo de cepas de micorrizas arbusculares. Colombia.
- García, K., Doidy, J., Zimmermann, S. D., Wipf, D., Courty, P. E.** (2016). Take a trip through the plant and fungal transportome of mycorrhiza. *Trends in Plant Science*. **21** (11): 937-950.
- Gemma, J. N. & Koske, R. E.** (1990). Mycorrhizae in recent volcanic substrates in Hawaii. *American Journal of Botany*. **77** (9): 1193-1200.
- Gerdemann, J. W. & Nicolson, T. H.** (1963). Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*. **46** (2): 235-244.
- Girma, G.** (2015). Microbial bioremediation of some heavy metals in soils: an updated review. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences. G. Microbiology*. **7** (1): 29-45.
- Gómez, A.F. & Sánchez de Prager, M.** (2012). Actividad biológica de hongos formadores de micorriza arbuscular en un suelo humic dystrodepts cultivado con maíz y diferentes fuentes de fertilización. *Acta Agronómica*. **61** (5): 57.
- Guzmán, O.A., Castaño-Zapata, J., Sánchez de Prager, M.** (2013). Estudio preliminar del efecto de microorganismos benéficos sobre el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y el nematodo del nudo radical (*Meloidogyne* spp.) *Revista Agronomía*. **21**: 51-64.
- Guzman, A., Montes, M., Hutchins, L., DeLaCerde, G., Yang, P., Kakouridis, A., Dahlquist-Willard, R. M., Firestone, M. K., Kremen, C.** (2021). Crop diversity enriches arbuscular mycorrhizal fungal communities in an intensive agricultural landscape. *New Phytologist*. **231** (1): 447-459.
- Hage-Ahmed, K., Rosner, K., Steinkellner, S.** (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi and their response to pesticides. *Pest Management Science*. **75** (3): 583-590
- Helgason, T., Merryweather, J. W., Young, J. P. W., Fitter, A. H.** (2007). Specificity and resilience in the arbuscular mycorrhizal fungi of a natural woodland community. *Journal of Ecology*. **95** (4): 623-630.
- Hernández-Ortega, H. A., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., Zavaleta-Mancera, H. A., López-Delgado, H. A., Mendoza-López, M. R.** (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi on growth, nutrient status, and total antioxidant activity of *Melilotus albus* during phytoremediation of a diesel-contaminated substrate. *Journal of Environmental Management*. **95**: S319-S324.
- Herrera, E. M. C. & Arana, R. C.** (2010). Hongos micorrizo arbusculares asociados a los principales cultivos de los suelos sulfatados ácidos de Córdoba, Colombia. *Suelos Ecuatoriales*. **40** (1): 57-61
- Hill, M. O.** (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*. **54** (2): 427-432.
- Hoagland, D. R. & Arnon, D. I.** (1950). The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California Agricultural Experiment Station, 347 p. (2nd edition).
- Holden, S. R., Rogers, B. M., Treseder, K. K., Randerson, J. T.** (2016). Fire severity influences the response of soil microbes to a boreal forest fire. *Environmental Research Letters*. **11** (3): 035004.
- Holste, E. K., Holl, K. D., Zahawi, R. A., Kobe, R. K.** (2016). Reduced aboveground tree growth associated with higher arbuscular mycorrhizal fungal diversity in tropical forest restoration. *Ecology and Evolution*. **6** (20): 7253-7262.
- Hontoria, C., García-González, I., Quemada, M., Roldán, A., Alguacil M.M.** (2019). El cultivo de cobertura determina la composición de la comunidad de HMA en el suelo y en las raíces del maíz después de una rotación continua de cultivos de diez años. *Science of the Total Environment*. **660**: 913-922.

- Jiang, S., Hu, X., Kang, Y., Xie, C., An, X., Dong, C., Shen, Q.** (2020). Arbuscular mycorrhizal fungal communities in the rhizospheric soil of litchi and mango orchards as affected by geographic distance, soil properties and manure input. *Applied Soil Ecology*. **152**: 103593.
- Keymer, A. & Gutjahr, C.** (2018). Cross-kingdom lipid transfer in arbuscular mycorrhiza symbiosis and beyond. *Current Opinion in Plant Biology*. **44**: 137-144.
- Krüger, M., Teste, F. P., Laliberté, E., Lambers, H., Coghlan, M., Zemunik, G., Bunce, M.** (2015). The rise and fall of arbuscular mycorrhizal fungal diversity during ecosystem retrogression. *Molecular Ecology*. **24** (19): 4912-4930.
- Lanfranco, L., Fiorilli, V., Gutjahr, C.** (2018). Partner communication and role of nutrients in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*. **220** (4): 1031-1046.
- Leal, P. L., Siqueira, J. O., Stuermer, S. L.** (2013). Switch of tropical Amazon forest to pasture affects taxonomic composition but not species abundance and diversity of arbuscular mycorrhizal fungal community. *Applied Soil Ecology*. **71**: 72-80.
- Lindahl, B. D., Ihrmark, K., Boberg, J., Trumbore, S. E., Hogberg, P., Stenlid, J., Finlay, R. D.** (2007). Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest. *New Phytologist*. **173**: 611-620.
- Longo, S., Nouhra, E., Goto, B. T., Berbara, R. L., Urcelay, C.** (2014). Effects of fire on arbuscular mycorrhizal fungi in the Mountain Chaco Forest. *Forest Ecology and Management*. **315**: 86-94.
- Mahdhi, M., Tounekti, T., Abada, E., Al-Faifi, Z., Khemira, H.** (2020). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with acacia trees in southwestern Saudi Arabia. *Journal of Basic Microbiology*. **60** (4): 322-330.
- Marinho, F., Oehl, F., da Silva, I. R., Coyne, D., da Nóbrega Veras, J. S., Maia, L. C.** (2019). High diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in natural and anthropized sites of a Brazilian tropical dry forest (Caatinga). *Fungal Ecology*. **40**: 82-91.
- Martínez-García, L. B., Richardson, S. J., Tylanakis, J. M., Peltzer, D. A., Dickie, I. A.** (2015). Host identity is a dominant driver of mycorrhizal fungal community composition during ecosystem development. *New Phytologist*. **205** (4): 1565-1576.
- Mirzaei, J.** (2016). Impacts of two spatially and temporally isolated anthropogenic fire events on soils of oak-dominated Zagros forests of Iran. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. **40** (1): 109-119. Doi: 10.3906/TAR-1406-61
- Montenegro-Gómez, S.P., Gómez-Posada, S., Barrera-Berdugo, S.E.** (2017). Efecto de la gallinaza sobre *Azotobacter* sp., *Azospirillum* sp., y hongos micorrízicos arbusculares en un cultivo de cebolla (*Allium fitulosum*). *Revista Entramado*. **26**: 250-257.
- Morton, J. B.** (1988). Taxonomy of VA mycorrhizal fungi: classification, nomenclature, and identification. *Mycotaxon*. **32**: 267-324.
- Morton, J.B. & Benny, G.L.** (1990). Clasificación revisada de hongos micorrízicos arbusculares (Zygomycetes): un nuevo orden, Glomales, dos nuevos subórdenes, Glomineae y Gigasporineae, y dos nuevas familias, Acaulosporaceae y Gigasporaceae, con una enmienda de Glomaceae. *Mycotaxon*. **37**: 471-491.
- Morton, J. B., Bentivenga, S. P., Bever, J. D.** (1995). Discovery, measurement, and interpretation of diversity in arbuscular endomycorrhizal fungi (Glomales, Zygomycetes). *Can. J. Bot.* **73** (S1): 25-32.
- Orgiazzi, A., Bardgett, R. D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M. J. I., Chotte, J-L., De Deyn, G. B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, N. C., Jones, A., Kandeler, E., Kaneko, N., Lavelle, P., Lemanceau, P., Miko, L., Montanarella, L., Moreira, F. M. S., Ramírez, K. S., Scheu, S., Singh, B. K., Six, J., van der Putten, W. H., Wall, D. H.** (Eds.) (2016). Global soil biodiversity atlas. European Commission. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 pp.
- Peña-Venegas, C.P.** (2015). People, soil and manioc interactions in the upper Amazon region. PhD. Thesis. Wageningen University ISBN: 978-94-6257-322-2.
- Peña-Venegas, C. P. & Vasco-Palacios, A. M.** (2019). Endo- and Ectomycorrhizas in Tropical Ecosystems of Colombia. En Pagano, M. C., & Lugo, M. A. (Eds.), *Mycorrhizal fungi in South America*. (pp 111-145). Springer.
- Pereira, C. M., Goto, B. T., da Silva, D. A., de Ferreira, A. A., de Souza, F. A., da Silva, G. A., ... & Oehl, F.** (2015). *Acaulospora reducta* sp. nov. and *A. excavata*-two glomeromycotan fungi with pitted spores from Brazil. *Mycotaxon*. **130** (4): 983-995.
- Pérez, Y. & Schenck, N.C.** (1990). Un código único para cada especie de hongos micorrízicos VA. *Micología*. **82** (2): 256-260.
- Pizano, C. & García, H.** (2014). El bosque seco tropical en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá (Colombia) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá (Colombia).

- Posada, R. H., de Prager, M. S., Heredia-Abarca, G., Sieverding, E.** (2018). Effects of soil physical and chemical parameters, and farm management practices on arbuscular mycorrhizal fungi communities and diversities in coffee plantations in Colombia and México. *Agroforestry Systems*. **92** (2): 555-574.
- Purin, S. & Rillig, M.C.** (2007). La proteína fúngica micorrízica arbuscular glomalina: Limitaciones, avances y una nueva hipótesis para su función. *Pedobiología*. **51** (2): 123-130.
- Phillips, M. L., Weber, S. E., Andrews, L. V., Aronson, E. L., Allen, M. F., Allen, E. B.** (2019). Fungal community assembly in soils and roots under plant invasion and nitrogen deposition. *Fungal Ecology*. **40**: 107-117.
- R Core Team.** (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Ramírez-Gómez, M., Pérez-Moncada, U., Serralde-Ordóñez, D., Peñaranda-Rolón, A., Roveda-Hoyos, G., Rodríguez, A.** (2019). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi communities associated with cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) crops. *Agronomía Colombiana*. **37** (3): 239-254.
- Řezáčová, V., Slavíková, R., Konvalinková, T., Zemková, L., Řezáč, M., Gryndler, M., Jansa, J.** (2019). Geography and habitat predominate over climate influences on arbuscular mycorrhizal fungal communities of mid-European meadows. *Mycorrhiza*. **29** (6): 567-579.
- Rillig, M. C. & Mummey, D. L.** (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*. **171**: 41-53.
- Rodríguez, A. & Sanders, I. R.** (2015). The role of community and population ecology in applying mycorrhizal fungi for improved food security. *The ISME Journal*. **9** (5): 1053-1061.
- Rodríguez-López, C. P., de León, A. N., Arboleda-Valencia, J. W., Valencia-Jiménez, A., Valle-Molinares, R. H.** (2015). Hongos micorrizógenos arbusculares asociados a plantas de *Zea mays* l. en un agroecosistema del Atlántico, Colombia. *Agronomía*. **23** (1): 20-34.
- Rodrigues, L. A., da Silva, D. K. A., Yano-Melo, A. M.** (2021). Arbuscular mycorrhizal fungal assemblages in conservation unit of Atlantic forest areas under native vegetation and natural regeneration. *Microbial Ecology*. **82**: 122-134.
- Saini, R. & Sharma, S.** (2019). Climate resilient microbes in sustainable crop production. *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation*. **1**: 264.
- Sánchez de Prager, M., Posada, R., Velásquez, D., Narváez, M.** (2010). Metodologías básicas para el trabajo con micorriza arbuscular y hongos formadores de micorriza arbuscular. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 36 p.
- Sandoval-Pineda, J. F., Pérez-Moncada, U. A., Rodríguez, A., Torres-Rojas, E.** (2020). High cadmium concentration resulted in low arbuscular mycorrhizal fungi community diversity associated to cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biológica Colombiana*. **25** (3): 333-344.
- Satti, P., Mazzarino, M. J., Roselli, L., Crego, P.** (2007). Factors affecting soil P dynamics in temperate volcanic soils of southern Argentina. *Geoderma*. **139** (1-2): 229-240.
- Seguel, A., Castillo, C. G., Morales, A., Campos, P., Cornejo, P., Borie, F.** (2016). Arbuscular mycorrhizal symbiosis in four Al-tolerant wheat genotypes grown in an acidic Andisol. *Journal of soil science and plant nutrition*. **16** (1): 164-173.
- Sieverding, E.** (1991). Ecology of VAM fungi in tropical agrosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **9** (1): 369-390.
- Sieverding, E., Berndt, R., Oehl, F.** (2014). Rhizoglomerus, a new genus of the Glomeraceae. *Mycotaxon*. **129** (2): 373-386.
- Sousa, N. M. F., Veresoglou, S. D., Oehl, F., Rillig, M. C., Maia, L. C.** (2018). Predictors of arbuscular mycorrhizal fungal communities in the Brazilian tropical dry forest. *Microbial Ecology*. **75** (2): 447-458.
- Sun, J., Miller, J. B., Granqvist, E., Wiley-Kalil, A., Gobbato, E., Maillet, F., Maillet, F., Cottaz, S., Samain, E., Venkateshwaran, M., Fort, S., Morris, R. J., Ané, J., Dénarié, J., Oldroyd, G. E.** (2015). Activation of symbiosis signaling by arbuscular mycorrhizal fungi in legumes and rice. *The Plant Cell*. **27** (3): 823-838.
- Smith, S. E., Jakobsen, I., Grønlund, M., Smith, F. A.** (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology*. **156** (3): 1050-1057.
- Stürmer, S. L., Bever, J. D., Morton, J. B.** (2018). Biogeography of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota): a phylogenetic perspective on species distribution patterns. *Mycorrhiza*. **28** (7): 587-603.

- Tejeda-Cruz, C., Mehlreter, K., Sosa, V. J.** (2008). Indicadores ecológicos multi-taxonómicos. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz. *Biodiversidad, Manejo y Conservación*. **78**: 271-278.
- Tipton, A. G., Middleton, E. L., Spollen, W. G., Galen, C.** (2019). Anthropogenic and soil environmental drivers of arbuscular mycorrhizal community composition differ between grassland ecosystems. *Botany*. **97** (1): 85-99.
- Torres-Benítez, A. J.** (2013). Estudio de la composición fisicoquímica de los lodos fluviovolcánicos de Armero, Tolima, y su relación con los procesos de sucesión vegetal 25 años después de la erupción del volcán arenas del nevado del Ruíz. Tesis pregrado, Universidad del Tolima.
- Turrini, A. & Giovannetti, M.** (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi in national parks, nature reserves and protected areas worldwide: a strategic perspective for their in situ conservation. *Mycorrhiza*. **22** (2): 81-97.
- Tchabi, A., Coyne, D., Hountondji, F., Lawouin, L., Wiemken, A., Oehl, F.** (2008). Arbuscular mycorrhizal fungal communities in sub-Saharan Savannas of Benin, West Africa, as affected by agricultural land use intensity and ecological zone. *Mycorrhiza*. **18** (4): 181-195.
- Thirkell, T. J., Charters, M. D., Elliott, A. J., Sait, S. M., Field, K. J.** (2017). Are mycorrhizal fungi our sustainable saviours? Considerations for achieving food security. *Journal of Ecology*. **105** (4): 921-929.
- Trejo, D., Barois, I. & Sangabriel-Conde, W.** (2016). Disturbance and land use effect on functional diversity of the arbuscular mycorrhizal fungi. *Agroforestry Systems*. **90** (2): 265-279.
- van Der Heijden, M. G., Wiemken, A., Sanders, I. R.** (2003). Different arbuscular mycorrhizal fungi alter coexistence and resource distribution between co-occurring plant. *New Phytologist*. **157** (3): 569-578.
- van der Heijden, M. G. A. & Horton, T. R.** (2009). Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems. *Journal of Ecology*. **97**: 1139-1150.
- van der Heyde, M., Ohsowski, B., Abbott, L. K., Hart, M.** (2017). Arbuscular mycorrhizal fungus responses to disturbance are context-dependent. *Mycorrhiza*. **27** (5): 431-440.
- Verma, S. & Jayakumar, S.** (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A Review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. **2** (3): 168-176.
- Verma, S. & Jayakumar, S.** (2015). Post-fire regeneration dynamics of tree species in a tropical dry deciduous forest, Western Ghats, India. *Forest Ecology and Management*. **341**: 75-82.
- Verma, S. & Jayakumar, S.** (2018). Effect of recurrent fires on soil nutrient dynamics in a tropical dry deciduous forest of Western Ghats, India. *Journal of Sustainable Forestry*. **37** (7): 678-690.
- Wang, J., Wang, G. G., Zhang, B., Yuan, Z., Fu, Z., Yuan, Y., Zhang, J.** (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi associated with tree species in a planted forest of eastern China. *Forests*. **10** (5): 424.
- Whitman, T., Whitman, E., Woolet, J., Flannigan, M. D., Thompson, D. K., Parisien, M. A.** (2019). Soil bacterial and fungal response to wildfires in the Canadian boreal forest across a burn severity gradient. *Soil Biology and Biochemistry*. **138**: 107571.
- Wu, B., Hogetsu, T., Isobe, K., Ishii, R.** (2007). Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in a primary successional volcanic desert on the southeast slope of Mount Fuji. *Mycorrhiza*. **17** (6): 495-506.
- Xiang, X., Gibbons, S. M., Yang, J., Kong, J., Sun, R., Chu, H.** (2015). Arbuscular mycorrhizal fungal communities show low resistance and high resilience to wildfire disturbance. *Plant and Soil*. **397** (1-2): 347-356.
- Xu, X., Chen, C., Zhang, Z., Sun, Z., Chen, Y., Jiang, J., Shen, Z.** (2017). The influence of environmental factors on communities of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Chenopodium ambrosioides* revealed by MiSeq sequencing investigation. *Scientific Reports*. **7**: 1-11.
- Zhang, Y., Guo, L. D. & Liu, R. J.** (2004). Survey of arbuscular mycorrhizal fungi in deforested and natural forest land in the subtropical region of Dujiangyan, southwest China. *Plant and Soil*. **261** (1): 257-263.
- Zhang, X., Chen, B., & Ohtomo, R.** (2015). Mycorrhizal effects on growth, P uptake and Cd tolerance of the host plant vary among different AM fungal species. *Soil Science and Plant Nutrition*. **61** (2): 359-368.
- Zhang, B., Li, S., Chen, S., Ren, T., Yang, Z., Zhao, H., Han, X.** (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi regulate soil respiration and its response to precipitation change in a semiarid steppe. *Scientific Reports*. **6**: 1-10.

Artículo original

Nuevas propuestas nomenclaturales en Melastomataceae y adiciones de la familia al Catálogo de la Flora de Colombia

New nomenclatural proposals in Melastomataceae and additions to the family in the Catalog of the Flora of Colombia

✉ Humberto Mendoza-Ciuentes^{1,*}, ✉ Juan Mauricio Posada-Herrera², ✉ Heriberto David³

¹ Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Bogotá, D.C., Colombia

² Grupo de Estudios Botánicos, Instituto de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

³ Herbario HUA, Medellín, Colombia

Resumen

El Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia (CPLC) es el principal referente de la flora del país, por lo que es importante actualizarlo. Con base en revisiones de colecciones de herbarios regionales y de Norte América, se proponen nuevos sinónimos, registros de especies y ampliaciones de distribución de la familia Melastomataceae para Colombia. En total, se aportan 75 nuevos registros de especies y se establecen 23 nuevos sinónimos asociados con los géneros *Adelobotrys*, *Axinaea*, *Blakea*, *Henriettea* y *Miconia*. Se complementa la distribución departamental y de elevación del 29 % de las especies de Melastomataceae registradas en el CPLC.

Palabras clave: Herbarios regionales; Lista de especies; Nuevos registros; Sinónimos.

Abstract

The Catalog of Plants and Lichens of Colombia (CPLC) is the main reference of the country's flora, so it is important to update it. Based on a review of regional herbariums and North American collections, we propose new synonyms, species registration, and distribution extensions of the Melastomataceae for Colombia. In total, we provided 75 new species records for the country and established 23 new synonyms associated with the genera *Adelobotrys*, *Axinaea*, *Blakea*, *Henriettea*, and *Miconia* complementing the distribution by department and elevation of 29% of the Melastomataceae species present in the CPLC.

Keywords: New records; Regional herbaria; Species list; Synonyms.

Introducción

El Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia (CPLC) actualmente documenta 60 géneros y 987 especies de Melastomataceae en Colombia (Almeda, *et al.*, 2016). Los autores compilaron esta lista de Melastomatacea entre el 2007 y el 2010, es decir, hace 10 años, y desde entonces ya ha sido parcialmente actualizada.

Gracias a la continua revisión de colecciones en herbarios regionales y al hallazgo y publicación reciente de especies nuevas, se ha logrado reunir un buen número de registros nuevos a nivel del país y los departamentos no incluidos en el CPLC, así como detectar nombres redundantes que aún no se han sinonimizado. En este artículo se presentan los resultados de esta revisión y se resalta la importancia de los herbarios regionales en esta tarea.

Citación: Mendoza-Ciuentes H, Posada-Herrera JM, David H. Nuevas propuestas nomenclaturales en Melastomataceae y adiciones de la familia al Catálogo de la Flora de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1154-1174, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1448>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Humberto Mendoza-Ciuentes;
hmendoza@jbb.gov.co

Recibido: 6 de abril de 2021

Aceptado: 26 de octubre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Materiales y métodos

Se proponen nuevos sinónimos de taxones presentes en Colombia según lo estipulado en el Código Internacional de Nomenclatura para Algas, Hongos y Plantas (Turland, *et al.*, 2018) y con base en la evaluación directa de tipos y ejemplares en herbarios de Norteamérica (F, MO, NY y US) y Colombia, las imágenes de alta resolución en la *Global Plants Database* (<https://about.jstor.org/librarians/primary-sources/global-plants/>) y la literatura especializada.

Se revisó y actualizó la lista de especies de Melastomataceae en Colombia documentando nuevos registros con base en la revisión de colecciones de Melastomataceae de los herbarios del Instituto SINCHI (COAH), Universidad Nacional de Colombia (COL), Universidad del Valle (CUVC), Instituto Alexander von Humboldt (FMB), Universidad de Antioquia (HUA), Universidad ICESI (ICESI), Universidad de Nariño (PSO), Universidad del Tolima (TOLI) y Jardín Botánico de Bogotá (JBB).

Los nuevos registros se presentan siguiendo el formato establecido en el CPLC (Bernal, *et al.*, 2016), documentando los siguientes campos: 1) nombre científico aceptado, 2) sinónimos, 3) referencia(s) bibliográfica(s) del nombre, 4) hábito de crecimiento, 5) estatus de la especie con respecto a la flora de Colombia (si es nativa, endémica, introducida, adventicia), 6) distribución por regiones biogeográficas, 7) rango de elevación, 8) distribución departamental, 9) distribución global, 10) estado de conservación, 11) espécimen representativo, y 12) notas.

Por último, se hicieron ajustes a las distribuciones departamentales y altitudinales de cada una de las especies con base en la revisión de herbarios regionales y listas locales publicadas. Con esta información se organizó una base de datos en Excel de las especies con nuevos registros departamentales y rangos de elevación.

Resultados

Sinónimos nuevos

Adelobotrys subsessilis Gleason, Bulletin of the Torrey Botanical Club 58: 222. 1931.

Adelobotrys linearifolius L. Uribe, Caldasia 9: 295. 1966. **Syn. Nov.**

Uribe (1966) establece *A. linearifolia* por sus hojas lineares y los dientes dorsales de cáliz subulados que usualmente exceden la longitud de los lóbulos. Comenta que es semejante a *A. subsessilis*, no obstante, aclara que no pudo comparar con el tipo de esta última especie. Tanto *A. linearifolia* como *A. subsessilis* son de la región amazónica (Almeda, *et al.*, 2016; Ulloa, *et al.*, 2017), tienen hábito lianescente, hojas subsésiles ovado-lineares, hileras de tricomas entre las venas secundarias y la vena media, inflorescencias terminales con ramillas umbeliformes, brácteas lineares persistentes y dientes dorsales del cáliz subulados de igual longitud o que exceden la longitud de los lóbulos. La diferencia más conspicua entre los dos taxones es la longitud de los dientes dorsales del cáliz, siendo más largos los de *A. linearifolia*, aunque este es un carácter continuo y variable. No hay caracteres robustos que diferencien estos dos taxones y existen colecciones en Colombia en regiones intermedias entre las dos localidades tipo (Vaupés, Colombia, e Iquitos, Perú).

Axinaea macrophylla (Naudin) Triana, Transactions of the Linnean Society of London 28(1): 69. 1871[1872].

Axinaea affinis (Naudin) Cogn., Monographiae Phanerogamarum 7: 449. 1891. **Syn. Nov.**

Axinaea floribunda (Naudin) Triana, Transactions of the Linnean Society of London 28(1): 69. 1871[1872]. Sinonimizado por Eves (1936).

Estos nombres de especies siempre se han confundido en los herbarios y los tratamientos del género no son muy claros para separarlas. Eves (1936) separa *A. affinis* y *A. macrophylla* por las hojas de 7-12 cm largo y venas submarginales 6a y 7a en la primera, y hojas de 4-5 cm de largo y venas submarginales 4a y 5a en la segunda. Este último carácter no es muy claro, pero se asimila al orden de las venas, es decir venas de 4°, 5°, 6° y 7°

orden. No obstante, el tipo de *A. affinis* y múltiples muestras de los herbarios colombianos siempre tienen venas submarginales de 4° y 5° orden. Además, el tamaño de las hojas es muy variable en *A. macrophylla*, alcanzando láminas de hasta 9 cm de largo.

Cotton, et al. (2014) separan *A. affinis* por ser glabra y *A. macrophylla* por ser moderadamente pubescente, y citan múltiples ejemplares de Colombia. Muchos de los registrados en los herbarios nacionales presentan estados intermedios o tienen hojas pequeñas glabras en la forma asociada a *A. macrophylla*. Por otro lado, **Eves** (1936) sinonimizó *A. floribunda* bajo *A. macrophylla*, pero **Cotton, et al.** (2014) la restauraron con base en la cubierta semidensa de tricomas pinoides en ramas e inflorescencias con más de 26 flores (*Vs.* ramas y hojas glabras y <25 flores en *A. macrophylla*). Todo ello dificulta asignar un nombre a este complejo, ya que los caracteres de la nervadura, el tamaño de las hojas, y el número de flores e indumentos son muy variables y poco prácticos para mantener estas tres especies separadas. La clave establecida en **Cotton, et al.** (2014) presenta dificultades para identificar ejemplares de este complejo de especies en Colombia, lo que evidencia lo poco práctico que resulta mantenerlas como taxones separados. Asimismo, los tipos tienen apariencias muy similares y no se conocen caracteres florales que los diferencien.

Axinaea macrophylla es el nombre más antiguo, por lo que prevalece. Se caracteriza por el peciolo sin escutelo, lámina foliar de base revoluta, margen dentado hacia el ápice, 2 pares de venas secundarias acompañando la vena media (5-nervadas); flores de 5-meras, pétalos rosados, conectivo amarillo y anteras morado oscuro. Crece en los Andes desde Venezuela hasta Ecuador, entre los 2.000 y 3.800 m de elevación (**Cotton, et al.**, 2014). Es afín a *A. grandifolia* (Naudin) Triana, pero esta última tiene un engrosamiento o escutelo en el ápice del peciolo.

Blakea calyptrata Gleason, Bulletin of the Torrey Botanical Club 72(4): 388. 1945.

Blakea fissicalyx L. Uribe, Caldasia 13(61): 47. 1980. **Syn. Nov.**

Blakea calyptrata es una especie solo conocida en Colombia hasta ahora. Se encuentra en la región andina, en las cordilleras Occidental y Oriental, y en el Chocó biogeográfico, entre los 5 y 2.800 m de elevación (**Almeda, et al.**, 2016). En la cordillera Occidental llega hasta zonas cercanas a la costa Pacífica, pero asociada a zonas montañosas. Se caracteriza por las hojas y tallos con indumento ocre de tricomas pinoides, hojas plinervias, flores sustentadas por brácteolas libres lineares o espatuladas, el cáliz caliptriforme y circuncísil, los pétalos blancos o rosados y los estambres fusionados por las anteras formando una circunferencia. **Gleason** (1945) estableció dos variedades de la especie, una de ellas de zonas bajas en la vertiente pacífica del Valle del Cauca. *Blakea fissicalyx* comparte las anteriores características que circunscriben *B. calyptrata*, excepto por las hojas adultas que tienden a ser glabrescentes por el envés, aunque las hojas jóvenes tienen el indumento característico de *B. calyptrata*. Además, los tipos de ambos taxones provienen de la cordillera Occidental de Colombia: *B. fissicalyx* es del departamento del Cauca, a los 2.640 m de elevación, y *B. calyptrata* es de una localidad más al norte, en el departamento del Valle del Cauca, entre los 900 y 1.200 m de elevación. *Blakea fissicalyx* se considera una variante glabrescente de *B. calyptrata*, concretamente de la variedad outónimo (*B. calyptrata* var. *calyptrata*).

Blakea quadrangularis Triana, Transactions of the Linnean Society of London 28(1): 149. 1871.

Blakea clusiifolia Gleason, Bulletin of the Torrey Botanical Club 72(4): 387. 1945. **Syn. Nov.**

Blakea sphaerica Gleason, Phytologia 3(7): 358-359. 1950. **Syn. Nov.**

Blakea quadrangularis se caracteriza por ser árboles glabros de hojas 3-plinervadas o menos frecuente 3-nervadas, con cavidades domaciales en la base de las venas secundarias por el envés, venas terciarias no prominente (desdibujadas); pedicelo levemente aristado, lenticelado; brácteas externas libres, cóncavas y apiculadas encerrando completamente el botón floral; flor 6-mera; cáliz truncado o levemente lobado; pétalos blancos o rosados; anteras connadas, oblongas, con un apéndice dorsal-basal subulado, y estigma puntiforme. Crece en los departamentos de Antioquia, Boyacá y Santander entre los 400 y 2.900 m de elevación (**Almeda, et al.**, 2016).

Blakea clusiifolia de la cordillera Oriental, en el departamento de Santander, comparte los anteriores caracteres excepto por las cavidades domaciales en el envés foliar. Gleason (1945) en la descripción original la compara solo con especies de brácteas parcialmente fusionadas, pero no con *B. quadrangularis*. Por otro lado, *Blakea sphaerica* también comparte todas las características diagnósticas de *B. quadrangularis* y, además, su tipo proviene de localidades cercanas al tipo de *B. quadrangularis* en el departamento de Antioquia. En su descripción original, Gleason (1950) no la compara con ninguna de las especies conocidas en su momento.

Chaetogastra grossa (L.f.) P.J.F. Guim. & Michelang., Taxon 68(5): 961-962. 2019.
Chaetogastra andreana (Cogn.) P.J.F. Guim. & Michelang., Taxon 68(5): 961-962. 2019.
Syn. Nov.

Cogniaux (1887) estableció *Tibouchina andreana* (= *Chaetogastra andreana*) con base en material procedente del departamento de Quindío (cordillera Central) que presenta tricomas de base ampollada sobre la haz foliar y el hipanto. La revisión de colecciones de todos los Andes de Colombia indica que la densidad de las cubiertas y la forma de los pelos de las hojas y el hipanto tienen amplia variación en *Chaetogastra grossa*. Las poblaciones de la cordillera Oriental y el Macizo Colombiano tienden a tener la haz sedosa con tricomas filamentosos suaves. Las del norte de la cordillera Oriental y parte de cordillera Occidental presentan la haz con cubiertas poco densas de tricomas subulados cortos al igual que el hipanto, por lo que no tienen la apariencia sedosa de las hojas. En la cordillera Central se encuentran poblaciones con cubiertas sedosas por la haz y también poblaciones con pelos cortos que dan una apariencia bullada por la haz. En los departamentos de Quindío y Risaralda es muy focalizada la población de tricomas de base ampollada por la haz que caracteriza a *C. andreana*, no obstante, también se encuentran en los páramos de estos departamentos formas con pelos no ampollados por la haz. En la cordillera Oriental, en el departamento de Cundinamarca, también se encuentran algunos ejemplares de hojas con pelos ampollados cortos.

El tamaño de las hojas también varía mucho en *C. grossa*, y disminuye con el incremento de la altitud. Los caracteres básicos que circunscriben a *C. grossa* son la corola cuculada, los pétalos rojos purpura villosos en la superficie adaxial, los estambres isomorfos de color rojo, y el ápice del conectivo levemente bilobado. Estos caracteres los presenta *C. andreana*, por lo que no es práctico mantenerla como especie. Crece desde Venezuela hasta Ecuador entre los 1.850 y 4.500 m de elevación (Almeda, *et al.*, 2016).

Henriettea seemannii (Naudin) L.O. Williams, Fieldiana, Bot. 29(10): 566. 1963.
Henriettea goudotiana (Naudin) Penneys, Michelang., Judd & Almeda, Systematic Botany 35(4): 797. 2010. **Syn. Nov.**

Las dos especies fueron descritas por Naudin (1852) bajo el género *Henrietella* en la misma publicación y en la misma página: *H. seemannii* procedente de Panamá y *H. goudotiana* de Colombia. Según los caracteres diagnósticos dados por este autor, se diferencian porque *H. seemannii* presenta tallos levemente cuadrangulares, las hojas oblongovadas y los pétalos sin lóbulos, en tanto que *H. goudotiana* presenta tallos teretes, hojas ovadoelípticas y pétalos 5 lobados (hastados).

Los caracteres de la forma del tallo y las hojas son variables dentro de la especie y la principal diferencia se encuentra en los pétalos, que son levemente hastados en *H. goudotiana* y lanceolados en *H. seemannii*. No obstante, la ilustración de *H. seemannii* en Flora de Panamá (<http://legacy.tropicos.org/Image/100220794>) presenta pétalos levemente hastados. Esto muestra que este último carácter es variable en las poblaciones centroamericanas. Se establece a *H. goudotiana* como sinónimo, ya que es la de menor distribución geográfica (solo conocida para Colombia) y en la publicación original de Naudin se encuentra después de *H. seemannii*.

Henriettea seemannii se caracteriza por su pubescencia en ramas y hojas de tricomas filamentosos, las hojas elípticas, ovadas u oblongas, 3-nervadas, las flores pequeñas

(<5 mm largo), subsésiles (pedicelos de 1-2 mm largo) y los pétalos apicalmente obtusos a redondeados. Crece en Centroamérica y Colombia entre los 170 y 1.900 m de elevación (Almeda, 2009; Almeda, *et al.*, 2016).

Miconia bubalina (D. Don) Naudin, Ann. Sci. Nat., Bot., Ser. 3 16: 244. 1850.

Miconia serrulata (DC.) Naudin, Ann. Sci. Nat., Bot., Ser. 3 16: 118. 1850. **Syn. Nov.**

Miconia tubulosa Gleason, Phytologia 1: 32. 1933. **Syn. Nov.**

Miconia voronovii Gleason, Bull. Torrey Bot. Club 57: 66. 1930. **Syn. Nov.**

Este grupo de especies se encuentran y solapan sus distribuciones en Colombia. *M. bubalina* se asocia a colecciones del Chocó biogeográfico, *M. serrulata* a muestras amazónicas, y *M. tubulosa* y *M. voronovi* a muestras del Magdalena Medio. Las dos primeras son de amplia distribución neotropical y las dos últimas solo se conocen de los tipos o pocas colecciones adicionales. En la **tabla 1** se comparan los caracteres de estos cuatro taxones.

Tabla 1. Comparación de caracteres de las especies *M. bubalina*, *M. serrulata*, *M. tubulosa* y *M. voronovii* (Basado en Gleason, 1930, 1933^a; Wurdack, 1973, 1980; Almeda, 2009)

Carácter	Especie			
	<i>M. bubalina</i>	<i>M. serrulata</i>	<i>M. tubulosa</i>	<i>M. voronovii</i>
Forma entrenudo	Oblongo aplanado	Oblongo aplanado	Oblongo aplanado	Oblongo aplanado
Indumento de ramas y envés	Denso, café claro	Denso, café claro	Denso, café claro	Denso, café claro
Forma lámina foliar	Oblongoelíptica, elíptica, ovada	Oblongo-elíptica, ovada	Elíptica	Elíptica a ovada
Longitud lámina foliar	11-30 cm	15-30 cm	10-25 cm	28 cm
Margen lámina foliar	Denticulada	Denticulada	Denticulada	Denticulada
Base lámina foliar	Obtusa a redondeada	Redondeada a cordada	Obtusa a redondeada	Obtusa a redondeada
Venación hoja	5-7-nervada	5-7-nervada	5-7-nervada	7-nervada
Mería floral	5-mera	5-6-mera	5-mera	7-mera
Pedicelo flor	Sésil	Sésil	Sésil	Sésil
Longitud hipanto	3-3,1 mm	5-7 mm	4,5 mm	5,3 mm
Longitud tubo del cáliz	0,9-1 mm	2,5-3,5 mm	1,2 mm	2,4 mm
Longitud pétalos	3-5 mm	6-9 mm	5 mm	7,5 mm
Simetría estambres	Levemente dimorfos	Levemente dimorfos	Levemente dimorfos	Levemente dimorfos
Longitud filamento	3,5-5,2 mm	4,5-7 mm	No se conoce	No se conoce
Longitud antera	3-4,5 mm	5,5-8 mm	3 mm (inmadura)	9 mm
Número lóculos del ovario	3	3-5	5	4
Ápice ovario	Pubescente	Pubescente	Pubescente	Pubescente
Longitud estilo	7-10 mm	No se conoce	10 mm	9 mm
Indumento estilo	Pubescente	Pubescente	Pubescente	Pubescente
Forma estigma	No, o levemente expandido	No expandido	No expandido	No expandido

Gleason (1930) describe a *M. voronovi* a partir de ejemplares provenientes del Magdalena Medio del departamento de Antioquia, y comenta que se diferencia de *M. serrulata* por la pubescencia y caracteres de los estambres. No obstante, la principal diferencia de esta especie radica en las flores 7-meras. Los indumentos son similares a los de *M. serrulata* y *M. bubalina*, y las dimensiones florales son muy similares a las de *M. serrulata*. Solo se conoce a partir de unas pocas colecciones de los departamentos de Antioquia y Santander en el Magdalena Medio.

Miconia tubulosa, descrita por **Gleason** (1933a), solo se conoce del tipo que proviene de la región del Magdalena Medio del departamento de Boyacá (Monte Chapón). Sus características vegetativas y florales son similares a las de *M. bubalina* y difiere levemente con *M. serrulata* en las flores más pequeñas y el ovario 5-locular.

Miconia serrulata fue descrita por **Candolle** (1828, *Diplochita serrulata*) con base en material procedente de la Amazonia brasilera. Considerando las descripciones de **Wurdack** (1973) de la flora de Venezuela y de **Almeda** (2009) de la flora mesoamericana, esta especie presenta hojas 5-7-nervadas, bracteolas oblongas y caducas, flores sésiles, 5-6-meras y ovario 3-5-locular. *M. bubalina*, por otro lado, fue descrita por **Don** (1823, *Chitonia bubalina*) a partir de material procedente de Perú y corresponde al nombre más antiguo de este complejo de especies.

Almeda (2009) comenta que *M. bubalina* y *M. serrulata* son especies estrechamente relacionadas que han sido repetidamente confundidas entre sí, y resalta que *M. bubalina* se diferencia por las flores más pequeñas, 6-meras y con ovario 4-locular. **Wurdack** (1980), en la Flora de Ecuador, comenta que *M. bubalina* es posiblemente una variante de *M. serrulata*, pero con hojas de base no cordada y flores más pequeñas. Considerando todo el rango de distribución de estos dos taxones, el número de lóculos y de partes florales se solapan y solo difieren en el tamaño de las flores. Las dimensiones florales tienen variaciones poblacionales continuas y difícilmente permiten establecer un límite entre estas dos especies, por lo que no es práctico mantenerlas separadas. Este conjunto de cuatro especies, sinonimizadas bajo *M. bubalina*, comparten los caracteres de los entrenudos oblongo-aplanados, indumento denso café claro de tricomas estrellados o barbelados en ramas, envés foliar, inflorescencia e hipanto-cáliz, hojas 5-7-nervadas, bracteolas caducas oblongas sustentando las flores, flores sésiles, 5-7-meras, hipanto levemente costillado, pétalos pruinosos externamente, estambres levemente dimorfos, filamentos y estilo pubérulos hacia la base, ovario 3-5-locular, parcialmente fusionado al hipanto y con ápice pubérulo. *M. bubalina* se distribuye en todo el Neotrópico en zonas bajas de bosques húmedos. Quedan por definir las diferencias con otras especies muy parecidas como *M. amazónica* Triana, *M. submacrophylla* Gleason y *M. taillii* Cogn.

Miconia caudata (Bonpl.) DC., Prodr. Systematis Naturalis Regni Vegetabilis 3: 187. 1828.

Miconia stenourea Triana, Transactions of the Linnean Society of London 28(1): 104. 1872. **Syn. Nov.**

Miconia caudata fue publicada originalmente como *Melastoma caudatum* por A. Bonpland en 1807. Se caracteriza por arbustos o árboles pequeños y tener ramas, hojas e inflorescencia con cubierta ferrugínea de tricomas estrellados, entrenudos rectangulares, peciolo largo, lámina ovada y con acumen muy largo, 5-7 nervadas, panículas laxas con abundantes flores pediceladas, flores 5-meras, pétalos estrellado-puberulentos abaxialmente y copiosamente papilosos adaxialmente, anteras con el conectivo engrosado dorsalmente en la base que forman un apéndice semicircular obtusamente 2-3-lobado, estigma escasamente expandido a capitado, ovario 3-locular con el ápice ligeramente ensanchado formando un collar estilar eroso-puberulento (**Almeda**, 2009). Crece en Centroamérica y Colombia entre los 150 y 3.200 m de elevación (**Almeda, et al.**, 2016).

Triana (1872) describe a *M. stenourea* a partir de colecciones del suroccidente de Colombia y establece como única diferencia con *M. caudata* la forma de las hojas: base truncada y ápice con acumen más largo en *M. stenourea*. Los caracteres como tipo de

indumento, forma de las ramas, número de venas foliares y formas de las flores son similares entre los dos taxones. La base de la lámina foliar en *M. caudata* puede variar desde truncada, redondeada a obtusa, y la longitud del acumen puede ser hasta de 2 cm. Las dos especies son indiferenciables y comparten sus áreas de distribución.

Miconia chamissois Naudin, Ann. Sci. Nat., Bot., Ser. 3 16: 179. 1850.

Miconia alternans Naudin, Melast. Monogr. Descr. : 720. 1853. **Syn. Nov**

Miconia stephananthera Ule, Notizbl. Königl. Bot. Gart. Berlin 6: 359. 1915. **Syn. Nov.**

Este grupo es un complejo de nombres entre los que también están dos taxones centro-americanos: *M. panamensis* Gleason y *M. langlassei* Standley. Las diferencias entre ellos radican en la forma de la base de la lámina foliar, que en algunos casos es decurrente y genera peciolos alados y en otros no, el indumento de tricomas estrellados por el envés, forma del cáliz y el tamaño de las anteras.

Ule (1915) establece a *M. stephananthera* con el tipo proveniente de Brasil y comenta que es muy parecida a *M. chamissois*, no obstante, aclara que difiere en las hojas de ápice agudo, peciolos más cortos, base de la lámina decurrente, y el apéndice conectival de estambres mayores con varios lóbulos. Los tipos de estas dos especies tienen hojas muy similares, variando solo en la forma de la base de la lámina foliar.

Wurdack (1973) establece las diferencias entre *M. alternans* de Guayanas y *M. stephananthera* documentando que esta última carece del indumento laxo de tricomas estrellados por el envés, tiene hojas más grandes y la base de la lámina decurrente (que en *M. alternans* no se presenta). También reconoce las diferencias del cáliz: lobado en *M. alternans* y ondulado en *M. stephananthera*, y las tecas de 2-2,5 mm de largo en contraste con 3-3,5 mm de largo en *M. stephananthera*. No obstante, ejemplares de Colombia asignados a *M. alternans* exhiben cálices ondulados y el tamaño de las anteras varía entre 1,7 y 3 mm (eje: J. Naranjo 061-COAH).

Almeda (2001) sinonimizó a *M. panamensis* bajo *M. chamissois*, aunque esta primera tiene peciolos alados por efecto de la base de la lámina decurrente, lo que la asocia más al tipo de *M. stephananthera*. Sinonimizó asimismo a *M. langlassei* bajo *M. chamissois*, ya que comparte plenamente las características de los peciolos, indumentos, inflorescencia y flores. En la descripción de *M. chamissois* en la Flora de Mesoamérica (incluidas *M. panamensis* y *M. langlassei*), **Almeda** (2009) documenta que hay variaciones poblacionales referentes a las láminas de base decurrentes que generan peciolos alados y otras poblaciones en las que el peciolo es liso. También describe que esta especie tiene escasos tricomas estrellados por el envés.

Considerando todo esto, algunas poblaciones de *M. chamissois* de Mesoamérica comparten caracteres con *M. stephananthera*, como la base de la lámina decurrente, y solo se diferenciarían por la ausencia del indumento de tricomas estrellados por el envés. No obstante, el tipo de *M. stephananthera* exhibe tricomas estrellados en el hipanto y las poblaciones de esta especie de la Amazonia colombiana presentan ralos tricomas estrellados por el envés.

Por otro lado, *M. alternans* no tiene caracteres que la diferencien de *M. chamissois*, ya que comparte los peciolos libres sin la base de la lámina decurrente, los indumentos de tricomas estrellados por el envés (acorde a los descrito por **Almeda**, 2009), el tipo de inflorescencia, las flores sésiles, la forma de los estambres y el estilo, y el número de lóculos del ovario.

Los caracteres que separan estos taxones tienen una graduación continua que hace difícil separarlos. Especialmente en Colombia se encuentran ejemplares de *M. alternans* (asociados principalmente a la región de la Orinoquia), *M. chamissois* (asociados al Magdalena Medio, Chocó biogeográfico y Amazonia) y *M. stephananthera* (asociados principalmente a la Amazonia) que exhiben este rango de variación de los caracteres de la base de la lámina foliar, indumentos por el envés, forma del cáliz y longitud de las anteras, siendo muy difícil asignarles un nombre. Por esta razón se sinonimizan los taxones de este complejo bajo *M. chamissois*, considerando que es el nombre válido de mayor antigüedad.

Miconia chamissois tiene amplia distribución en todo el Neotrópico, desde México hasta Argentina, en zonas bajas y asociadas a hábitats inundables (Wurdack, 1973; Almeda, 2009; Goldemberg, et al., 2013; Almeda, et al., 2016). Se caracteriza por las hojas corto-pecioladas regularmente con base decurrente, línea interpeciolar notoria, envés con ralos tricomas estrellados, inflorescencias piramidales con brácteas triangulares, flores sésiles o subsésiles, 5-meras, los estambres levemente dimorfos, la serie mayor con la antera subulada levemente incurvada y el conectivo basal alado (membranas laterales de márgenes irregulares), la serie menor con las anteras más cortas, lineares y con dos lobulillos laterales en la base del conectivo, el estigma levemente expandido, los pétalos pruinosos externamente, y el ovario 3-locular, ½ ínfero.

Miconia cremophylla Naudin, Ann. Sci. Nat. III, 16: 228 .1851.

Miconia turgida Gleason, Bull. Torrey Bot. Club 52: 452: f. 1 .1925. **Syn. Nov.**

Miconia turgida fue descrita por Gleason (1925) a partir de colecciones de la cordillera Central de Colombia. En esta publicación, Gleason no compara a *M. turgida* con *M. cremophylla* y erróneamente asocia una ilustración del estambre que no corresponde a *M. turgida*. Las medidas de las estructuras florales de *M. turgida* son ligeramente más grandes que las de *M. cremophylla*, y la mayor diferencia se encuentra en las flores con pedicelo $\leq 0,8$ mm de largo en *M. turgida* comparadas con flores sésiles en *M. cremophylla*. No obstante, en los mismos ejemplares del tipo de *M. turgida* se encuentran variantes de flores sésiles y algunas flores con pedicelos muy cortos menores de 0,5 mm de largo. *M. turgida* exhibe un engrosamiento en la base del peciolo como el tipo de *M. cremophylla*, aunque este carácter es variable en los ejemplares revisados, con algunos que no presentan dicho engrosamiento. Las características vegetativas y formas de las estructuras florales son similares entre estos dos taxones, ambos presentes en Colombia. En el Catálogo de Plantas de Colombia, *M. cremophylla* no fue considerada y *M. turgida* se estableció como endémica. Con esta propuesta, entonces, se confirma la presencia de *M. cremophylla* en Colombia.

Miconia cremophylla se reconoce porque presenta lamina foliar coriácea con la margen denticulada, regularmente un engrosamiento linear en la base de los peciolos, inflorescencias paniculadas con abundantes flores sésiles o subsésiles, flores bisexuales 5-meras, anteras obovadas que rematan en dos grandes boquetes, y el estigma expandido. Crece desde Perú hasta Colombia a lo largo de los Andes. Presenta gran semejanza con especies de Venezuela y Centroamérica como *M. resimoides* Cogn., *M. tonduzii* Cogn., *M. glaberrima* (Schltdl.) Naudin y *M. towarensis* Cogn. *Miconia resimoides* de Venezuela no tiene el engrosamiento en la base de los peciolos, la margen foliar es prácticamente entera, las inflorescencias tienen brácteas membranosas elípticas persistentes, las flores son conspicuamente pediceladas y el estigma no es dilatado. *Miconia tonduzii* de Centroamérica se diferencia por la ausencia del engrosamiento en la base del peciolo, las flores conspicuamente pediceladas (mayor de 1 mm largo), y las anteras oblongas con un poro apical-ventral. *Miconia glaberrima* de Centroamérica se diferencia porque tiene flores funcionalmente unisexuales y las hojas no son coriáceas. *Miconia towarensis* de Colombia y Venezuela tal vez es la especie con mayor semejanza, no obstante, esta última tiene hojas mucho más grandes de textura laminar, regularmente con la margen entera, y no presenta el engrosamiento en la base de los peciolos; las flores de las dos especies son muy parecidas en la forma y tamaño de las estructuras.

Miconia cundinamarcensis Wurdack, Caldasia 7 (35): 332, 1957.

Miconia wurdackii L. Uribe, Caldasia 10: 287, 1969. **Syn. Nov.**

Son dos taxones prácticamente similares en los caracteres vegetativos y florales. Uribe (1969) no aclara plenamente las diferencias de *M. wurdackii* con *M. cundinamarcensis* y solo recalca la forma del estigma y el tamaño de las hojas: *M. cundinamarcensis* tiene estigma dilatado y las hojas más pequeñas, en tanto que en *M. wurdackii* el estigma no es dilatado y está levemente lobulado, y las hojas son más largas. Las colecciones de *M. cundinamarcensis* de la cordillera Central (Caldas y Quindío) prácticamente no tienen el

estigma dilatado (levemente engrosado), mientras que las colecciones de Cundinamarca sí, lo que indica que este carácter es variable. Igual sucede con la forma y tamaño de las hojas, por lo que estos dos caracteres no respaldan la clasificación de *M. wurdackii* como una especie distinta a *M. cundinamarcensis*.

Miconia cundinamarcensis hasta ahora solo se conoce en Colombia en los tres ramales de la cordillera de los Andes, entre los 2.000 y 3.300 m de elevación (Goldenberg, *et al.*, 2013; Almeda, *et al.*, 2016). Se caracteriza por la presencia de una línea interpeciolar notoria, algunas veces con engrosamientos en el nudo en la base de los peciolos, ausencia de tricomas, el conectivo de la antera prolongado en la base dorsal a manera de almohadilla, brácteas diminutas en las ramificaciones y flores subsésiles. La reticulación de la hoja también es muy particular: con numerosas venas terciarias paralelas y venación terciaria muy reticulada y notoria por el envés.

Miconia dolichopoda Naudin, Ann. Sci. Nat., Bot., Ser. 3 16: 217. 1850.

Miconia plena Gleason, Phytologia 1: 31. 1933. **Syn. Nov.**

Naudin (1850) describe a *M. dolichopoda* con base en colecciones provenientes de Venezuela y la circunscribe por el tallo cuadrangular aplanado, ramas y envés foliar con indumento ferrugíneo, haz glabra, hojas 5-nervadas, flores 5-6-meras, sésiles, dispuestas en inflorescencias congestionadas (con abundantes flores apeñuscadas), 10-12 estambres isomorfos (flores diplostemonas), ovario 3-locular y estigma no expandido. En la revisión de Melastomataceae de Mesoamérica, Almeda (2009) caracteriza esta especie por los entrenudos distales aplanados, cuadrados, 4-sulcados, flores sésiles agrupadas en verticilos glomerulosos, flor 7-mera, pleiostemonas, y ovario 5-locular. Según esto, y considerando todo el rango geográfico, *M. dolichopoda* puede presentar flores (5) 6 (7)-meras, diplostemonas o pleiostemonas, y ovario 3-5-locular.

Por otro lado, *Miconia plena*, descrita a partir de colecciones del centro de la cordillera Oriental de Colombia, se caracteriza por los entrenudos cuadrangular aplanados, hojas 5-nervadas, flores sésiles 5-meras, pleiostemonas (con 20 estambres), estambres isomorfos, ovario 4-locular y estigma no expandido (Gleason, 1933a). Las dimensiones florales documentadas por Gleason (1933a) para esta especie son coincidentes con los de *M. dolichopoda*. Esto evidencia que son taxones similares que no se pueden distinguir, además con distribuciones geográficas que se solapan en Colombia.

Miconia dolichopoda crece desde Venezuela y Colombia hasta Costa Rica, entre los 1.200 y 2.900 m de elevación (Almeda, 2009; Goldenberg, *et al.*, 2013; Almeda, *et al.*, 2016). Se caracteriza por los entrenudos distales cuadrangular-aplanados, los tallos y el envés foliar con indumento denso café claro (tricomas estrellados adpresos), hojas 5-nervadas, inflorescencias paniculadas con ápices glomerulares, flores 5-7-meras, sésiles, diplostemonas o pleiostemonas, estambres isomorfos, ovario 3-5-locular y estigma no expandido. Asimismo, las hojas regularmente son brillantes por la haz y los peciolos son largos. Es bastante común en zonas andinas de Colombia.

Miconia lehmannii Cogn., Bot. Jahrb. Syst. 8 (1): 29. 1887.

Miconia mimica Gleason, Bull. Torrey Bot. Club 52: 451. 1925. **Syn. Nov.**

Miconia mimica fue descrita por Gleason (1925) a partir de colecciones procedentes del departamento de Cauca y en su artículo no la compara con *M. lehmannii*. El tipo de *M. mimica* exhibe características de tallos y hojas similares al de *M. lehmannii*, y las flores tienen estructuras con forma y dimensiones similares a las de esta última.

Miconia lehmannii es una especie restringida a zonas montañosas de Colombia y Venezuela, en elevaciones entre los 1.000 y 3.000 m (Goldenberg, *et al.*, 2013). Se caracteriza por las hojas elípticas 5-nervadas, venas terciarias aledañas a la vena media, abundantes, arqueadas y sobresalientes, inflorescencias con abundantes flores, flor 5-mera, hipanto 1-2 mm de largo, anteras que rematan en un boquete con 2 grandes aberturas, conectivo basal prolongado, estilo de 2-3 mm de largo, estigma expandido, y ovario 3-locular. Al parecer hay ejemplares en Cauca asignables a esta especie solo con flores estaminadas, por lo que es posible que esta especie pueda ser funcionalmente dioica.

El tipo de esta especie depositado en los Estados Unidos es distinto al de la foto del ejemplar Lehmann 5483 depositado en Mus. Bot. Berol, al parecer desaparecido, pero que es asignado como tipo. Este último no es un tipo, ya que proviene de Popayán, en el departamento de Cauca, y no de Caramanta, Antioquia, como lo referencia **Cogniaux** (1887). La especie más similar es *M. brachygyna* Gleason, pero esta última tiene flores unisexuales y los nudos presentan tricomas vináceos subulados; se requiere una revisión más detallada para establecer si *M. brachygyna* y *M. lehmannii* son distintas o corresponden a variaciones poblacionales.

Miconia mesmeana Gleason, Phytologia 1: 44. 1933.

Miconia chrysocoma Gleason, Bull. Torrey Club 68: 251. 1941. **Syn. Nov.**

Miconia aguirrei L. Uribe. Caldasia 12(56): 14-15. 1977. **Syn. Nov.**

Los ejemplares tipo de estos tres taxones provienen de localidades cercanas en el centro-norte de la cordillera Oriental de Colombia, en elevaciones entre los 2.700 y 3.500 m. Además, exhiben caracteres vegetativos similares y las medidas vegetativas y florales se solapan. **Gleason** (1933b, 1941) y **Uribe** (1977) no comparan estos tres taxones en sus publicaciones y más bien los comparan con otras especies como *M. difficilis* Triana y *M. divergens* Triana de Colombia, y *M. hirtella* Cogn. de Brasil.

Miconia mesmeana se caracteriza por presentar dos tipos de cubiertas en todas las partes de la planta, con tricomas filiformes de hasta 3 mm de largo y tricomas estrellados furfuráceos; hojas 3-plinervias (más un par adicional de venas secundarias cercano a la margen); flores 5-meras, sésiles o subsésiles; cáliz con lóbulos anchos triangulares o redondeados membranosos y dientes dorsales triangulares más o menos de igual longitud de los lóbulos; estambres isomorfos, anteras abriendo en boquetes, conectivo basal de la anteras con apéndices como pequeños lóbulos; estilo ensanchado hacia el ápice (levemente obcónico) y ovario 3-locular. Crece en la cordillera Oriental de Colombia y en Venezuela entre los 2.500 y 3.600 m de elevación, en zonas de subpáramo y páramo.

La especie más afín es *M. difficilis* de la cordillera Central, pero esta última difiere porque tiene estambres sin los apéndices del conectivo, el ápice de la antera no abre en boquetes, y las flores son más grandes y pediceladas. *Miconia divergens* es también otra especie vegetativamente muy parecida, pero se diferencia porque tiene hojas con venación basal, flores pediceladas en inflorescencias laxas, el estigma es expandido y además crece por debajo de los 2.500 de elevación.

De *M. mesmeana* se han descrito dos subespecies: *M. mesmeana* subsp. *jabonensis* Wurdack y *M. mesmeana* subsp. *longipetiolata* Wurdack. El presente sinónimo nuevo se asocia solo a la subespecie tipo o autónoma *M. mesmeana* subsp. *mesmeana*.

Miconia notabilis Triana, Transactions of the Linnean Society of London 28(1): 103. 1871[1872].

Miconia poecilantha L. Uribe, Caldasia 9: 86. 1964. **Syn Nov.**

Uribe (1964) destacó las diferencias entre estas dos especies: *M. poecilantha* tiene indumento furfuráceo de tricomas estrellado en nervios, venas foliares y ramas de la inflorescencia, los filamentos estaminales y el estilo piloso-glandulosos y el estigma peltado. Argumentó, además, que *M. poecilantha* es de la cordillera Oriental y suele tener ramas largas semipéndulas, en tanto que *M. notabilis* es de la cordillera Central. El indumento de tricomas estrellados en ramas también se encuentra en colecciones intermedias entre estas dos especies procedentes del departamento de Huila (eje. Stein 3512 FMB, MO), igual que los tricomas glandulares, solo que estos últimos son menos densos en las poblaciones o colecciones de la cordillera Central. El estigma en *M. notabilis* es igualmente expandido, pero en menor proporción que las colecciones de *M. poecilantha* de la cordillera Oriental. El número de lóculos de *M. notabilis* es de 4-6 y de *M. poecilantha* de 6-8. Considerando lo anterior, los caracteres del indumento, tricomas glandulares en filamento y estilo, así como el engrosamiento del estigma, son variables y hay colecciones que muestran estados intermedios, por lo que no es práctico mantener estos dos taxones separados.

Miconia notabilis se distribuye en zonas andinas de Colombia y Ecuador, entre los 450 y 2.400 m de elevación (Goldenberg, *et al.*, 2013; Almeda, *et al.*, 2016). Se reconoce por la nerviación con solo un par de venas secundarias basales desplegándose cerca de la margen, flores de 1 cm de largo, 6-8 pétalos pruinosos externamente y los estambres con tricomas glandulares.

Miconia pulvinata Gleason, Bulletin of the Torrey Botanical Club 52: 386. 1925.

Miconia toroi Gleason, Bulletin of the Torrey Botanical Club 54: 617. 1927. **Syn. Nov.**

Estos dos taxones comparten todos los caracteres vegetativos y florales difiriendo, según Gleason (1927), en que *M. toroi* tiene cáliz más carnoso, nudos densamente hirsutos, peciolos más largos y hojas pubescentes por la haz. No obstante, *M. pulvinata* tiene igualmente nudos densamente hirsutos, haz con pelos rojizos pero caducos (Wurdack, 1973), y la longitud del peciolo es variable. Los caracteres florales de la descripción original de *M. pulvinata* fueron inferidos de frutos inmaduros, de los que Gleason infirió las diferencias del cáliz entre las dos especies. No obstante, al revisar ejemplares con flores de *M. pulvinata* se hace evidente que los cálices son similares en los dos taxones. Wurdack (1973) en la Flora de Venezuela ya comentaba que estos taxones son coespecíficos.

Miconia pulvinata en Colombia se asocia al grupo de *M. aponeura* Triana, *M. blakeifolia* Gleason, *M. ciliata* (L.C.Rich.) DC., *M. lacera* (Bonpl.) Naudin, *M. oinochrophylla* Donn. Sm., *M. racemosa* (Aubl.) DC., *M. reducens* Triana y *M. transversa* Gleason, todas con inflorescencias de ramas secundifloras. De todo este grupo, *M. pulvinata* se reconoce por los peciolos cortos y densamente pubescentes. Crece en Colombia en zonas andinas y en la cordillera de La Costa en Venezuela, entre los 420 y 1.800 m de elevación (Goldenberg, *et al.*, 2013; Almeda, *et al.*, 2016).

Miconia tomentosa (L. C. Rich.) D. Don ex DC., Prodr. 3: 183. 1828.

Miconia biglandulosa Gleason, Bull. Torrey Club 59: 367. 1932. **Syn. Nov.**

Wurdack (1980) comenta que *M. biglandulosa* es similar a *M. tomentosa* y que es una permutación de esta última, no obstante, diferencia los dos taxones por los filamentos y el estilo glabros o con escasos tricomas glandulares y el conectivo de la antera con 1-2 tricomas glandulares en *M. biglandulosa*. Gleason (1932) en la descripción de *M. biglandulosa* no nombra a *M. tomentosa*, y describe que los filamentos y el estilo son glabros. La comparación de colecciones de zonas amazónicas de Colombia no permite separar estos dos taxones, ya que vegetativamente y por las características de la flor son similares, y además, la densidad de tricomas glandulares en filamentos, antera y estilo es variable, encontrándose una gradación de la densidad de tricomas glandulares en ejemplares de herbario.

Miconia tomentosa se encuentra ampliamente distribuida en todo el Neotrópico, incluidas las Antillas, en zonas bajas de bosques húmedos (Goldenberg, *et al.*, 2013). En Colombia se encuentra en la Amazonia, Magdalena Medio y Chocó biogeográfico, y alcanza a subir en los Andes hasta los 1.200 m de elevación (Almeda, *et al.*, 2016). Los caracteres que circunscriben esta especie son: indumento denso de tricomas pinoides en ramas, envés foliar e inflorescencia; hojas sésiles o subsésiles, fuertemente plinervias; inflorescencia paniculada y piramidal; conectivo de la antera glandular pubérulo, y ovario 3-locular.

Miconia trinervia (Sw.) D. Don ex Loudon, Loudon's Hortus Britannicus. 174. 1830.

Miconia goudotii Naudin, Annales des Sciences Naturelles; Botanique, sér. 3, 16 (2): 155-156. 1851. **Syn. Nov.**

Miconia goudotii fue descrita a partir de ejemplares provenientes del departamento de Tolima en el Valle del Magdalena de Colombia. También se conoce de algunos ejemplares en el herbario COL identificados por H. A. Gleason y J. J. Wurdack de los departamentos de Boyacá (Valle del Magdalena) y Meta (región de la Orinoquia). Sus caracteres vegetativos y florales son similares a los de *M. trinervia* y solo difiere en que presenta ovario 5-locular (*Vs.* 3-locular en *M. trinervia*) y estigma expandido (*Vs.* truncado). No obstante, el número de lóculos es variable para *M. trinervia*, ya que puede

presentar ovario 3-4-locular en Ecuador (**Wurdack**, 1980). Asimismo, el estigma varía entre truncado y levemente expandido en poblaciones de Centroamérica y Ecuador (**Wurdack**, 1980; **Almeda**, 2009).

Considerando las variaciones del ovario, *M. trinervia* se caracteriza por el indumento denso en ramas y hojas de tricomas lepidoto-estrellados, entrenudos aplanados aristados, hojas 3-plinervadas con las venas secundarias desplegándose cerca de la margen foliar, inflorescencias con ramas secundifloras, flores 5-meras, sésiles, estambres subiguales, ovario 3-5-locular y estigma levemente expandido o truncado. Se distribuye desde Bolivia y Brasil hasta las Guayanas y Colombia, en Centroamérica hasta México y en Jamaica en elevaciones entre los 0 y los 1.700 m (**Wurdack**, 1973, 1980; **Almeda**, 2009; **Goldenberg**, *et al.*, 2013).

Nuevos registros de especies para Colombia

A continuación, se documentan nuevos taxones para Colombia en el formato impreso del CPLC. Taxones nuevos publicados recientemente (últimos 10 años) y no considerados en el CPLC se señalan con*.

Adelobotrys boissierianus Cogn.

Wurdack (1980) / Liana / Nativa / Amazonia / 250-350 m / CAQ, PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia / *Mendoza 8091* (FMB).

**Adelobotrys latifolius* Schulman

Schulman & Roukolainen (2015) / Liana / Nativa / Amazonia / 325 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú, Brasil / *Klug 1953* (F, GH, K).

**Allomaieta javierbarrigae* Humberto Mend.

Mendoza-Cifuentes (2018) / Arbusto / Endémica / Amazonia / 700-900 m / CAQ, PUT / En Peligro (Mendoza-Cifuentes 2018) / Piedemonte Amazonico / *Mendoza 18815* (FMB).

**Axinaea minutiflora* E. Cotton

Cotton, *et al.* (2014) / Arbusto / Endémica / Andes / 2500-3200 m / CAL, QUI, RIS, VAL / No evaluada / Cordillera Occidental / *Medina 5* (FMB).

Bellucia huberi (Wurdack) S.S. Renner

Loreya huberi Wurdack / Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol / Nativa / Amazonia / 100-300 m / VAU / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Cárdenas 22312* (COAH).

Bellucia subandina (Wurdack) Penneys, Michelangeli, Judd & Almeda

Loreya subandina Wurdack / Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Arbusto / Nativa / Amazonia / 700-800 m / CAQ / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú / *Cárdenas 40256* (COAH).

Blakea amplifolia (Almeda) Penneys & Almeda

Topobea amplifolia Almeda / Penneys & Judd (2013) / Arbusto / Nativa / Chocó, Andes / 1300-1600 m / ANT, CHO / No evaluada / Colombia, Ecuador, Panamá / *Mendoza 17337* (FMB).

Blakea austinsmithii Standl.

Penneys (2007) / Hemiepífita / Nativa / Chocó, Andes / 1320-1350 m / ANT, CHO / No evaluada / Colombia, Ecuador, Panamá / *Cogollo 4994* (FMB).

Blakea calophylla (Almeda) Penneys & Almeda

Topobea calophylla Almeda / Penneys & Judd (2013) / Hemiepífita / Nativa / Amazonia / 750 m / PUT / No evaluada / Colombia, Panamá / *Mendoza 5545* (FMB).

Blakea campii Wurdack

Penneys (2007) / Hemiepífita / Nativa / Andes / 1670-1900 m / ANT, NAR / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Mendoza 8641* (PSO) / Nota: *Blakea ferruginea* Cogn. Sp. ined. es similar a esta especie.

Blakea eriocalyx Wurdack

Penneys (2007), Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Hemiepipífta / Nativa / Andes / 650-2000 m / CAU, CAQ, NAR, PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Mendoza 8630* (FMB).

Blakea hispida Markgr.

Penneys (2007) / Hemiepipífta / Nativa / Andes / 1400 m / ANT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *McPherson 1975* (HUA).

Blakea lindeniana (Naudin) Triana

Penneys (2007) / Hemiepipífta / Nativa / Andes / 2300 m / SAN / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Mendoza 18931* (FMB).

Blakea portentosa Wurdack

Penneys (2007) / Árbol / Nativa / Amazonia / 800-900 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Cárdenas 45385* (COAH).

Blakea sawadae J.F. Macbr.

Penneys (2007) / Árbol / Nativa / Amazonia / 592 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Aguilar-Cano 5781* (FMB).

Blakea spruceana Cogn.

Penneys (2007) / Árbol / Nativa / Andes / 1200-1450 m / CAQ / No evaluada / Colombia, Ecuador, Brasil, Perú / *Castaño 9210* (COAH).

Blakea standleyana J.F. Macbr.

Penneys (2007) / Hemiepipífta / Nativa / Andes / 1325 m / NAR / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú / *Betancur 4449* (HUA).

Blakea storkii (Standl.) Almeda

Topobea storkii Standl., *Blakea woodsonii* Gleason / Penneys (2007) / Hemiepipífta, Liana / Nativa / Andes / 950-2150 m / ANT / No evaluada / Colombia, Panamá, Costa Rica / *Cogollo 4237* (FMB).

Blakea subvaginata Wurdack

Penneys (2007), Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Hemiepipífta / Nativa / Andes / 1820-2076 m / NAR, PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Hernández 2640* (COAH).

Clidemia bernardii Wurdack

Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Hierba, Arbusto / Nativa / Amazonia / 50-200 m / AMA, CAQ / No evaluada / Colombia, Venezuela, Brasil / *Londoño 781* (COAH).

Clidemia charadrophila Tutin

Ulloa, *et al.* (2017) / Arbusto / Nativa / Amazonia / 170-300 m / AMA, CAQ, VAU / No evaluada / Colombia, Venezuela, Guayana / *Cárdenas 49518* (COAH).

Clidemia imparilis Wurdack

Jørgensen, *et al.* (2014) / Arbusto / Nativa / Andes / 1000-2000 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Mendoza 5623* (FMB).

Clidemia procumbens Gleason

Jørgensen, *et al.* (2014) / Hierba / Nativa / Amazonia / 333 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú / *Rodríguez 8185* (HUA).

Comolia serpyllacea Wurdack

Ulloa, *et al.* (2017) / Hierba / Nativa / Guayana / 215 m / GUI / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Cárdenas 44065* (COAH).

****Conostegia ortiziae*** Kriebel

Kriebel (2016) / Árbol / Nativa / Amazonia / 526 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Rivera 184* (COAH).

Henriettea loretensis (Gleason) J.F. Macbr.

Henriettella loretensis Gleason / Jørgensen & León-Yáñez (1999) / Árbol / Nativa / Amazonia / 245 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador, Brasil, Perú / *Aguilar-Cano 5631* (FMB).

Leandra nanayensis Wurdack

Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Arbusto / Nativa / Amazonia / 100-300 m / AMA, VAU / No evaluada / Colombia, Perú / *Roukalainen 12191* (COAH).

Leandra rufescens (DC.) Cogn.

Ulloa, *et al.* (2017) / Arbusto / Nativa / Amazonia / 320 m / VAU / No evaluada / Colombia, Venezuela, Guayana, Brasil, Perú, también en Antillas / *Betancur 21956* (COAH).

Macairea duidae Gleason

Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Hierba, Arbusto / Nativa / Guayana / 370 m / VAU / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Cárdenas 43875* (COAH).

Macairea pachyphylla Benth.

Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Arbusto / Nativa / Guayana / 270-430 m / VAU / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Cárdenas 43774* (COAH).

****Meriania neillii*** Humberto Mend.

Mendoza-Cifuentes (2021) / Árbol / Nativa / Andes / 1200-2500 m / CAQ, CAU, NAR, PUT, VAL / Vulnerable / Colombia, Ecuador, Perú / *Mendoza 765* (FMB).

****Meriania ramosii*** Humberto Mend.

Mendoza-Cifuentes (2021) / Árbol / Endémica / Andes / 1300-1500 m / CHO / Vulnerable / Vertiente occidental de la cordillera Occidental / *Mendoza 17338* (HT: FMB).

****Miconia alatissima*** Gamba & Almeda

Gamba & Almeda (2014) / Árbol / Nativa / Andes / 1850-2000 m / NAR / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Herrera 9249* (FMB).

Miconia amilcariana Almeda & Dorr

Almeda & Dorr (2006) / Árbol / Nativa / Andes / 1210-2600 m / MAG, NSA, SAN / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Mendoza 14591* (FMB).

Miconia aurantiaca (Almeda & Kriebel) Gamba & Almeda

Gamba & Almeda (2014) / Arbusto / Nativa / Andes / 1850-2000 m / NAR / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Mendoza 744* (FMB) / Nota: reportada como esperada en el CPLC, esta es la constatación.

Miconia brevipes Benth.

Goldenberg, *et al.* (2013) / Arbusto / Nativa / Orinoquia / 90-120 m / VIC / No evaluada / Colombia, Venezuela, Brasil / *Córdoba 1138* (FMB).

****Miconia brigittei*** Humberto Mend. & Posada-Herrera

Mendoza-Cifuentes & Posada-Herrera (2018) / Arbusto / Endémica / Andes / 1330-2020 m / ANT, CAU, NAR, VAL / Vulnerable (Mendoza-Cifuentes & Posada-Herrera 2018) / Cordillera Occidental, flanco occidental y centro-norte de la Cordillera Central / *Gil-Ch.730* (HT: FMB).

Miconia calignosa Wurdack

Goldenberg, *et al.* (2013) / Arbusto / Nativa / Andes / 1800-1900 m / CAQ / Vulnerable (Valencia Reyes *et al.* 2000) / Colombia, Ecuador / *Álvarez 971* (FMB).

****Miconia cornifera*** Humberto Mend., Posada-Herrera & Heriberto David

Mendoza-Cifuentes, *et al.* (2019) / Arbusto / Endémica / Andes / 1300-1600 m / VAL / No evaluada / Vertiente occidental de la cordillera Occidental / *Mendoza 17327* (HT: FMB).

Miconia cremophylla Naudin

Goldenberg, *et al.* (2013) / Árbol, arbusto / Nativa / Andes / 1500-2470 m / BOY, CAU, CAL, CAQ, CUN, HUI, MET, NSA, QUI, RIS, SNT, VAL / No evaluada / Colombia, Bolivia, Perú / *Mendoza 17590* (FMB) / NOTA: no considerada inicialmente en el CPLC por mala determinación; se confirma su presencia en Colombia.

****Miconia curvitheca*** Posada-Herrera & Humberto Mend.

Posada-Herrera & Mendoza-Ciuentes (2016) / Arbusto / Endémica / Andes / 2900-3700 m / CAU, QUI, TOL, VAL / No evaluada / *Posada & Bohórquez 474* (HT: CUVC; IT: COL).

Miconia dicrophylla J.F. Macbr.

Goldenberg, *et al.* (2013) / Árbol / Nativa / Amazonia / 815 m / CAQ / No evaluada / Colombia, Perú, Bolivia, Brasil / *Cárdenas 43394* (COAH).

Miconia dioica Wurdack

Goldenberg, *et al.* (2013) / Liana, arbusto escandente / Nativa / Andes / 1750-2600 m / CAL, QUI / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Vargas 10536* (FMB).

Miconia dispar Benth.

Goldenberg, *et al.* (2013) / Árbol / Nativa / Amazonia / 250-300 m / CAQ, GUV, VIC / No evaluada / Colombia, Perú, Venezuela, Brasil / *Prieto 5704* (FMB).

Miconia egensis Cogn.

Goldenberg, *et al.* (2013), Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol, arbusto / Nativa / Amazonia / 300-350 m / CAQ, GUV, PUT / No evaluada / Colombia, Venezuela, Guayanas, Ecuador, Perú, Brasil / *Marín 766* (COAH).

Miconia glaucescens Triana

Goldenberg, *et al.* (2013) / Árbol / Nativa / Andes, Amazonia / 500-800 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú / *Mendoza 18813* (FMB).

****Miconia hernandogarciae*** Humberto Mend. & A. Idárraga

Mendoza-Ciuentes, *et al.* (2018) / Arbusto / Endémica / Andes / 1447 m / ANT / En Peligro (Mendoza-Ciuentes *et al.*, 2018) / Posiblemente se encuentra en la franja de bosque subandino en los flancos de las cordilleras Central y Oriental que colindan con Magdalena Medio en Antioquia y Santander / *Mendoza et al. 19536* (HT: FMB; IT: FMB, CAUP, COL, CUVC, HUA).

Miconia heteromera Naudin

Goldenberg, *et al.* (2013) / Árbol / Nativa / Pacífico / 50-100 m / CHO / No evaluada / Colombia, Perú / *U.B. 26* (FMB).

Miconia hondurensis Donn.Sm.

Goldenberg, *et al.* (2013) / Árbol / Nativa / Pacífico / 50-100 m / CHO / No evaluada / Colombia, Centroamérica / *Zuluaga 1687* (FMB).

Miconia klugii Gleason

Goldenberg, *et al.* (2013), Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol / Nativa / Amazonia / 150-250 m / AMA, CAQ, VAU / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Ruokolainen 11893* (COAH).

****Miconia latidecurrens*** Gamba & Almeda

Gamba & Almeda (2014) / Arbusto / Nativa / Pacífico / 150 m / CAU / No evaluada / Colombia, Panamá, Costa Rica / *Vargas 15568* (ICESI).

Miconia livida Triana

Goldenberg, *et al.* (2013), Forero & Gentry (1989) / Arbusto / Nativa / Andes, Pacífico (Cerro Tacarcuna) / 900-2800 m / CAQ, CHO, CUN, NSA, PUT, SAN, TOL, VAL / No evaluada / Centroamérica, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia / *Villanueva 4236* (TOLI).

Miconia lutescens (Bonpl.) DC.

Goldenberg, *et al.* (2013) / Arbusto / Nativa / Andes / 3000-3250 m / NAR / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Ramírez 6599* (PSO).

****Miconia mailynii*** Humberto Mend. & Aguirre-Santoro

Mendoza-Cifuentes, *et al.* (2018) / Arbusto / Endémica / Andes / 1330-1500 m / ANT, BOY, CAL, CUN / En Peligro (Mendoza-Cifuentes *et al.*, 2018) / Posiblemente se encuentra en la franja de bosque subandino en los flancos de las cordilleras Central y Oriental que colindan con Magdalena Medio / *Mendoza et al. 19547* (HT: FMB; IT: FMB, HUA, COL, CUVC, CAUP).

Miconia pissinna Wurdack

Goldenberg, *et al.* (2013) / Hierba / Nativa / Andes / Altitud no conocida / NSA / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Barbosa 4294* (FMB).

Miconia quadripora Wurdack

Goldenberg, *et al.* (2013), Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol / Nativa / Andes / 1900 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Montoya UN-OM 076* (COAH).

****Miconia rheophytica*** Posada-Herrera & Almeda

Posada-Herrera & Almeda (2018) / Arbusto / Endémica, V. Magdalena / 110-600 m / ANT / Amenazada (Posada-Herrera & Almeda 2018) / Rión Nechi, Samana y Río Claro / *Hoyos-Gómez 3105* (HT: HUA)

Miconia riparia Triana

Goldenberg, *et al.* (2013), Idárraga & Michelangeli (2011) / Arbusto / Nativa / V. Magdalena / 0-500 m / ANT / No evaluada / Colombia, Perú / *Albert de Escobar 3329* (HUA).

Miconia schunkei Wurdack

Goldenberg, *et al.* (2013), Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Arbusto / Nativa / Andes, Amazonia / 200-1150 m / AMA, CAU, PUT, VAU / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú, Brasil / *Ramírez 15842* (COAH).

Miconia scutata Gleason

Goldenberg, *et al.* (2013) / Arbusto / Nativa / Andes / 1000-1200 m / PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador / *Mendoza 5638* (FMB).

Miconia stelligera Cogn.

Goldenberg, *et al.* (2013), Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Arbusto / Nativa / Amazonia / 350 m / CAQ / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil / *Mendoza 10034A* (FMB).

Miconia tabayanensis Wurdack

Goldenberg, *et al.* (2013) / Arbusto / Nativa / Andes / 2600-2700 m / SAN / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Mendoza 21757* (FMB).

Miconia tachirensis Wurdack

Goldenberg, *et al.* (2013) / Árbol, arbusto / Nativa / Andes / 2000-3000 m / BOY, CAU, CUN, HUI, MET, PUT, SAN / No evaluada / Colombia, Venezuela / *Betancur 5652* (FMB).

Miconia tetraspermoides Wurdack

Goldenberg, *et al.* (2013), Mendoza-Cifuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol, Arbusto / Nativa / Amazonia / 150 m / AMA / No evaluada / Colombia, Venezuela, Guyanas, Brasil / *Castaño 1251* (COAH).

****Miconia yeseniae*** W. Palacios, D. Fernández & Michelang.

Palacios, *et al.* (2018) / Árbol / Nativa / Andes / 2600 m / CAU / No evaluada / Colombia, Ecuador / *González 2918* (COL).

Miconia zubenetana Macbride

Goldenberg, *et al.* (2013), Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol / Nativa / Amazonia, Pidemonte / 200-766 m / BOY, CAQ, GUV, NAR, PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú / *Cárdenas 24724* (COAH).

****Microlicia colombiana*** Humberto Mend. & R. Romero

Mendoza-Ciuentes, *et al.* (2019) / Arbusto / Endémica / Andes / 2000-2400 m / BOY, CAS / No evaluada / Subpáramo, Cordillera Oriental / *Mendoza & D. Granados 22014* (HT: FMB; IT: COL, CUVC, HUA, FMB, UDBC).

****Monochaetum tonaense*** Alvear & Almeda

Alvear & Almeda (2019) / Arbusto / Endémica / Andes / 3400 m / SAN / No evaluada / Subpáramo, Cordillera Oriental / *D. Villamizar 15* (HT: COL; IT: US).

Mouriri chamissoana Cogn.

Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol, Arbusto / Nativa / Amazonia / 300-450 m / AMA, CAQ, GUI, GUV, PUT, VAU / No evaluada / Colombia, Brasil / *Restrepo 411* (COAH).

Mouriri huberi Cogn.

Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol / Nativa / Amazonia / 100-200 m / CAQ / No evaluada / Colombia, Venezuela, Ecuador, Peru, Brasil / *Gangi 49* (COAH).

Mouriri rhizophorifolia (DC.) Triana

Wurdack (1973) / Árbol / Nativa / Caribe / 650 m / LAG / No evaluada / Colombia, Venezuela, Antillas / *Bernal 90* (COL).

Pterolepis glomerata (Rottb.) Miq.

Renner (1994) / Hierba / Nativa / Andes / 1400 m / CAL / No evaluada / *J. M. Posada 1121* (FAUC).

Tessmannianthus cenepensis Wurdack

Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Árbol / Nativa / Amazonia / 150-250 m / AMA, PUT / No evaluada / Colombia, Ecuador, Perú / *Ruokolainen 12486* (COAH).

Tococa stenoptera Gleason

Michelangeli (2005); Mendoza-Ciuentes & Cárdenas-López (2015) / Arbusto / Nativa / Amazonia, Guayana / 200-975 m / AMA, CAQ, GUV, MET, PUT, VAU / No evaluada / Colombia, Perú, Brasil / *Rosero MRR-037* (COAH).

****Wurdastom lateriflora*** Humberto Mend.

Mendoza-Ciuentes (2020) / Arbusto / Endémica / Pacífico / 500 m / CHO, VAL / Datos Insuficientes / Planicie Pacífica / *Gentry 53710* (HT: CUVC; IT: MO).

Ampliación de distribuciones

En el **Apéndice 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1448/3135>; se presenta la ampliación de la distribución departamental o de los rangos de elevación, la cual comprende 291 especies. La mayor parte corresponde a nuevos registros departamentales (265 especies) y, en menor proporción, a ampliaciones en el rango de elevación (99 especies). Los departamentos con mayor número de nuevos registros fueron Caquetá, Boyacá y Santander (**Tabla 2**).

Discusión y conclusiones

El aporte del CPLC al conocimiento de la flora del país es inmenso, por lo que es importante alimentarlo y actualizarlo constantemente. El CPLC se basó principalmente en los registros del Herbario Nacional Colombiano (COL) y de los principales herbarios en Estados Unidos, por lo que buena parte de la información de colecciones pequeñas regionales no quedó reflejada en esta publicación.

Tabla 2. Número de nuevos registros de especies de Melastomataceae por departamento en Colombia

Departamento	Sigla del departamento	Número de nuevos registros de especies
Caquetá	CAQ	50
Boyacá	BOY	47
Santander	SAN	47
Caldas	CAL	31
Putumayo	PUT	25
Valle del Cauca	VAL	23
Huila	HUI	22
Antioquia	ANT	20
Risaralda	RIS	17
Meta	MET	16
Amazonas	AMA	15
Casanare	CAS	15
Quindío	QUI	15
Cauca	CAU	13
Guaviare	GUV	12
Nariño	NAR	12
Arauca	ARA	11
Cundinamarca	CUN	9
Guainía	GUI	9
Vaupés	VAU	9
Chocó	CHO	8
Norte de Santander	NSA	8
Vichada	VIC	5
Cesar	CES	4
La Guajira	LAG	4
Sucre	SUC	4
Magdalena	MAG	2
San Andrés y Providencia	SP	2
Tolima	TOL	2
Bolívar	BOL	1

El presente trabajo, basado en la revisión de la literatura, en especial de colecciones regionales, aporta 76 nuevos registros de especies en Colombia entre novedades corológicas y recientes descubrimientos taxonómicos, y establece 23 nuevos sinónimos asociados a los géneros *Adelobotrys*, *Axinaea*, *Blakea*, *Henriettea* y *Miconia*.

Estos nuevos registros de especie, sinónimos y complementos de distribución se deben a la creciente actividad de publicaciones por parte de las colecciones en el país, así como a la incorporación de datos provenientes de los herbarios regionales. Gracias a la revisión de las colecciones de dichos herbarios, en este trabajo se complementó la información sobre la distribución departamental y de elevación del 29 % de las especies de Melastomataceae presentes en el CPLC.

Estos resultados muestran que el inventario de la flora es dinámico y que especialmente las distribuciones de las especies se amplían constantemente. En el caso de Melastomataceae,

los herbarios regionales fueron la principal fuente para complementar el CPLC. Por esta razón, es importante mantenerlos actualizados, con altos niveles de curatoría, y considerar su información en las publicaciones de diferentes grupos taxonómicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a todos los herbarios nacionales que hicieron aportes para la realización de este trabajo: Instituto SINCHI (COAH), Universidad Nacional de Colombia (COL), Universidad del Valle (CUVC), Instituto Alexander von Humboldt (FMB), Universidad de Antioquia (HUA), Universidad ICESI (ICESI), Universidad de Nariño (PSO), Universidad del Tolima (TOLI) y Jardín Botánico de Bogotá (JBB), FAUC y UDBC.

Información suplementaria

Apéndice 1. Lista de especies de Melastomataceae de Colombia con nuevas ampliaciones de la distribución departamental y/o de los rangos de elevación. Ver el apéndice 1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1448/3135>

Contribución de los autores

HMC: compilación de la información, revisión de colecciones, redacción del manuscrito; MP: redacción del manuscrito; HD: revisión de colecciones y redacción del manuscrito

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Almeda, F.** (2001). Melastomataceae. En: W. D. Stevens, C. Ulloa Ulloa, A. Pool, O. M. Montiel Jarquín (Eds.) Fl. Nicaragua Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard. Missouri Botanical Garden, St. Louis. **85** (2): 1339-1419.
- Almeda, F.** (2009). Melastomataceae. En: W. D. Stevens, C. Ulloa Ulloa, A. Pool & O. M. Montiel Jarquín (Eds.) Fl. Mesoamericana. Fecha de consulta: 26 de junio, 2020. Disponible en: Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. <http://www.tropicos.org/Name/42000202>
- Almeda, F. & Dorr, L.J.** (2006). *Miconia amilcariana* (Melastomataceae: Miconiaceae), a new species from the Venezuelan Andes with notes on the distribution and origin of dioecy in the Melastomataceae. Proc. Calif. Acad. Sci. Ser. 4. **57** (19): 549-555.
- Almeda, F., Alvear, M., Mendoza-Ciuentes, H., Penneys, D.S., Michelangeli, F.** (2016). Melastomataceae. En R. Bernal, S.R. Gardstein, M. Celis (Eds.), Catálogo de plantas y líquenes de Colombia (1585-1664). Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/resultados/familia/Melastomataceae/>
- Alvear, M. & Almeda, F.** (2019). Revision of *Monochaetum* (Melastomataceae: Melastomeae) in Colombia. Syst. Bot. Monogr. **109**: 1-153.
- Bernal, R., Gradstein, S.R., Celis, M.** (Eds.) (2016). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Bogotá D.C.: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. 3060 pp.
- Cogniaux, C.A.** 1887. Mélastomacées. Bull. Acad. r. Belg. ser. 3. **14**: 942.
- Cotton, E., Borchsenius, F., Balslev, H.** (2014). A revision of *Axinaea* (Melastomataceae). Scientia Danica, Series B, Biologica, vol. 4. Det Kongelige Danske Videnskaberne Selskab (The Royal Danish Academy of Sciences and Letters), København. 120 pp.
- Candolle, A.P.de.** (1828). Melastomataceae. En de Candolle, A. P. de (Ed.), Prodromus Systematis Naturalis Regni Vegetabilis. **3**: 99-102.
- Don, D.** (1823). An illustration of the natural family of plants called Melastomataceae. Mem. Wern. Nat. Hist. Soc. **4** (2): 276-329.
- Eves, D. S.** (1936). A revision of the genus *Axinaea* (Melastomataceae). Bull. Torrey Bot. Club. **63**: 211-226.
- Forero, E. & Gentry, A.** (1989). Lista anotada de plantas del departamento del Chocó, Colombia. Instituto de Ciencias Naturales. Museo de Historia Natural. Universidad Nacional de Colombia. Biblioteca José Jerónimo Triana. **10**: 1-142.

- Gamba, D. & Almeda, F.** (2014). Systematics of the Octopleura Clade of *Miconia* (Melastomataceae: Miconieae) in Tropical America. *Phytotaxa*. **179** (1): 1-174. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.179.1.1>
- Gleason, A.H.** (1925). Studies on the Flora of Northern South America-VIII. *Bull. Torrey Bot. Club*. **52** (8): 447-460.
- Gleason, A.H.** (1927) Studies on the Flora of Northern South America-X. *Bull. Torrey Bot. Club*. **54**: 617.
- Gleason, A.H.** (1930). Studies on the Flora of Northern South America-XIV. Melastomataceae from Colombia and Ecuador. *Bull. Torrey Bot. Club*. **57** (1): 63-75.
- Gleason, A.H.** (1932). Studies on the Flora of Northern South America-XVII. *Bull. Torrey Bot. Club*. **59** (6): 361-376.
- Gleason, A.H.** (1933a). Notes on the flora of northern South America - XVIII, Plantae Lawranceanae Colombianae. *Phytologia*. **1**: 31-38.
- Gleason, A.H.** (1933b). Nine South American Melastomes. *Phytologia*. **1**: 41-48.
- Gleason, A.H.** (1941). Novelties in the Melastomataceae. *Bull. Torrey Bot. Club*. **68** (4): 244-253.
- Gleason, A.H.** (1945). On *Blakea* and *Topobea*. *Bull. Torrey Bot. Club*. **72** (4): 385-393.
- Gleason, A. H.** (1950). Observations on tropical American Melastomes. *Phytologia*. **3** (7): 345-360.
- Goldenberg, R., Almeda, F., Caddah, M.K., Martins, A.B., Meirelles, J., Michelangeli, F.A., Weiss, M.** (2013). Nomenclator botanicus for the Neotropical genus *Miconia* (Melastomataceae: Miconieae). *Phytotaxa*. **106**: 1-171. <http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.106.1.1>
- Idárraga, A. & Michelangeli, F.** (2011). Melastomataceae. En A. Idárraga, R. del C. Ortíz, R. Callejas, M. Merello (Eds.), Flora de Antioquia: catálogo de las plantas vasculares. Vol. II. Listado de las plantas vasculares del departamento de Antioquia (p. 600-626). Bogotá, Colombia: Programa Expedición Antioquia-2013, Series Biodiversidad y Recursos Naturales, Universidad de Antioquia, Missouri Botanical Garden & Oficina de planeación departamental de la Gobernación de Antioquia, Editorial D'Vinni.
- Jørgensen, P.M. & León-Yáñez, S.** (Eds.) (1999). Catalogue of the Vascular Plants of Ecuador. *Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard*. **75**: i-viii, 1-1181.
- Jørgensen, P.M., Nee, M.H., Beck, S.G.** (Eds.) (2014). Catálogo de Plantas Vasculares de Bolivia. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis. *Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard*. **127** (1-2): 1-1744.
- Kriebel, R.** (2016). A monograph of *Conostegia* (Melastomataceae, Miconieae). *PhytoKeys*. **67**: 1-326. Doi: 10.3897/phytokeys.67.6703
- Mendoza-Cifuentes, H.** (2018). Una nueva especie de *Allomaieta* (Melastomataceae, Cyphostyleae) del piedemonte amazónico de los Andes de Colombia. *Biota Colombiana*. **19** (1): 10-16. <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/525/515>
- Mendoza-Cifuentes, H.** (2020). Taxonomic revision of the genus *Wurdastom* (Melastomataceae: Cyphostyleae). *Acta Bot. Mex*. **127**: e1642. Doi: 10.21829/abm127.2020.1642
- Mendoza-Cifuentes, H.** (2021). El género *Meriania* (Melastomataceae) en Colombia. *Acta Bot. Mex*. En prensa.
- Mendoza-Cifuentes, H. & Cárdenas-López, D.** (2015). Melastomataceae de la región amazónica colombiana: catálogo y algunos aspectos de representatividad de las colecciones. *Colombia Amazónica*. **8**: 55-91. <https://www.sinchi.org.co/revista-colombia-amazonica-viii>
- Mendoza-Cifuentes, H. & Posada-Herrera, M.** (2018). Una nueva especie de *Miconia* (Melastomataceae) de hojas rojizas de los andes de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **42** (162): 74-79. Doi: 10.18257/raccefyn.602
- Mendoza-Cifuentes, H., Aguirre-Santoro, J., Idárraga, A.** (2018). Dos nuevas especies de *Miconia* (Melastomataceae) del piedemonte oriental de la cordillera Central de Antioquia, Colombia. *Biota Colombiana*. **19** (Sup.1): 17-28. <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/526/51410.21068/c2018.v19s1a03>
- Mendoza-Cifuentes, H., Ariza, W., Granados, D.E., Romero, R.** (2019). A new species of *Microlicia* (Melastomataceae): first record of the genus for Colombia. *PhytoKeys*. **122**: 87-96. Doi: 10.3897/phytokeys.122.34171
- Mendoza-Cifuentes, H., Posada-Herrera, M., David, H.** (2019). Una nueva especie de *Miconia* (Melastomataceae) con anteras connadas de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **43** (167): 250-254. Doi: 10.18257/raccefyn.848
- Michelangeli, F.A.** (2005). *Tococa* (Melastomataceae). *Fl. Neotrop. Monogr*. **98**: 1-114.
- Naudin, C.** (1850). Melastomatacearum. Quae in Museo Parisiensis continentur Monographica descriptionis. *Ann. Sci. Nat., Bot., sér. 3*. **14** (2): 118-165.

- Naudin, C.** (1852). Melastomatacearum quae in Musaeo Parisiensi Continentur -Monographicae Descriptionis. Annales des Sciences Naturelles; Botanique, Ann. Sci. Nat. Bot., sér. 3. **18** (2): 124-129.
- Palacios-Cuenca, W., Fernández-Fernández, D., Michelangeli, F.A.** (2018). A new species of *Miconia* (Miconiaceae, Melastomataceae) from Northwest Ecuador. *Phytotaxa*. **379** (3): 247-254. Doi: 10.11646/phytotaxa.379.3.2
- Penneys, D.S.** (2007). Phylogeny and character evolution in the Blakeaceae (Melastomataceae). PhD Thesis. University of Florida, USA.
- Penneys, D.S., Judd, W.S.** (2013). A revised circumscription for the Blakeaceae (Melastomataceae) with associated nomenclatural adjustments. *Phytokeys*. **20**: 17-32. Doi: 10.3897/phytokeys.20.4344
- Posada-Herrera, M. & Mendoza-Ciuentes, H.** (2016). *Miconia curvitheca* (Melastomataceae), una nueva especie nativa de los bosques altoandinos y subpáramos de los Andes centrales, Colombia. *Biota Colombiana*. **17** (2): 12-18. Doi: 10.21068/C2016.v17n02a02
- Posada-Herrera, J.M. & Almeda, F.** (2018). *Miconia rheophytica* (Melastomataceae: Miconiaceae), a new and endangered species from the Magdalena Medio region of Colombia. *Phytotaxa*. **371** (1): 055-061. <https://www.biotaxa.org/Phytotaxa/article/view/phytotaxa.371.1.7>
- Renner, S.S.** (1994). A revision of *Pterolepis* (Melastomataceae: Melastomeae). *Nord. J. Bot.* **14**: 73-104.
- Schulman, L. & Roukolainen, K.** (2015). *Adelobotrys tessmannii* (Merianieae, Melastomataceae) and allies: a refined circumscription and description of two new Amazonian species with notes on their ecology. *Phytotaxa* **234** (2): 101-120. Doi: 10.11646/phytotaxa.234.2.1
- Triana, J.J.** (1872) ("1871"). Les Mélastomacées. *Trans. Linn. Soc. London*. **28**: 1-188.
- Turland, N.J., Wiersema, J.H., Barrie, F.R., Greuter, W., Hawksworth, D.L., Herendeen, P.S., Knapp, S., Kusber, W.H., Li, D.Z., Marhold, K., May, T.W., McNeill, J., Monroe, A.M., Prado, J., Price, M.J., Smith G.F.** (Eds.) (2018). International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code) adopted by the Nineteenth International Botanical Congress Shenzhen, China, July 2017. *Regnum Vegetabile* 159. Glashütten: Koeltz Botanical Books. Doi: 10.12705/Code.2018
- Ulloa Ulloa, C., Acevedo-Rodríguez, P., Beck, S.G., Belgrano, M.J., Bernal, R., Berry, P.E., Brako, L., Celis, M., Davidse, G., Gradstein, S.R., Hokche, O., León, B., León-Yáñez, S., Magill, R.E., Neill, D.A., Nee, M.H., Raven, P.H., Stimmel, H., Strong, M.T., Villaseñor Ríos, J.L., Zarucchi, J.L., Zuloaga, F.O., Jørgensen P.M.** (2017). An integrated assessment of vascular plants species of the Americas. *Science*. **358**: 1614-1617.
- Ule, E.** (1915). Melastomataceae. En R. Pilger (Ed.), *Plantau Uleanae*. *Notizbl.Königl. Bot. Gart. Berlin*. **60** (6): 348-368.
- Uribe, L.** (1964). *Sertula Florae Colombiae*, VII. *Caldasia*. **9** (41): 85-91.
- Uribe, L.** (1966). *Sertula Florae Colombiae*, IX. *Caldasia*. **9** (44): 295-301.
- Uribe, L.** (1969). *Sertula Florae Colombiae*, XI. *Caldasia*. **10** (48): 287-298.
- Uribe, L.** (1977). *Sertula Florae Colombiae*, XIV. *Caldasia*. **12** (56): 13-17.
- Wurdack, J.J.** (1973). Melastomataceae. En T. Lasser (Ed.), *Flora de Venezuela*, no. 8. (p. 1-819). Caracas, Venezuela: Instituto Botánico, Ministerios de Agricultura y Cría.
- Wurdack, J.J.** (1980). Melastomataceae. En G. Harling, B. Sparre y L. Andersson (Eds.), *Flora of Ecuador*, vol. 13 (1-406). Estocolmo, Suecia: University of Göteborg, Riksmuseum.

Artículo original

Diversidad de mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) en dos zonas del departamento del Vaupés, Colombia

Diversity of butterflies (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) in two areas of the department of Vaupés, Colombia

Paola Díaz-Urbina^{1,*}, M. Gonzalo Andrade-C.², Jesús Manuel Vásquez-Ramos³

¹ Grupo de investigación Biorinoquia, Programa de Biología, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia

² Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³ Grupo de Investigación Evaluación, Manejo y Conservación de Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros (GIREHPES), Departamento de Biología y Química, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia

Resumen

En algunos lugares de Colombia aún hay vacíos en cuanto al conocimiento de la fauna, específicamente de la diversidad lepidopterológica, debido a su lejanía y acceso limitado, como los resguardos indígenas de la región amazónica. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la diversidad de mariposas diurnas en dos zonas del departamento del Vaupés correspondientes a las comunidades indígenas de Puerto Inayá, Wasay, Puerto Paloma y Villa Fátima y en dos temporadas climáticas. Los muestreos se realizaron en la temporada de invierno, julio a septiembre del 2017, y en la de verano, enero a marzo del 2018. En cada comunidad los organismos se recolectaron durante cinco días entre las 7:00 y las 18:00 horas con jama y trampas van Someren Rydon (VSR) empleando dos tipos de cebo (fruta fermentada y pescado descompuesto) en lugares distribuidos verticalmente en tres estratos (sotobosque: 1m, estrato intermedio: 5m y dosel: 10m). Se registraron 2.199 ejemplares de 272 especies y 123 subespecies, 6 familias y 18 subfamilias, y se reportaron dos nuevos registros y tres ampliaciones de distribución en el país. Con el uso de red entomológica se registró el 76 % de la abundancia. La riqueza total estimada para el Vaupés se incrementó de 453 especies a 559 especies. A nivel espacial y temporal la composición de especies fue significativamente diferente en las cuatro comunidades y las dos temporadas, aunque se presentaron solapamientos, con varias especies compartidas.

Palabras claves: Lepidópteros diurnos; Diversidad; Amazonas; Mariposas de Colombia.

Abstract

There are still gaps in the knowledge of the fauna in some places in Colombia, particularly regarding the lepidopterological diversity in remote locations with limited access, such as the indigenous reserves of the Amazon region. In this context, our objective in this study was to characterize the diversity of diurnal butterflies in two areas of the department of Vaupés, which correspond to the indigenous communities of Puerto Inayá, Wasay, Puerto Paloma, and Villa Fátima, and in two weather seasons. We conducted samplings during the winter season from July to September 2017, and during the summer season from January to March 2018. In each community, we collected specimens for five days between 7:00 a.m. and 6:00 p.m. with butterfly nets and van Someren Rydon (VSR) traps using two types of bait (fermented fruit and decomposed fish) distributed vertically in three strata (understory [1m], intermediate stratum [5m], and canopy [10m]). We registered 2,199 specimens corresponding to 272 species and 123 subspecies, 6 families, and 18 subfamilies, and reported two new records and three distribution extensions for the country. With the entomological

Citación: Díaz-Urbina P, Andrade-C. MG, Vásquez-Ramos JM. Diversidad de mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) en dos zonas del departamento del Vaupés, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1175-1191, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1402>

Editor: Jairo Roa Rojas

***Correspondencia:**

Paola Díaz-Urbina;
paola.diazurbina@gmail.com

Recibido: 25 de febrero de 2021

Aceptado: 22 de noviembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

net, we registered 76% of the abundance. The total richness estimated for the Vaupés increased by 559 species and 233 subspecies. At the spatial and temporal level, the species composition was significantly different in the four communities and the two seasons, although there were overlaps since several species are shared.

Keywords: Diurnal lepidoptera; Amazon; Diversity; Butterflies of Colombia.

Introducción

El orden Lepidoptera es uno de los grupos de insectos más abundantes y diversos del Neotrópico. A nivel mundial hay 157.424 especies de mariposas y polillas descritas hasta el momento (Storck, 2018), y se estima que existe un mínimo de 255.000 (Heppner, 1998) y un máximo de 500.000 especies a nivel mundial (Kristensen, 1999; Kristensen, *et al.*, 2007; García-R, *et al.*, 2020). Colombia es uno de los cuatro países megadiversos del mundo y ocupa el segundo lugar en cuanto a riqueza de especies de mariposas. Aunque aún faltan por explorar algunas partes del territorio, se han registrado 3.274 especies, de las cuales 350 son endémicas (Andrade-C., 2011). En lo que se refiere a la región del Amazonas, hay registro de 1.228 especies y subspecies pertenecientes a las seis familias de mariposas de Hesperioidea y Papilionoidea (Andrade-C., *et al.*, 2015), y, específicamente en el Vaupés se reportan 453 especies (Fagua, 1996; Rodríguez & Miller, 2013; Henao-B & Díaz-U, 2021).

Algunos de los principales obstáculos para el desarrollo de estudios regionales en la Amazonía, especialmente en el departamento del Vaupés, han sido los cultivos ilícitos y el conflicto armado dentro del territorio, sobre todo en las áreas rurales donde la mayoría de la población es indígena (Zárate, 2014). Otro es la incomunicación entre sus municipios, comunidades y asentamientos indígenas, ya que la red fluvial es el único sistema de transporte y no es navegable en su totalidad debido a los continuos raudales o ‘cachiveras’ que se presentan en su recorrido, lo cual limita la navegabilidad de grandes embarcaciones (Salazar, *et al.*, 2006). Además, existen pocas vías de comunicación terrestre y actualmente solo está habilitado un trayecto de aproximadamente 50 kilómetros entre Mitú y Timbo (Gobernación del Vaupés, 2000).

Una de las actividades más representativas y más problemáticas de las comunidades indígenas y los colonos es la explotación e intervención de la selva para establecer zonas de cultivo llamadas “chagras”, destinadas a la obtención de alimento y vivienda. Dichas actividades se sitúan principalmente en las márgenes del río Vaupés y en afluentes como los ríos Querarí y Cuduyarí, así como a lo largo de la vía Mitú-Monfort hacia la frontera de Brasil (Viatela, *et al.*, 2000), en un proceso de extracción, tumba, transformación y cambios del uso del suelo que causa fragmentación de los hábitats y pérdida de la biodiversidad (Andrade-C., 2002; Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico-CDA, 2018), la cual es el sostén de una gran variedad de servicios ambientales, por lo que, al desestabilizarse o perder componentes, da lugar a un comportamiento caótico que afecta o amenaza dichos servicios (Andrade-C., 2011).

En este contexto, la caracterización de lepidópteros diurnos es necesaria para el registro de especies aún no descritas que pueden desaparecer, y con ellas, la posibilidad de conocer el papel ecológico que desempeñan (Gordon, 1985). Gracias a la facilidad de observación en campo, su alta fidelidad ecológica, la corta temporalidad generacional y la fragilidad ante las perturbaciones, estas especies se consideran indicadoras de la calidad del hábitat (Brown, 1991; Andrade-C., 1998). Por esta razón, su recolección, análisis y la determinación de su composición permiten la descripción de áreas de endemismo o de alta biodiversidad, la identificación de especies amenazadas y el establecimiento de prioridades de conservación (Valencia, *et al.*, 2005). El escaso número de estudios sobre lepidópteros y las grandes extensiones de bosque del departamento del Vaupés evidencian la poca información disponible (Andrade-C., *et al.*, 2015), lo que orientó en este estudio el planteamiento de las siguientes preguntas de investigación: ¿cuál es la diversidad de especies de mariposas en dos zonas del departamento del Vaupés? y, ¿varía la diversidad de lepidópteros diurnos entre la temporada de invierno y la de verano?

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el departamento del Vaupés, que se caracteriza por ser un sector de transición entre las llanuras secas de la Orinoquía y el bosque húmedo de la Amazonía colombiana (CDA, 2011). Tiene una extensión de 54.135 km², equivalente al 4,7 % del territorio continental colombiano y al 11,34 % de la región amazónica del país, siendo el cuarto departamento en extensión después de Amazonas, Caquetá y Guainía (Salazar-C., *et al.*, 2006). Su territorio está inmerso en su totalidad en la región amazónica y está dividido en tres municipios: Mitú (capital), Carurú y Taraira, y en tres áreas no municipalizadas: Pacoa, Papunaua y Yavaraté (Decreto 632 de 2018 del Ministerio del Interior). El clima es cálido, la temperatura fluctúa entre los 25 y 30 °C y la humedad relativa promedio es de 84 %; el periodo entre los meses de octubre y abril es de mayor temperatura, y el de menor temperatura entre los meses de mayo y septiembre (CDA, 2011).

Se escogieron dos zonas comunicadas fluvialmente por el río Vaupés: zona media y zona baja. La Amazonía colombiana no posee cambios altitudinales marcados y estas zonas están asociadas con el significado que los indígenas le otorgan al río. La zona baja corresponde al sector aguas abajo, es decir, el más cercano a Brasil, y la zona media al más cercano a la Orinoquía. En cada zona se seleccionaron dos comunidades indígenas: Wasay (01° 10' 30,50" N y 70° 36' 38,80 O) y Puerto Inayá (01° 07' 25,7" N y 70° 25' 49,6 O), separadas entre sí por 20 km en la zona media; y Villa Fátima (00° 58' 15,17" N y 69° 56' 59 O) y Puerto Paloma (01° 04' 08,58" N y 70° 03' 28,42 O), separadas entre sí por 40 km en la zona baja (Figura 1). En todas se realizó la consulta previa para obtener el permiso de investigación.

Recolección del material biológico

La recolección de los organismos se efectuó utilizando dos metodologías: red entomológica (jama, muestreo activo) y trampas Van Someren-Rydon (muestreo pasivo), según las descripciones de De Vries (1987) en los meses de julio a septiembre del 2017 (temporada de invierno) y de enero a marzo del 2018 (temporada de verano). En cada comunidad se situaron diez (10) trampas Van Someren-Rydon en el interior del bosque, en un transecto

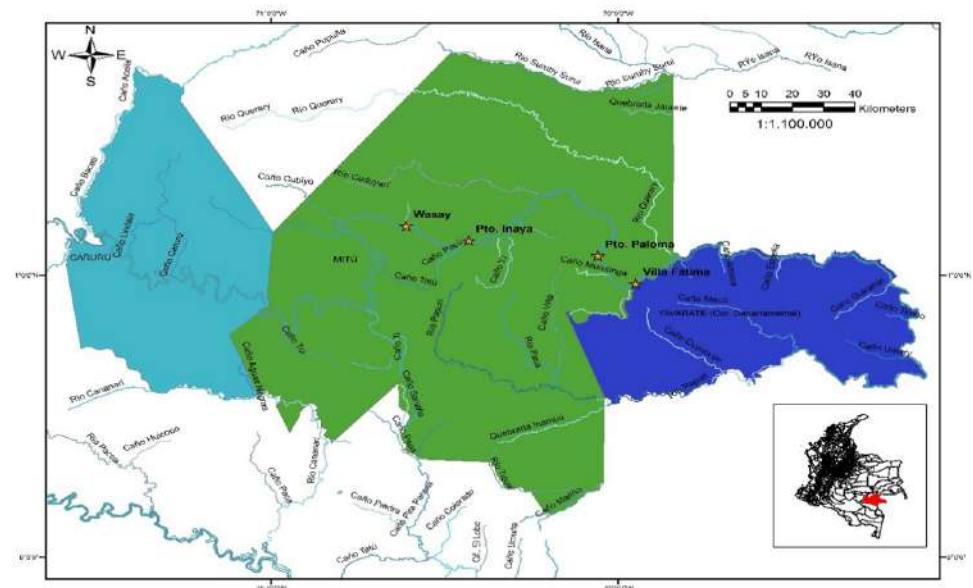


Figura 1. Mapa del departamento del Vaupés con las dos zonas de trabajo a lo largo del río Vaupés. Zona media: comunidades Wasay y Puerto Inayá. Zona baja: comunidades Puerto Paloma Villa Fátima

de 250 m, distribuidas linealmente cada 30 m y ubicadas en diferentes estratos: herbáceo (>0,3 m - <1,5 m), arbustivo (>1,5 - <6 m) y arbolitos (> 6 m - <12 m) (Prieto, 1995). Se emplearon cebos alternando banano fermentado y pescado podrido durante cinco días para un total de 90 horas/trampa por temporada en cada comunidad.

Para la recolección con red entomológica se establecieron transectos de longitud indefinida en los puntos óptimos de captura (Andrade, *et al.*, 2013) entre las 07:00 y las 18:00 con dos personas encargadas de la recolección para un total de 45 horas/red entomológica/hombre. Los ejemplares recolectados se sacrificaron usando la técnica de presión digital en el tórax, se depositaron en sobres triangulares de papel glassine blanco con la información de campo (zona, comunidad, estrato, entre otros), y luego se guardaron en recipientes herméticos de plástico con sílica gel para evitar el exceso de humedad y la aparición de hongos.

Métodos de laboratorio

Los individuos recolectados se trasladaron y depositaron en el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN) en Bogotá, D.C., y se dispusieron en cuarentena para evitar el ingreso de plagas a la colección. Posteriormente, se relajaron y ablandaron para su montaje en láminas de icopor (De Vries, *et al.*, 1997), se etiquetaron y se fotografiaron los ejemplares dorsal y ventralmente. El material se identificó con base en la literatura especializada: Vélez & Constantino (1989), Vélez & Salazar (1991), Fagua (1996), Le Crom, *et al.* (2002), Le Crom, *et al.* (2004), Pinzón (2009), Salazar, *et al.* (2010), Rodríguez & Miller (2013), Andrade, *et al.* (2015), y Andrade, *et al.* (2017), así como en la revisión de material digital en www.neotropicalbutterflies.com. Los ejemplares se compararon con los de la colección de referencia del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá (ICN-MHN-L) en consulta con especialistas.

Análisis de datos

Para estimar la diversidad asintótica en cada una de las comunidades (zona media: Puerto Inayá y Wasay; zona baja: Puerto Paloma y Villa Fátima) en las dos temporadas (invierno y verano), se empleó el estimador de riqueza $q=0$ propuesto por Chao & Jost (2012), calculado con el paquete *iNEXT* (*iN*terpolation and *EX*trapolation) (Hsieh, *et al.*, 2016). Para comparar la diversidad alfa en cada una de las comunidades y en ambas temporadas, se empleó el número de riqueza ($q=0$) de Hill (Jost, 2006; Moreno, *et al.*, 2011), con intervalos de confianza del 95 % obtenidos mediante el método *bootstrap* con 100 repeticiones y bajo la misma cobertura de muestreo (C_q). La riqueza (q_0) desestima la abundancia de las especies y permite determinar si existen diferencias significativas a partir de interpolaciones y extrapolaciones (Chao, *et al.*, 2014), para lo cual se empleó el paquete *iNEXT* (Hsieh, *et al.*, 2016). Este enfoque estandarizado permite la cuantificación y comparación de la riqueza entre ensamblajes aunque las muestras posean diferente tamaño (Moreno, *et al.*, 2011; Cultid-M & Escobar, 2019).

Para medir la diversidad beta (β), correspondiente al grado de diferenciación en la composición de especies (Whittaker, 1960) de mariposas, se empleó el paquete *betapart* (Baselga, A & Orme, 2012), el cual genera un valor de diversidad beta total (β_{BRAY}) compuesto por los componentes de variación balanceada de la abundancia ($\beta_{\text{BRAY,BAL}}$) y el gradiente de abundancia ($\beta_{\text{BRAY,GRA}}$) (Baselga, 2013) calculados a partir del índice de Bray-Curtis. La variación balanceada de la abundancia se presenta cuando hay cambios de la misma magnitud en la abundancia de las especies de un sitio a otro (Baselga, 2013), y el gradiente de abundancia cuando esta disminuye en las especies de un sitio a otro (Baselga, 2013; Calderón-Patrón & Moreno, 2019).

Como medida exploratoria para visualizar gráficamente el grado de similitud del ensamblaje de mariposas en las comunidades en cada temporada, se hizo un análisis de escalamiento multidimensional no paramétrico (NMDS) a partir del índice de similitud de Bray Curtis (Palacio, *et al.*, 2020). Con el fin de comprobar si la similitud de estos

ensamblajes difería significativamente entre comunidades, se hizo un análisis de similitudes (ANOSIM) utilizando las temporadas y las comunidades como factores (Clarke & Warwick, 2001). Todos los paquetes se ejecutaron en RStudio (RStudio Team, 2020).

Resultados

Se recolectaron 2.199 ejemplares de mariposas diurnas en las temporadas de invierno y verano distribuidos en seis familias, 18 subfamilias, 132 géneros, 272 especies y 123 subespecies (Figura 2a) (Tablas 1S, 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1402/3149>). Se presenta el primer registro en el país de *Battus crassus paraensis* K. Brown, 1994 y *Protesilaus telesilaus vitellus* (Fruhstorfer, 1907). Además, se amplió la distribución en el país de *Protesilaus telesilaus dolius* (Rothschild & Jordan, 1906), *Protesilaus protesilaus protesilaus* (Linnaeus, 1758), *Protesilaus aguiari* (R.F. d'Almeida, 1937) y *Eurytides dolicaon hebreus* K. Brown & Lamas, 1994.

De las 18 subfamilias encontradas, Satyrinae se destacó por su alta representatividad tanto por el número de especies (57; 21 %) como por el número de individuos (396; 18 %). Riodininae se destacó en cuanto al número de especies (37) y Coliadinae en cuanto a la abundancia (18,5 %). Las demás subfamilias registraron menor número de especies (desde 23 hasta una) y abundancias relativas entre 14,4 % (Nymphalinae) y 0,05 % (Apaturinae) (Figura 2). *Junonia* (7,37 %) y *Marpesia* (6,41 %) fueron los géneros más abundantes y *Aphrissa statira* la especie más representativa, con 262 individuos (11,91 %) (Figura 2b).

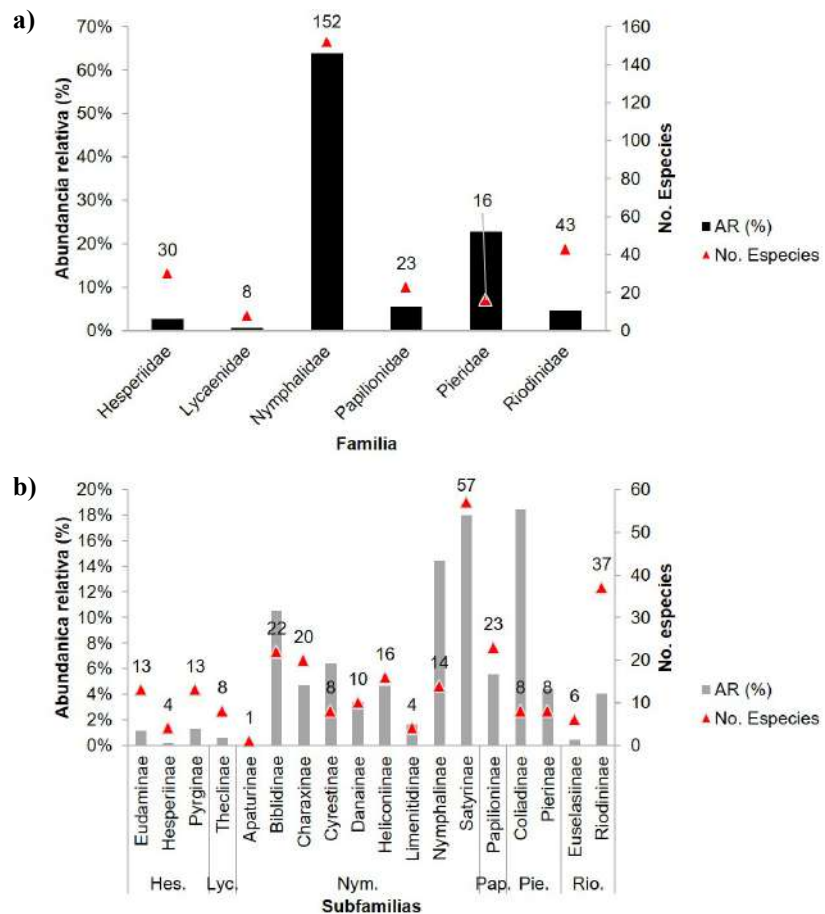


Figura 2. a. Abundancia relativa (% de individuos) y número de especies de las familias de mariposas en cuatro comunidades indígenas del departamento de Vaupés. **b.** Abundancia relativa (% de individuos) y número de especies de las subfamilias de mariposas registradas

Dimensión espacial

La mayor riqueza de especies se observó en la zona media. En la comunidad de Puerto Inayá (PI) se registraron 156 especies, de las cuales 50 son únicas (30 en invierno, 15 en verano y 5 en las dos temporadas), y en Wasay (W) 129 especies, de las cuales 33 son únicas (17 en invierno, 5 en verano y 3 en las dos temporadas). En la zona baja, en la comunidad de Puerto Paloma (PP) se contaron 116 especies, 33 de ellas exclusivas (20 en invierno, 9 en verano y 4 en las dos temporadas) y en Villa Fátima (V) 111 especies, 33 exclusivas (15 en invierno, 15 en verano y 3 en las dos temporadas) (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1402/3150>) (**Tabla 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1402/3149>).

En la comunidad indígena de Puerto Inayá, zona media, se recolectaron 724 ejemplares de mariposas diurnas distribuidas en 6 familias, 17 subfamilias, 82 géneros, 156 especies y 76 subespecies. Nymphalidae fue la más representativa, con 495 individuos (68,4 %) y 60,9 % de la riqueza con 95 especies, seguida por Pieridae, con 118 individuos (16,3 %), aunque con una riqueza del 9 % (14 especies). Las demás familias registraron abundancias inferiores al 7 % y una riqueza de entre 18 y 2 especies, siendo la más baja Lycaenidae. En la temporada de invierno se recolectaron 389 individuos de 6 familias, 17 subfamilias, 75 géneros, 116 especies y 60 subespecies. En la temporada de verano se recolectaron 335 individuos de 6 familias, 15 subfamilias, 57 géneros, 91 especies y 45 subespecies.

En la comunidad indígena de Puerto Wasay, zona media, se recolectaron 639 ejemplares de mariposas diurnas distribuidas en 6 familias, 16 subfamilias, 78 géneros, 129 especies y 63 subespecies. La familia más representativa, con 390 individuos (61 %) y 80 especies (62 %), fue Nymphalidae, seguida por Pieridae, con 163 individuos (25,5 %) y una riqueza de 10 especies (7,8 %). Las demás familias registraron abundancias inferiores a 7,2 % (46 individuos) y riquezas de entre 11 y 3 especies, siendo la más baja Lycaenidae (3 individuos y 3 especies). En la temporada de invierno se recolectaron 370 individuos de 6 familias, 15 subfamilias, 64 géneros, 95 especies y 49 subespecies. En la temporada de verano se recolectaron 269 individuos de 6 familias, 15 subfamilias, 54 géneros, 80 especies y 42 subespecies.

En la comunidad indígena de Puerto Paloma, zona baja, se recolectaron 396 ejemplares de mariposas diurnas distribuidas en 6 familias, 17 subfamilias, 77 géneros, 116 especies y 60 subespecies. Nymphalidae fue la familia más representativa, con 251 individuos (63,4 %) y una riqueza de 75 especies (64,7 %), seguida por Pieridae, con 96 individuos (24,2 %) y 7 especies registradas (6,3 %). Las demás familias registraron abundancias inferiores a 21 ejemplares (5,3 %) y una riqueza entre 9 y 1 especie, siendo Lycaenidae la más baja. En la temporada de invierno se recolectaron 268 individuos de 5 familias (Lycaenidae no se reportó), 16 subfamilias, 68 géneros, 95 especies y 53 subespecies. En la temporada de verano se recolectaron 128 individuos de 6 familias, 15 subfamilias, 41 géneros, 53 especies y 28 subespecies.

En la comunidad indígena de Villa Fátima, zona baja, se recolectaron 440 ejemplares de mariposas diurnas distribuidas en 6 familias, 17 subfamilias, 76 géneros, 111 especies y 50 subespecies. La familia más representativa, con 268 individuos (60,9 %) y 70 especies (63,1 %), fue Nymphalidae, seguida por Pieridae, con 125 individuos (28,4 %) y una riqueza de 7 especies (6,3 %). Las demás familias registraron abundancias inferiores a 19 ejemplares y una riqueza entre 11 y 3 especies; Papilionidae fue la familia con menor abundancia (0,9 %) y riqueza (2,7 %). En la temporada de invierno se recolectaron 298 individuos de 6 familias, 17 subfamilias, 65 géneros, 91 especies y 43 subespecies. En la temporada de verano se recolectaron 142 individuos de 5 familias (Papilionidae no se registró), 14 subfamilias, 42 géneros, 52 especies y 21 subespecies.

Dimensión temporal

En la temporada de invierno con las trampas Van-Someren Rydon se recolectaron 347 individuos correspondientes a 94 especies, y en la temporada de verano, 185 individuos pertenecientes a 76 especies.

En las trampas Van-Someren Rydon con cebo de fruta fermentada (banano) se registraron un total de 303 individuos representados en 89 especies (41 de ellas únicas), en tanto que en aquellas con cebo de pescado en descomposición se registraron 229 individuos representados en 91 especies (41 de ellas únicas). Por otra parte, con la jama se obtuvieron registros de todas las familias de mariposas, con 1.667 individuos que representaron el 76 % de la abundancia, y un total de 208 especies, especialmente aquellas que se alimentan de néctar en el bosque y complementan su dieta buscando en arena húmeda, charcos, orillas de río, heces de aves, orina, etc., por lo que se pudieron atrapar a diferentes alturas (0-2 m.).

Diversidad asintótica estimada

La diversidad asintótica estimada a nivel espacial permitió evidenciar que en la comunidad de Puerto Inayá (65 %) se registró el mayor esfuerzo de muestreo, en tanto que en Puerto Paloma (58 %), Villa Fátima (57 %) y Wasay (47 %) este fue menor (<60 %) (**Figura 3a**). A nivel temporal, tanto en verano (67 %) como en invierno (65 %) se registró un esfuerzo de muestreo similar pero inferior al 70 % (**Figura 3b**).

Diversidad alfa y beta

En cuanto a la diversidad estimada en número efectivo de especies (q_0 , cobertura de muestreo: 0,87) a nivel espacial y en invierno (**Figura 4a**), no se evidenciaron diferencias significativas entre las comunidades de Puerto Inayá (la más rica y abundante), Wasay y Villa Fátima, en tanto que sí la hubo entre las comunidades de Puerto Paloma y Wasay. Asimismo, la diversidad estimada en número efectivo de especies (q_0 , cobertura de

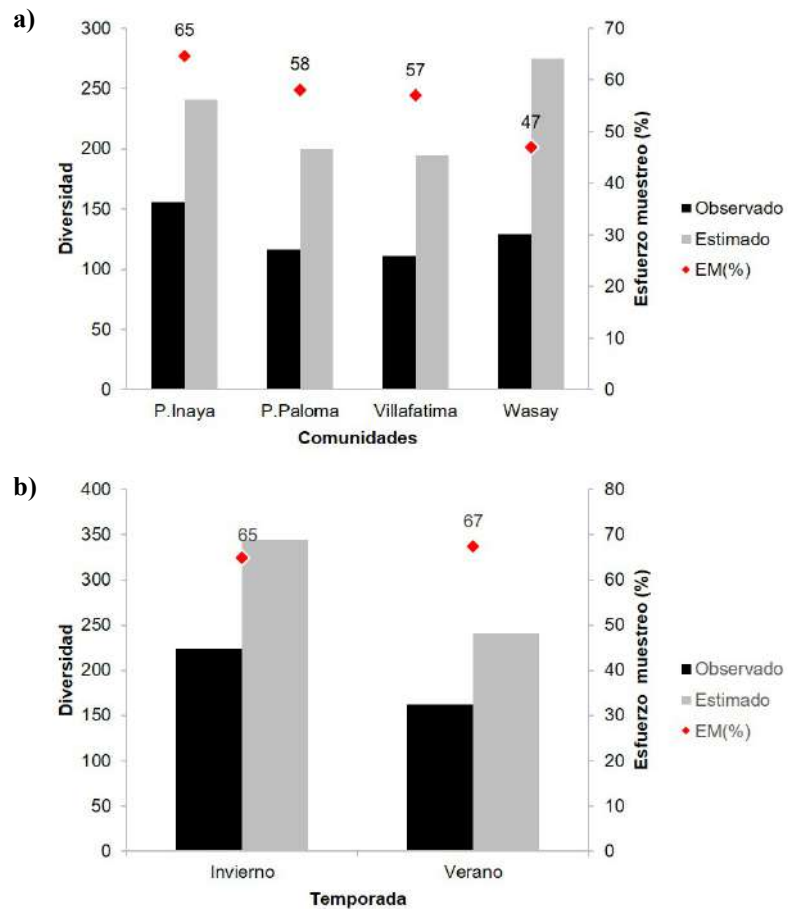


Figura 3. Diversidad asintótica estimada ($q=0$) a nivel espacial (**a**) y temporal (**b**) de mariposas diurnas en cuatro comunidades indígenas del departamento del Vaupés. EM (%): esfuerzo de muestreo

muestreo: 0,89) a nivel espacial en la temporada de verano (**Figura 4b**), permitió observar que la riqueza (q_0) fue significativamente mayor en las comunidades de Puerto Inayá y Wasay en comparación con Puerto Paloma y Villa Fátima. Por otro lado, en cuanto a la diversidad estimada en número efectivo de especies (q_0 , cobertura de muestreo: 0,96) a nivel temporal, se evidenció una diferencia significativa entre las temporadas, siendo la de invierno en la que se registró el mayor número efectivo de especies (**Figura 4c**).

A nivel temporal la diversidad beta total fue mayor en verano ($\beta_{BRAY}=0,75$) que en invierno ($\beta_{BRAY}=0,65$), y la variación balanceada de la abundancia fue la principal responsable de la diversidad beta total tanto en verano ($\beta_{BRAY,BAL}=0,66$; 88 %) como en invierno ($\beta_{BRAY,BAL}=0,60$; 68 %). Así, la diversidad beta pareada en verano permitió evidenciar que Villa Fátima fue la comunidad más disímil (0,6) en comparación con el grupo formado por las otras tres comunidades (disimilitud $<0,45$), siendo Puerto Inayá y Puerto Paloma las comunidades más similares entre sí (0,6) (**Figura 5a**). En invierno, la disimilitud entre las comunidades estuvo alrededor de 0,45, y las comunidades más similares entre sí fueron Wasay y Villa Fátima (**Figura 5b**).

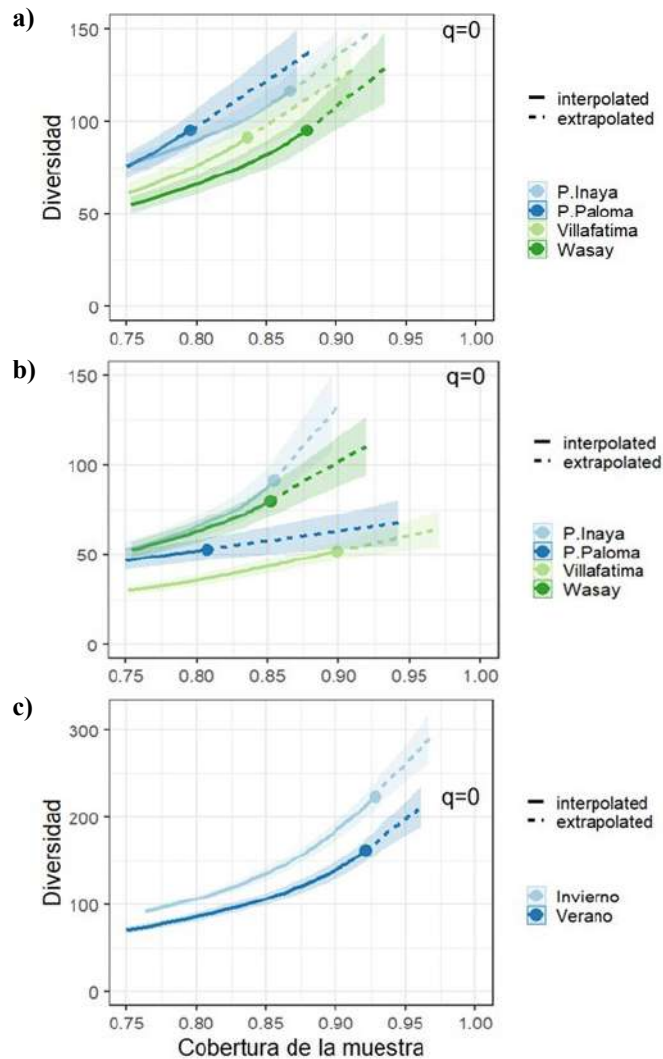


Figura 4. Curvas de rarefacción y extrapolación de mariposas basadas en la cobertura de muestreo a nivel temporal (a) y espacial en invierno (b) y verano (c) para los números de Hill de orden ($q=0$). Diversidad rarefaccionada (líneas continuas) y extrapolada (líneas discontinuas, hasta el doble del tamaño de la muestra referenciada). Las muestras de referencia se muestran mediante puntos sólidos.

A nivel espacial, en general la composición de especies fue significativamente diferente en las cuatro comunidades, aunque con algún solapamiento (NMDS estrés= 0,18; ANOSIM: R=0,394; p=0,001) (**Figura 6a**). A nivel temporal, el ensamblaje fue significativamente diferente en invierno y en verano, aunque esta diferencia fue baja (NMDS: stress=0,1864677; ANOSIM: R=0,094; p=0,007) (**Figura 6b**).

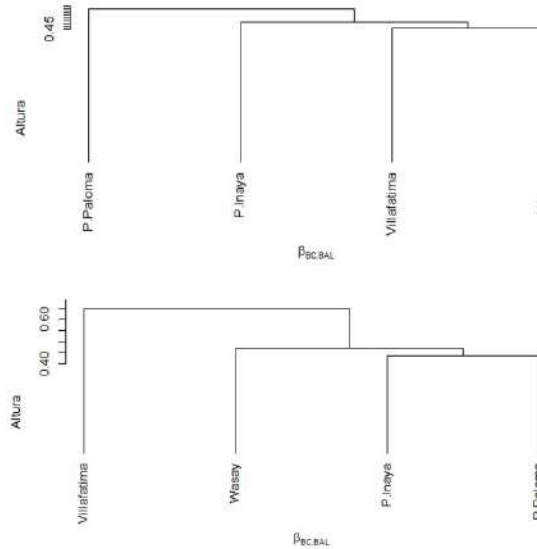


Figura 5. Diagrama de agrupamiento de la diversidad beta de mariposas en: **a.** temporada de invierno y **b.** temporada de verano en cuatro comunidades indígenas en el departamento del Vaupés

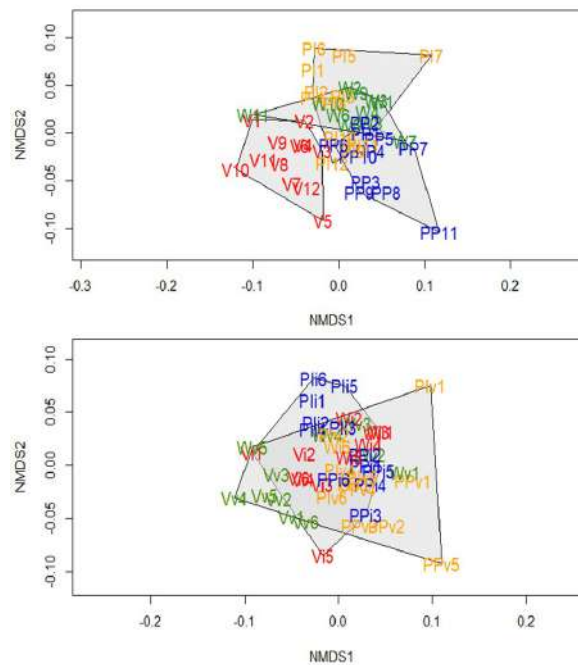


Figura 6. a. Diagrama NMDS basado en la composición de especies en cuatro comunidades indígenas del departamento del Vaupés (PI: Puerto Inaya, PP: Puerto Paloma, V: Villa Fátima y W: Wasay). **b.** Diagrama NMDS basado en la composición de especies en cuatro comunidades indígenas del departamento del Vaupés en las temporadas de invierno y verano (PI: Puerto Inaya, PP: Puerto Paloma, V: Villa Fátima y W: Wasay)

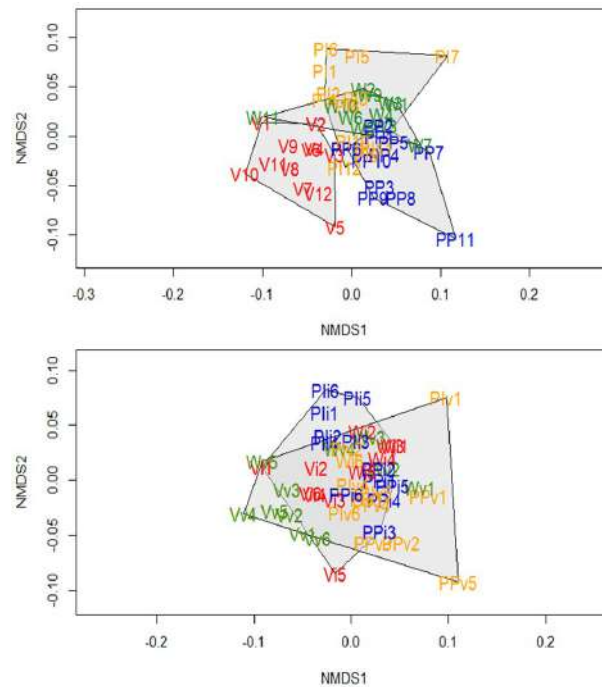


Figura 7. Diagrama NMDS basado en la composición de especies en cuatro comunidades indígenas del departamento del Vaupés en: **a.** temporada de invierno y **b.** temporada de verano (PI: Puerto Inayá, PP: Puerto Paloma, V: Villa Fátima y W: Wasay)

La composición de especies en la temporada de invierno fue diferente a nivel espacial. Se observaron dos grupos significativamente diferentes (NMDS stress=0,1627732; ANOSIM: $R=0,543$; $p=0,001$): uno compuesto por las comunidades de Wasay y Puerto Inayá y otro por Puerto Paloma y Villa Fátima (**Figura 7a**). Por otra parte, en la temporada de verano la composición de especies, aunque fue significativamente diferente, presentó un solapamiento entre las comunidades, evidenciándose dos grupos: uno conformado por las comunidades de Puerto Inayá, Wasay y Puerto Paloma, y el otro por Villa Fátima, la cual apareció alejada (NMDS stress=0,1108962; ANOSIM: $R=0,448$; $p=0,001$) (**Figura 7b**).

Discusión

Las 272 especies registradas representan el 8,31 % de la riqueza lepidopterológica del país (3.274 especies) (**Andrade-C.**, 2011). En el presente estudio, centrado en la variación espacio-temporal y de distribución vertical (utilizando como cebo fruta fermentada y pescado descompuesto), se registraron 106 especies y 62 subespecies de lepidópteros diurnos adicionales a las registradas anteriormente en la región. **Fagua** (1996) reportó 112 especies en la Serranía de Taraira; **Rodríguez & Miller** (2013) reportaron 312 especies (sin incluir HesperIIDae) en las áreas adyacentes a Mitú (Vaupés), y **Henao-B & Díaz-U** (2021) registraron 159 especies en la expedición Bio Apaporis 2018.

Además, se amplió el inventario de riqueza de lepidópteros diurnos al registrar por primera vez en el país *Battus crassus paraensis* K. Brown, 1994 (reportada únicamente en Belém de Pará en Brasil) y *Protesilaus telesilaus vitellus* (Fruhstorfer, 1907) (reportada únicamente en el sureste de Brasil) (**Warren, et al.**, 2016). Asimismo, se registró la ampliación de la distribución de *Protesilaus telesilaus dolius* (Rothschild & Jordan, 1906), que se había reportado en las zonas de la costa Pacífica y el Magdalena; de *Protesilaus protesilaus protesilaus* (Linnaeus, 1758), registrada en el Meta, Amazonas y Caquetá, y de *Eurytides dolicaon hebreus* K. Brown & Lamas, 1994, reportada en la Sierra Nevada de Santa Marta y el norte de Colombia (**Lecrom, et al.**, 2002).

La familia Nymphalidae registró la mayor riqueza y abundancia de mariposas, lo que coincide con la mayoría de estudios realizados en Colombia (**Andrade & Gantiva**, 2019; **Andrade & Henao**, 2017; **Andrade, et al.**, 2015; **Rodríguez & Miller**, 2013; **Fagua**, 1996, entre otros), en los que se da cuenta que este grupo está representado en un gran porcentaje por subfamilias y especies que han logrado colonizar diversos ecosistemas terrestres debido a sus hábitos generalistas y su fácil adaptación a diferentes ambientes (**DeVries**, 1987, **Ríos-M & Vélez**, 2018). Entre las especies más abundantes de esta familia se encontraron *Hermeuptychia hermes*, *Taygetis thamyra*, *Pareuptychia ocirrhoe* y *Morpho helenor* (subfamilia Satyrinae), la mayoría de ellas asociadas con el sotobosque, ya que vuelan a ras del suelo, en zonas abiertas y sobre hojarasca, y se alimentan de frutas, hongos de descomposición y carroña, y muy pocas de néctar de flores, tal como lo han indicado **DeVries** (2000), **Valencia, et al.** (2005) y **Ríos-M & Vélez** (2018), entre otros. También fueron abundantes *Junonia evarete*, *Colobura dirce*, *Historis odius* y *Baeotus beotus*, de la subfamilia Nymphalinae, que se caracterizan por alimentarse de néctar, frutas fermentadas, carroña, estiércol y exudados de árboles (**DeVries**, 2000; **Valencia-C., et al.**, 2005; **Ríos-M & Vélez**, 2018), y se registran con mayor frecuencia en áreas abiertas, bordes de bosque, sitios sombríos, bosques húmedos tropicales y, algunos grupos, en la copa de los árboles (**DeVries**, 2000).

Por otra parte, la familia Pieridae, muy frecuente en áreas abiertas (**DeVries**, 2001; **Lecrom, et al.**, 2004), registró la mayor abundancia, aunque no la mayor riqueza, y estuvo representada por *Aphrissa statira* (subfamilia Coliadinae). Estas mariposas se encontraron congregadas en las playas de arena húmeda a orillas del río libando los minerales disueltos del agua, tal como lo han registrado otros autores (**DeVries**, 2000; **Valencia, et al.**, 2005).

En contraste, la familia Lycaenidae (Theclinae) registró la menor abundancia (13 individuos representados principalmente por *Arawacus aetolus*) y la menor riqueza (8 especies), como ya lo había registrado **Fagua** (1996), quien encontró tan solo cuatro especies. Sin embargo, **Pinzón** (2006), **Rodríguez & Miller** (2013) y **Henao-B & Díaz-U** (2021) han registrado entre 15 y 18 especies en la Amazonía colombiana. Es importante señalar que estos ejemplares presentan una estacionalidad marcada y se observan más frecuentemente en la transición entre invierno y verano (**Campos-Salazar, et al.**, 2011), y no resulta fácil atraerlos con cebos, pues muchas especies vuelan en estratos altos y se posan en la copa de los árboles (**Prieto & Dahners**, 2009), lo cual podría explicar el bajo número de registros en el presente estudio.

A nivel espacial, en la zona media (comunidades de Puerto Inayá y Wasay) la lepidopterofauna estuvo bien representada tanto en abundancia como riqueza, posiblemente porque estas presentan un mayor nivel de conservación, pues tienen pocos habitantes, hay árboles grandes con un dosel más cerrado, y mejores recursos de plantas hospederas y alimenticias; además, solo hay una vía de acceso a través del río Vaupés. En la zona baja (comunidades de Puerto Paloma y Villa Fátima), el nivel de conservación es menor, las vías de acceso son más fáciles (carretera o río), hay más viviendas y mayor número de habitantes, más áreas intervenidas con perturbaciones en sus alrededores (quema y tala de árboles), además de un dosel menos cerrado y de baja altura. Sin embargo, se requerirían estudios a mayor escala espacial para determinar cómo la variación de estas características podría explicar la estructuración del ensamblaje de lepidópteros en la Amazonía colombiana. La diversidad beta total tanto en invierno como en verano fue mayor a 65 %, determinada principalmente por la variación balanceada de la abundancia, lo que indica que las especies están asociadas a microhábitats específicos que ofrece la disposición espacial de cada comunidad indígena, lo que respondería a la oferta de plantas hospederas, periodos de fructificación y floración vegetal, estratificación vertical del bosque, y ciclos de vida, entre otros (**DeVries, et al.**, 1997; **DeVries & Walla**, 2001; **Freitas, et al.**, 2021). Se registraron entre 50 y 33 especies únicas a nivel espacial, lo que probablemente obedece a que la planta nutricia de sus orugas está en un lugar específico y las hembras permanecen allí donde se halla la planta nutricia en la que pueden poner sus huevos y garantizar el desarrollo de las larvas. Por otra parte, los machos tienen una distribución más amplia, pues están buscando

las hembras de su especie para poder copular con ellas. Esto necesariamente conlleva que en estudios posteriores se realice una caracterización vegetal para establecer las diferencias en la composición vegetal en cada una de estas comunidades.

A nivel temporal la riqueza y abundancia de mariposas fue mucho mayor en invierno que en verano. Algunos estudios realizados en el trópico han registrado mayor riqueza de mariposas al inicio y al final de la temporada de lluvias (**DeVries & Walla, 2001; Checa, et al., 2019**), donde la disponibilidad de vegetación (hojas, tejidos vegetales nuevos) y de recursos puede ser mucho más alta y estimula la actividad y la reproducción en los insectos (**Kishimoto-Yamada & Itioka, 2015**). Lo contrario puede suceder en la temporada de verano, cuando los recursos alimenticios varían y el pico floral se reduce, lo que conlleva la disminución de la riqueza y la abundancia de especies (**Brown Jr. & Freitas, 2000**). Todo ello genera ensamblajes de mariposas dinámicos en los que se pueden registrar especies abundantes y comunes en un año y especies raras e imposibles de registrar y ubicar en otros (**DeVries & Walla, 2001**). Además, varias especies de mariposas migran en las diferentes estaciones o temporadas (**DeVries, 1987**) y ello podría contribuir al aumento de la abundancia en momentos específicos del año; por ejemplo, durante la temporada de lluvias en este estudio *Battus crassus paraensis* K. Brown, 1994 y *Protesilaus telesilaus vitellus* (**Fruhstorfer, 1907**) se registraron por primera vez en Colombia, siendo originalmente de Brasil.

La red entomológica (jama) en conjunto con las trampas Van Someren Rydon y cebo de fruta fermentada y pescado descompuesto se complementaron de manera exitosa para incrementar el registro local de especies. Con la jama se registró la mayor abundancia y riqueza de mariposas, especialmente de aquellas que obtienen su alimento de diferentes maneras: nectarívoras (flores), hidrófilas (arena húmeda, charcos, etc.) y acimófagas (frutas en descomposición, carroña, excretas), aunque varias de las especies capturadas pueden ubicarse en diferentes categorías (**Andrade-C., 1998, Checa, et al., 2019**). También se registraron en diferentes microhábitats, como orillas de río, playa, bosque, pastizal, entre otros, en tanto que con las trampas se capturaron especies generalmente asociadas al dosel (**DeVries & Walla, 2001**) y otras difíciles de atrapar con la jama (subfamilias Charaxinae, Nymphalinae y Satyrinae) debido a su rapidez y vuelo alto (**Freitas, et al., 2014**).

En el presente estudio se registró una gran riqueza de especies de Riodinidae, Hesperidae, Nymphalidae, Papilionidae, Pieridae y Lycaenidae, a diferencia de lo reportado por **DeVries (1988), DeVries, et al. (2001, 2012)** y **Lorenço, et al. (2019)** en los bosques tropicales de Costa Rica, Ecuador y Brasil, lo que probablemente se deba a que se enfocaron en grupos específicos de Nymphalidae usando únicamente trampas VSR y banano fermentado como cebo, en tanto que en este trabajo se emplearon dos técnicas de muestreo (jama y VSR), y dos tipos de cebo (banano fermentado y pescado descompuesto). **Checa, et al. (2019)** obtuvieron resultados similares al registrar la mayor riqueza en la temporada de invierno con el uso de jama, aunque el cebo más efectivo fue camarón descompuesto y en nuestro estudio el banano fermentado. Por otra parte, en trabajos desarrollados en el Vaupés por **Fagua (1996), Rodríguez & Miller (2013)** y **Henao-B & Díaz-U (2021)** con el uso de jama y TVSR y pescado o camarón descompuesto y fruta fermentada de cebo, se registró Nymphalidae como el grupo más diverso, así como las demás familias reportadas aquí, excepto Hesperidae (**Rodríguez & Miller, 2013**).

A nivel espacial y temporal, la composición de especies fue significativamente diferente en las cuatro comunidades y las dos temporadas, aunque se presentó el solapamiento de varias especies. Esta diferenciación podría deberse a que en la zona media las comunidades de Puerto Inayá (80 km aprox.) y Wasay (60 km aprox.) están aisladas del casco urbano de Mitú, siendo el único medio de acceso el río Vaupés (3 a 4 horas en canoa con motor Yamaha 15 HP) y el número de familias es pequeño (14 y 28 familias, respectivamente), en tanto que en la zona baja las comunidades de Puerto Paloma (32 km aprox.) y Villa Fátima (40 km aprox) (13 y 60 familias, respectivamente) al estar más cerca al casco urbano de Mitú, son de más fácil acceso por carretera (abierto), por río (1-2 horas en canoa con motor Yamaha 15 HP) o avioneta (7 minutos). Por otra parte, la similitud en

la composición de especies de lepidópteros en las cuatro comunidades podría explicarse por sus características comunes, pues las chagras tienen una gran diversidad de plantas como yuca brava (*Manihot sculentum*), yuca dulce (*Manihot dulcis*), piña (*Ananas* spp), lulo (*Solanum* spp), ñame (*Dioscorea bulbifera*), batata (*Ipomoea batata*), ají (*Capsicum* spp), coca (*Erythroxylum coca*), caruru (*Phytolaca rivinioides*), plátano (*Musa* spp), maíz (*Zea mays*), caña (*Saccharum* sp), pupuña (*Bactris gasipaes*), uva caimaronera (*Pourouma cecropiaceae*), guamos (*Inga* spp), caimos (*Crysophyllum auratum*), y umarí (*Paraqueiba sericea*), entre otras (Giraldo & Yunda, 2000). Asimismo, los bosques adenaños a estas comunidades se caracterizan por una flora variada y diversa que es aprovechada como alimento, medicina, madera, artesanías, látex, fibras, aceites o con fines ornamentales (CDA, 2018). Entre las especies que se hallan en la selva densa de gran porte y de uso maderable se podrían mencionar el arenillo (*Simarouba amara*), el loiro (*Nectandra* sp), el acaricuara (*Minuartia guianensis*), el arrayán (*Eugenia* sp), el wacapu (*Brosimum* sp), el caraná (*Mauritia arana*), el mirapiranga (*Brosimum brasiliensis*), y el bejuco yaré (*Heteropsis jenmanii*), entre otras (CDA, 2018; Giraldo & Yunda, 2000).

Conclusiones

Se recolectaron y analizaron 2.199 ejemplares de mariposas diurnas pertenecientes a 272 especies y 123 subespecies, de las cuales 106 especies y 62 subespecies son nuevos registros en el Vaupés. Así, la riqueza total en el departamento se incrementó a 559 especies y 233 subespecies. Además, se generaron dos nuevos registros (*Battus crassus paraensis*, *Protesilaus telesilaus vitellus*) y tres ampliaciones de distribución (*Protesilaus telesilaus dolius*, *Protesilaus protesilaus protesilaus*, *Eurytides dolicaon hebreus*) en Colombia.

A nivel espacial las comunidades de Puerto Inayá y Wasay fueron las que registraron mayor número de especies e individuos, en contraste con la zona baja, representada por las comunidades de Puerto Paloma y Villa Fátima, que registraron menor riqueza y abundancia probablemente debido a las diferencias en el acceso a las comunidades y la transformación del bosque, determinantes en la variación de la composición y riqueza a nivel espacial.

La temporada de lluvia registró mayor abundancia y riqueza de especies en contraste con la de verano, situación que podría deberse a factores ambientales que varían según la época del año en la región amazónica y la fuerte relación que existe entre la distribución y la abundancia de las plantas nutricias y hospederas y el ciclo de vida de las mariposas.

Agradecimientos

A las comunidades indígenas de Puerto Inayá, Wasay, Puerto Paloma y Villa Fátima, a las personas que nos brindaron su apoyo e hicieron posible el éxito del estudio, en especial aquellas que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos, a cada niño que nos brindó una sonrisa y su compañía en los recorridos. A la Fundación Ceiba, Mitú (Vaupés) por la beca de joven investigador cuyos recursos permitieron la adquisición de las herramientas necesarias para el estudio. A Efraín Henao, Carlos Gantiva y Paola Triviño por su ayuda en la identificación taxonómica de algunos grupos. Al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional en Bogotá, por su incondicional ayuda.

Información suplementaria

Figura 1S. Número de individuos, géneros, especies y subespecies de mariposas por familia en cuatro comunidades indígenas del departamento del Vaupés. Ver figura 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1402/3150>

Tabla 1S. Número de géneros, especies y subespecies de mariposas por familia y subfamilia en cuatro comunidades indígenas del departamento del Vaupés. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1402/3149>

Tabla 2S. Listado de familias, subfamilias, especies y subespecies recolectadas en cuatro comunidades del departamento del Vaupés en verano e invierno. Ver tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1402/3149>

Tabla 3S. Especies de mariposas por comunidades (P. Inayá, P. Paloma, Villafatima y Wasay) tanto en temporada de invierno (Inv) como en temporada de verano. Ver tabla 3S en <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1402/3149>

Contribuciones de los autores

YPDU y MGAC: formulación del proyecto, determinación taxonómica, análisis de datos y redacción del manuscrito; JMVR: formulación del proyecto, análisis de datos y redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

Ninguno para declarar

Referencias

- Andrade-C., M.G.** (1990). Clave para las familias y subfamilias de Lepidoptera: Rhopalocera de Colombia. *Caldasia*. **16** (177): 197-200.
- Andrade-C., M.G.** (1998). Utilización de las mariposas como bioindicadoras del tipo de hábitat y su biodiversidad en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **22** (84): 407-421.
- Andrade-C., M.G.** (2002). Biodiversidad de las mariposas (Lepidoptera: Rhopalocera) de Colombia. En: Costa, C., Vanin, S., Lobo, M. y Melic, A. (Eds), Proyecto de Red Iberoamericana de Biogeografía y Entomología Sistemática (pp.153-172). , Zaragoza, España: Sociedad Entomológica Aragonesa.
- Andrade-C., M.G.** (2009). Informe del inventario de mariposas: expedición a Yaigojé Apaporis. Departamentos de Vaupés y Amazonas. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Informe inédito.
- Andrade-C., M.G.** (2011). Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ciencia-política. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **35** (137): 491-507.
- Andrade-C., M.G., Henao-Bañol, ER., Triviño, P.** (2013). Técnicas y procesamiento para la recolección, preservación y montaje de Mariposas en estudios de biodiversidad y conservación. (Lepidoptera: Hesperioidea- Papilionoidea) *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **37** (144): 311-325.
- Andrade-C., M.G., Henao-Bañol, ER., Salazar, JA.** (2015). Las mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea – Papilionoidea) de la Región Amazónica colombiana. *Revista Colombia Amazónica*. **8** (1): 93-122.
- Andrade-C., M.G. & Henao-Bañol, E.R.** (2017). Mariposas diurnas (Hesperioidea, Papilionoidea) en el parque Nacional Natural Serranía del Chiribiquete. *Colombia Amazónica*. **10** (1): 191-204
- Andrade-C., M.G. & Gantiva, C.** (2019). Mariposas. En Trujillo, F. y Anzola, F. (Eds), Biodiversidad en el departamento de Arauca (pp.108-130). Bogotá, Colombia: Gobernación de Arauca, Fundación Omacha y Fundación Ecollano.
- Baselga, A. & Orme, C. D. L.** (2012). betapart: an R package for the study of beta diversity. *Methods Ecol Evol*. **3**: 808-812.
- Baselga, A.** (2013). Separating the two components of abundance-based dissimilarity: balanced changes in abundance vs. abundance gradients. *Methods in Ecology and Evolution*. **4** (6): 552-557.
- Baselga, A.** (2013). Multiple site dissimilarity quantifies compositional heterogeneity among several sites, while average pairwise dissimilarity may be misleading. *Ecography*. **36**: 124-128.
- Brown, KS Jr.** (1991). Conservation of Neotropical environments: insects as indicators. In: Collins NM, Thomas JA eds. The conservation of insects and their habitats. London: Academic Press, 449-504.
- Brown Jr., K.S. & Freitas, A.V.L.** (2000). Atlantic forest butterflies: indicators for landscape conservation. *Biotropica*. **32**: 934-956.
- Calderón-Patrón, J. & Moreno, C.** (2019). Diversidad beta como disimilitud: su partición en componentes de recambio y diferencias en riqueza. En C. Moreno (Ed.). *La Biodiversidad en un mundo cambiante: fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio* (pp. 203-222). Hidalgo, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

- Campos-Salazar, L.R., J. Gómez Bulla, M. Gonzalo-Andrade-C.** (2011). Mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea - Papilionoidea) de las áreas circundantes a las Ciénagas del Departamento de Córdoba, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **35** (134): 45-60. ISSN 0370-3908.
- Clarke, K. R., & Warwick, R. M.** (2001). A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Marine ecology Progress series*, **216**: 265-278.
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico - CDA.** (2018). Plan de acción para el control de la deforestación, sentencia 4360 de 2018, Corte suprema de Justicia. <https://cda.gov.co/apc-aa-files/62333031323138353938373665323335/plan-de-accion-para-el-control-de-la-deforestacion-sentencia-4360-de-2018..pdf>
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico - CDA.** (2011). Plan de Gestión Ambiental Regional, PGAR. 2012-2023. <https://cda.gov.co/es/plan-de-gestion-ambiental>
- Chao, A. & Jost, L.** (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*. **93** (12): 2533-2547. Doi: 10.1890/11-1952.1
- Chao, A., Gotelli, N. J., Hsieh, T. C., Sander, E. L., Ma, K. H., Colwell, R. K., Ellison, A. M.** (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological monographs*. **84** (1): 45-67.
- Checa, M. F., Donoso, D. A., Rodriguez, J., Levy, E., Warren, A., Willmott, K.** (2019). Combining sampling techniques aids monitoring of tropical butterflies. *Insect Conservation and Diversity*. **12** (4): 362-372.
- Cultid-Medina, C. & Escobar, F.** (2019). Pautas para la estimación y comparación estadística de la diversidad biológica (°D). En: Moreno CE (Ed). *La biodiversidad en un mundo cambiante: fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/ Libermex, Ciudad de México, pp. 175-202.
- DeVries, P. J.** (1987). The butterflies of Costa Rica and their natural history: Papilionidae, Pieridae, and Nymphalidae. New Jersey, Estados Unidos: Princeton University Press, Princeton. 327 p.
- DeVries, P.J.** (1988). Stratification of fruit-feeding nymphalid butterflies in a Costa Rican rainforest. *Biol J Linn Soc.* **26**: 98-108.
- DeVries P.J., Murray, D., Lande, R.** (1997). Species diversity in vertical, horizontal, and temporal dimensions of a fruit-feeding butterfly community in an Ecuadorian rainforest. *Biological Journal of the Linnean Society*. **62**: 343-364.
- DeVries, P.J.** (2000). Diversity of Butterflies. En: S. Levin (Ed.). *Enciclopedia de Biodiversidad*. Prensa académica, San Diego, p. 559-574.
- Devries, P.J. & Walla, T. R.** (2001). Species diversity and community structure in Neotropical fruit-feeding butterflies. *Biological journal of the Linnean Society*. **74** (1): 1-15.
- DeVries, P.J., Alexander, L. G., Chacon, I. A., Fordyce, J. A.** (2012). Similarity and difference among rainforest fruit-feeding butterfly communities in Central and South America. *Journal of Animal Ecology*. **81** (2): 472-482.
- Fagua, G.** (1996). Comunidad de mariposas y arthropofauna asociada con el suelo de tres tipos de vegetación de la serranía de Taraira (Vaupés, Colombia). Una prueba del uso de mariposas como bioindicadores. *Revista Colombiana de Entomología*. **22** (3): 143-152.
- Freitas, A. V., Agra Iserhard, C., Pereira Santos, J., Oliveira Carreira, J. Y., Bandini Ribeiro, D., Alves Melo, D. H., Rosa, A. H., Marini-Filho, O.J., Mattos Accacio, G. y Uehara-Prado, M.** (2014). Studies with butterfly bait traps: an overview. *Revista Colombiana de Entomología*. **40** (2): 203-212.
- Freitas, A. V., Santos, J. P., Rosa, A. H., Iserhard, C. A., Richter, A., Siewert, R. R., Gueratto, P.E., Oliveira Carreira, J.Y., Lourenço, G.M.** (2021). Sampling Methods for Butterflies (Lepidoptera). En: Santos, J y Fernandes, G. (Eds), *Measuring Arthropod Biodiversity* (pp. 101-123). Cham, Suiza: Springer Nature.
- García-Robledo, C., Kuprewicz, E.K., Baer, C.S., Clifton, E., Hernández, G.G., Wagner, D.L.** (2020). La ecuación de Erwin de la biodiversidad: de pequeños pasos a saltos cuánticos en el descubrimiento de la diversidad de insectos tropicales. *Biotropica*. **52** (4): 590-597.
- Giraldo, J. H. & Yunda, M. C.** (2000). La chagra indígena y biodiversidad: sistema de producción sostenible de las comunidades indígenas del Vaupés. *Cuadernos de desarrollo rural*. **44**: 43-52.
- Gobernación del Vaupés.** (2000). Plan de desarrollo departamental de Vaupés 2001-2003, "Pensando en la Gente". Mitú. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/131/7860-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gordon, R.** (1985). La taxonomía de insectos: su importancia y perspectivas. *Memorias XII Congreso Sociedad Colombiana de Entomología-SOCOLEN-*. Medellín, Colombia.

- Henao-Bañol, ER y Díaz-Urbina, P.** (2021). Mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) de la Expedición Colombia Bio-Apaporis 2018. *Boletín Científico Centro De Museos De Historia Natural*. **25** (1): 106-123.
- Heppner, J. B.** (1998). Classification of Lepidoptera, Part 1. Introduction. *Holarctic Lepidoptera*: **5** (1): 1-148.
- Hsieh, T. C., Ma, K. H., Chao, A.** (2016). iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*. **7** (12): 1451-1456
- Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos*. **113** (2): 363-375. Doi: 10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x
- Kishimoto-Yamada, K. & Itioka, T.** (2015). How much have we learned about seasonality in tropical insect abundance since Wolda (1988)? *Entomol Sci*. **18**: 407-419.
- Kristensen, N.P.** (1999). The Non-Glossatan Moths, p.41-49. In: Kristensen, N.P. (ed.). *Lepidoptera, Moths and Butterflies. Volume 1: Evolution, Systematics, and Biogeography. Handbook of Zoology. Band/Volume IV Arthropoda: Insecta, Part 35.* Berlin, Walter de Gruyter, 491 p.
- Kristensen, N.P., Scoble, M.J., Karsholt, O.** (2007). Lepidoptera phylogeny and systematics: the state of inventorying moth and butterfly diversity. *Zootaxa*. **1668**: 699-747.
- Le Crom, J.F., Constantino, L.M., Salazar, J.A., Llorente, J., Constantino, L., Salazar, J.A.** (2002). *Mariposas de Colombia. Tomo I: Papilionidae.* Carlec Ltda, Bogotá, p. 108.
- Le Crom, J. F., Llorente, J., Constantino, L. M., Salazar, J. A.** (2004). *Mariposas de Colombia, Tomo 2. Pieridae.* Carlec Ltda., Colombia, Bogotá. p. 133.
- Lourenço, G. M., Luna, P., Guevara, R., Dáttilo, W., Freitas, A. V. L., & Ribeiro, S. P.** (2020). Temporal shifts in butterfly diversity: responses to natural and anthropic forest transitions. *Journal of Insect Conservation*. **24** (2): 353-363.
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E., Pavón, N. P.** (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista mexicana de biodiversidad*. **82** (4): 1249-1261.
- Palacio, F. X., Apodaca, M. J., Crisci, J. V.** (2020). *Análisis multivariado para datos biológicos. Teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R.* 271 p. Buenos Aires, Argentina. Vazquez Mazzini editores.
- Pinzón, J.** (2009). *Mariposas de Bajo Rio Caquetá y Apaporis (Amazonia colombiana).* Conservación Internacional Colombia. Fecha de acceso: 18 de octubre de 2017. Disponible en: <https://fieldguides.fieldmuseum.org/guides/guide/225>
- Prieto, A., Churio, J. O. R., Rudas, A., & Palacios, P.** (1995). Aspectos estructurales y tipos de vegetación de la Isla Mocagua, Río Amazonas. *Caldasia*. **17** (82-85): 463-480.
- Prieto, C., & Dahners, H. W.** (2009). Resource utilization and environmental and spatio-temporal overlap of a hilltopping Lycaenid butterfly community in the Colombian Andes. *Journal of Insect Science*. **9** (1).
- Ríos-Malaver, C. & Vélez-Estrada, J.** (2018). *Mariposas de Colombia.* (pp. 566). Colombia. Editorial Villegas y Editores.
- Rodríguez, G. & Miller, H.** (2013). Inventario preliminar de los Rhopalocera de Mitú Vaupés, Colombia (Insecta: Lepidoptera). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*. **17** (1): 196-218.
- RStudio Team** (2020). *RStudio: Integrated Development for R.* RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>
- Salazar C., Gutiérrez, C.A., Franz, R., Franco, A., Martín.** (2006). Vaupés: Entre la colonización y las fronteras. Carlos Ariel Salazar C, Franz Gutiérrez R., Martín Franco A. Bogotá, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi. p. 134.
- Salazar, J.A., Vargas, J.I., Mora, A.M., Benavides, J.** (2010). Identificación preliminar de los Rhopalocera que habitan el Centro Experimental Amazónico (CEA), Mocoa-Putumayo, y algunas especies aptas para criar en cautiverio (Ins. Lep.). *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U.de Caldas*. **14** (1): 150-188.
- Stork, N. E.** (2018). How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on Earth? *Annual Review of Entomology*. **63**: 31-45. Doi: 10.1146/annurev-ento-020117-043348
- Valencia, C., Gil, Z., Constantino, L.M.** (2005). *Mariposas diurnas de la zona central cafetera de Colombia. Cenicafé, Chinchiná, Colombia.* p. 244.
- Vélez, J.A. & Constantino, E.** (1989). *El encanto de las mariposas de Colombia.* Bogotá, RenaSer. 64 pp.

-
- Vélez, J.A. & Salazar, J.A.** (1991). Mariposas de Colombia. Villegas Editores, Bogotá. 167 pp.
- Viatela, J. H. G. & Romero, M. C. Y.** (2000). La chagra indígena y biodiversidad: sistema de producción sostenible de las comunidades indígenas del Vaupés (Colombia). Cuadernos de Desarrollo Rural. **44**: 43-52.
- Warren, A. D., Davis, K. J., Stangeland, E. M., Pelham, J. P., Willmott, K. R., Grishin, N.V.** (2016). Illustrated Lists of American Butterflies. <http://www.butterfliesofamerica.com/>
- Whittaker, R. H.** (1960). Vegetation of the Siskiyou mountains, Oregon and California. Ecological monographs. **30** (3): 279-338.
- Zárate-Botía, C.G.** (2014). Plan estratégico departamental de ciencia, tecnología e innovación – PEDCTI Departamento del Vaupés / Carlos G. Zárate Botía, Juan Carlos Peña Márquez – Mitú: Gobernación del Vaupés; Universidad Nacional de Colombia, Sede Amazonia. Instituto Amazónico de Investigaciones – IMANI.

Ensayo

Consideraciones en torno al primer artículo impreso sobre la geografía de las plantas de Alexander von Humboldt, publicado en La Habana en mayo de 1804

Considerations on the first printed article on the geography of plants by Alexander von Humboldt, published in Havana in May 1804

 Alberto Gómez-Gutiérrez

Instituto de Genética Humana, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

Alexander von Humboldt ha sido considerado por muchos como el pionero de la biogeografía, y la obra que lo ha situado en el imaginario popular como el primer biogeógrafo fue publicada por primera vez entre 1805 y 1807 en París, con el título *Essai sur la géographie des plantes*. El miércoles 2 de mayo de 1804 apareció un breve aviso en un periódico de La Habana, Cuba, bajo el título: “Geografía física. Ideas sobre el límite inferior de la nieve perpetua, y sobre la geografía de las plantas: por el Señor Barón de Humboldt, traducidas del francés al español por A. R.”. Este artículo incluía una sección final sobre los límites de la nieve y la vegetación, y constituiría la primera referencia de Humboldt a la geografía de las plantas impresa en América.

Palabras clave: Biogeografía; Geografía física; Cordillera de los Andes; La Habana; Alexander von Humboldt.

Abstract

Alexander von Humboldt has been considered by many as the pioneer of biogeography, and the work that has placed him in the popular imagination as the first biogeographer was first published between 1805 and 1807 in Paris, under the title *Essai sur la géographie des plantes*. On Wednesday 2 May 1804, a short notice appeared in a newspaper in Havana, Cuba, as: “Physical geography. Ideas on the lower limit of the perpetual snow, and on the geography of plants: by Mr. Baron de Humboldt, translated from French into Spanish by A. R.” (in Spanish). This article included a final section on the limits of snow and vegetation and would constitute Humboldt’s first reference to the geography of plants printed in America.

Keywords: Biogeography; Physical geography; Andean Cordillera; Havana; Alexander von Humboldt.

Introducción

Alexander von Humboldt (1769-1859) ha sido considerado por muchos como el pionero de la biogeografía. La obra que lo ha situado como uno de los primeros biogeógrafos fue publicada por primera vez en París, entre 1805 y 1807,¹ con el título *Essai sur la géographie des plantes*. En esta, el prusiano reconoce en su prefacio algunos momentos preliminares decisivos de su descubrimiento como asociados a Georg Forster (1754-1794),

Citación: Gómez-Gutiérrez A. Consideraciones en torno al primer artículo impreso sobre la geografía de las plantas de Alexander von Humboldt, publicado en La Habana en mayo de 1804. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1192-1204, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1583>

Editor: Elizabeth castañeda

Correspondencia:
Alberto Gómez-Gutiérrez;
alberto.gomez.gutierrez@gmail.com

Recibido: 21 de octubre de 2021

Aceptado: 3 de diciembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

¹ Es posible que los ejemplares con fecha 1805 fueran producidos de manera preliminar (como fascículos iniciales) en la casa Levrault, Schoell et Compagnie, sin haber integrado aún la totalidad de la obra, y en particular el *Tableau physique* del que no cabe duda fue elaborado en su versión definitiva en 1807 para la casa de F. Schoell.

a quien habría comunicado “el primer esbozo de una Geografía de las Plantas”² (**Humboldt & Bonpland**, [1805]1807, p. VI) desde 1790, seguido de Augustin de Candolle (1778-1841) y Louis-François Ramond de Carbonnières (1755-1827), que le proporcionaron “material interesante sobre la geografía de las plantas de los Altos Alpes [y] sobre la flora de los Pirineos” (**Humboldt & Bonpland**, [1805]1807, p. IX); Humboldt cita también la influencia de su amigo y maestro Carl Ludwig Willdenow (1765-1812) en el Jardín Botánico de Berlín.

Además de Forster y Willdenow en su propia patria, se debe considerar la influencia de Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) en la representación estética de las ideas biogeográficas de Humboldt. En efecto, Goethe, a quien Humboldt visitó al menos dos veces antes de viajar a América, ya había publicado una obra de referencia sobre la filosofía natural y la botánica: el *Intento de explicar la metamorfosis de las plantas* (1790). La vinculación de Humboldt con Goethe en este terreno es clara, y una prueba post-americana muy significativa de esta coincidencia es que Goethe, al recibir el ejemplar impreso de *Ideen zu eine Geographie der Pflanzen* (1807), la versión en alemán del *Essai* que el propio Humboldt le había dedicado, elaboró y correspondió a su autor una versión alternativa de la *Naturgemälde* o *Tableau physique* centrado en el Chimborazo, comparando la geografía de Europa con la de América (**Figuras 1 y 2**).

En 1806, en una carta a la cuñada de Friedrich Schiller, Caroline von Wolzogen (1763-1847), Humboldt dejó constancia clara y concisa de la influencia de Goethe en su percepción y representación de la naturaleza:

En las selvas del Amazonas, como en las cumbres de los Andes, tuve la sensación de que la vida misma se infiltraba en las rocas, las plantas y los animales, así como en el amplio pecho de la humanidad, como animada de polo a polo por un único espíritu. En todas partes sentí profundamente la poderosa influencia que tenían ahora esas relaciones forjadas en Jena, y – gracias a la perspectiva de Goethe sobre la naturaleza– adquirí prácticamente nuevos órganos de percepción (**Humboldt**, 1806, en **Buttimer**, 2012, párrafo 27).



Figura 1. Johann Wolfgang von Goethe. *Principales alturas de los dos continentes*

² Esta afirmación de Humboldt es dudosa. Forster publicó en tres partes el libro del viaje con Humboldt con el título *Vistas del Bajo Rin, desde Brabante, Flandes, Holanda, Inglaterra y Francia, en abril, mayo y junio de 1790*, en el cual solo menciona una vez a su compañero Humboldt, pero sin relación con la geografía de las plantas (Comunicación personal de Darío Valencia Restrepo).

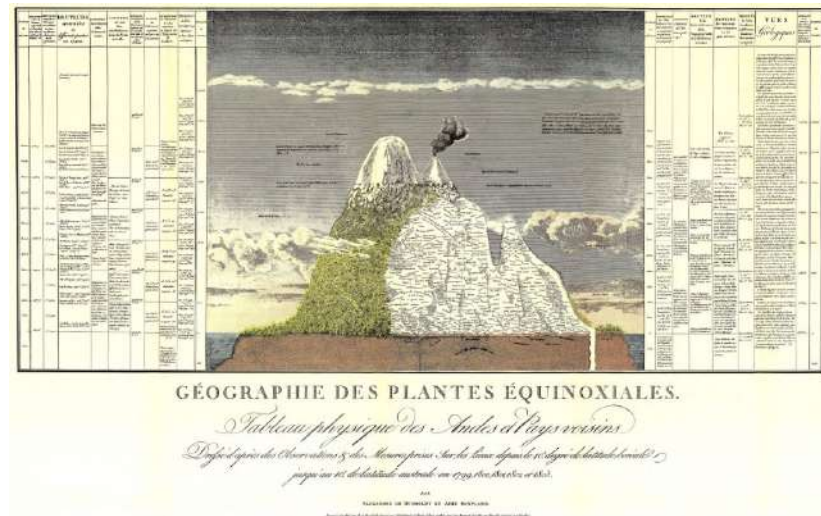


Figura 2. Alexander von Humboldt. *Geografía de las plantas equinocciales* ([1805]1807)

Una percepción a la vez estética y científica, que se puede apreciar bien en su *Tableau physique*.

Otro precursor alemán, fundamental para la biogeografía humboldtiana, es August Wilhelm von Zimmermann (1743-1815), con su *Specimen zoologiae geographicae quadrupedum* (1777) también mencionado explícitamente por Humboldt en su *Essai* de 1807:

La obra clásica del Sr. Zimmerman indica la patria de los animales, según la diferencia de las alturas que habitan. Sería interesante fijar en un perfil las diferentes alturas a las que se elevan bajo una misma latitud (**Humboldt & Bonpland** [1805]1807, pp. 138-139).

El primer borrador manuscrito del *Essai sur la géographie des plantes*

Un manuscrito preliminar, y un dibujo coloreado con el eje del volcán nevado Chimborazo diseñado en Guayaquil por Humboldt, fueron dedicados y enviados desde ese mismo puerto a José Celestino Mutis (1732-1808) en febrero de 1803. En este texto, la obra de Zimmermann sobre biogeografía aparece ya como una referencia clave:

Esta escala de animales es un fragmento de un mapa similar al que representa los vegetales de los Andes, y forma parte de una obra que completará la excelente *Geographia animalium*, publicada por el señor Zimmerman (**Humboldt**, 1803, en **Gómez**, 2018, tomo II, p. 137).

A raíz de una referencia de Francisco José de Caldas (1768-1816), incluida en su *Memoria sobre el plan de un viaje de Quito a la América septentrional*, elaborada en Quito entre el 21 de abril y el 6 de mayo de 1802, y remitida por correo a José Celestino Mutis en Santafé de Bogotá, se puede deducir que Humboldt ya le había comunicado personalmente a Caldas la obra de Zimmermann sobre zoogeografía, puesto que el payanés afirma en la sección “Zoología” de su Memoria que:

El señor Barón me ha dicho que un sabio, cuyo nombre no tengo en mente, ha comenzado a trabajar en este asunto: sus observaciones, sus ideas perfeccionarían las nuestras, y nuestros trabajos serían apreciados como los primeros de esta especie en América (**Caldas**, 1802, en **Posada**, 1912, p. 75).

Esta referencia explícita de Caldas a un trabajo biogeográfico centrado en la distribución de los animales revela claramente que trató con el prusiano sobre este tema durante su convivencia en Quito en el primer semestre de 1802. Sin embargo, en medio de todas las referencias explícitas de Humboldt a trabajos biogeográficos anteriores o simultáneos en Estados Unidos y Europa, Caldas está llamativamente ausente. El astrónomo e historiador Jorge Arias de Greiff, registró su apreciación personal sobre esta obliteración histórica:

Y, para concluir, una sospecha. Cuando el flamante prusiano retornó a Europa, lo primero que hizo fue publicar su trabajo “Ideas sobre la geografía de las plantas”. ¿Por qué ese afán antes de realizar el trabajo de preparar sus manuscritos, en ocasiones con consulta o encargándole el asunto a otros investigadores como Oltman[n]s para la astronomía y Kuhn para la botánica? (Arias de Greiff, 2016, pp. 100-101).

Humboldt, por alguna razón, quiso contar con Mutis como par-evaluador, enviándole su primer manuscrito y diseño gráfico sobre la geografía de las plantas, dejando de lado a Caldas en el proceso de elaboración de la teoría cuyo primer manuscrito sería redactado en febrero de 1803, a la espera de la salida del barco que llevaría la expedición del prusiano a Acapulco (Gómez, 2016).

El propio Humboldt se refirió a ese momento en su *Essai*:

Dibujé este Cuadro por primera vez en el puerto de Guayaquil, en febrero de 1803, cuando regresaba de Lima por el Mar del Sur, y cuando me preparaba para navegar hacia Acapulco. Envié una copia de este primer boceto al señor Mutis en Santa Fe de Bogotá, quien me honra con una particular amabilidad. Nadie estaba en mejores condiciones que él para pronunciarse sobre la exactitud de mis observaciones, y para ampliarlas con las suyas propias obtenidas a lo largo de 40 años de viajes por el Reino de la Nueva Granada [...] Ningún otro botánico tuvo más oportunidades de hacer³ observaciones importantes sobre la geografía de las plantas, pues durante la recolección de éstas hizo siempre mediciones altimétricas y ha subido muchas veces a las altas cumbres de las cordilleras [...] (Humboldt & Bonpland [1805]1807, pp. 44-45).

En otro manuscrito original asociado a esta obra, conservado en la Biblioteca Central del Musée National d'Histoire Naturelle en París, con varias correcciones de Humboldt en los márgenes, se puede observar que el prusiano elogió algo más a Mutis: después de afirmar que “nadie estaba en mejor posición que él para juzgar la exactitud de mis observaciones, y para ampliarlas con sus propias observaciones obtenidas en el espacio de 40 años de viajes en el reino de la Nueva Granada”, Humboldt incluyó una frase muy significativa:

Este gran botánico que, a pesar de su distancia de la Europa, siguió los progresos de nuestra física [combinando los vastos conocimientos de un naturalista con los de un distinguido geómetra], el señor Mutis [...] (Humboldt, 1805/1806, f. 3).⁴

Pero esta frase aparece tachada en este manuscrito y fue eliminada de la versión definitiva publicada simultáneamente en París y Tübingen. Sólo la botánica debía asociarse a Mutis, nada de “geometría distinguida”, ni de geografía, en la mente de su coetáneo: Mutis, en fin, no fue exaltado como uno de los precursores aceptados en el campo de la biogeografía por Humboldt⁵. La “geografía” de las plantas tenía que ser introducida como un asunto original, en el que sólo tuvieron cabida algunos precursores elegidos en Europa y Norteamérica.

³ Humboldt implica aquí que Mutis no asoció las mediciones de altitud con la geografía de las plantas que colectaba.

⁴ Traducido del francés por el autor. La frase subrayada fue tachada en el manuscrito original.

⁵ En las anotaciones en su *Diario* sobre su encuentro con Mutis de 1801, Humboldt deja en claro que sí ha tratado con un “geómetra distinguido”, al menos comparado con él mismo, cuyos conocimientos matemáticos eran entonces insuficientes, por ejemplo, para aprovechar la lectura de la *Mecánica* de Laplace como él habría querido (ver carta de Humboldt a Delambre en Lima en 1802, agradeciendo el envío de un ejemplar de la obra). Varias afirmaciones en el obituario del *Diccionario* de Michaud (1843, vol. 29, pp. 658-662) confirman que esta primera apreciación de Humboldt sobre Mutis se mantuvo con el paso de los años. Humboldt escribe: “antes de dedicarse inicialmente con disgusto a la medicina, Mutis se había ocupado con ardor al estudio de las matemáticas; como profesor de matemáticas del colegio del Rosario divulgó por primera vez en Santafé las tesis copernicanas; como astrónomo hizo observaciones de las ocultaciones de los satélites de Júpiter y organizó la construcción de un observatorio con una dotación de instrumentos; en meteorología destaca su trabajo sobre las causas de las mareas atmosféricas y los cambios del barómetro durante la noche y respecto a la Luna; como físico destaca sus mediciones termo barométricas de altura y los cambios en la vegetación en función de la misma”; en el dominio de la geografía de las plantas se reduce a comentar que Mutis “había tratado de conocer los límites más o menos estrechos que encierran a diferentes especies de cinchona sobre la pendiente de las montañas” (Arboleda, 2021). Debe considerarse detenidamente el que la carta a Delambre sobre sus limitaciones con respecto a la *Mecánica* de Laplace, es precisamente la misma escrita en la que Humboldt hace una relación de sus trabajos en el dominio de la geografía de las plantas (Arboleda, 2020).

Tampoco se menciona a Caldas como “distinguido geómetra”, aunque haya sido alabado como tal en esos días por el prusiano, según afirmó el payanés en carta fechada en Quito el 22 de enero de 1802 y dirigida a Santiago Arroyo (1773-1845):

Llegamos a Ibarra, comimos con [Humboldt, quien] se dirigió públicamente a mí y me dijo: “He visto sus preciosos trabajos en astronomía y geografía. Me los han enseñado en Popayán. He visto las alturas correspondientes tomadas con tal precisión que la mayor diferencia no es más de cuatro segundos” (Caldas, 1802, en Bateman & Arias, 1978, 130-131).

Pero volvamos a Mutis: para agradecer todas sus atenciones, y con el propósito de exaltarlo, Humboldt le dedicó esta primera versión de su *Essai* en Guayaquil, según consta en su subtítulo original publicado en español por Caldas en la página 121 de la edición del 23 de abril del *Semanario del Nuevo Reyno de Granada* (1809): “dedicado con la más profunda gratitud al ilustre Patriarca de los Botánicos, Don José Celestino Mutis, por Federico Alexandro Barón Humboldt” (Figura 3). Pero esta inscripción sería efímera, y los “sentimientos del más profundo reconocimiento” se desvanecerían del corazón de Humboldt en su viaje transatlántico de regreso a Europa, puesto que la primera edición impresa del *Essai* en Francia, en 1807, sería finalmente dedicada a los botánicos Antoine-Laurent de Jussieu (1748-1836) y René Desfontaines (1750-1833), y su primera edición alemana, como dije ya, a Johann Wolfgang von Goethe (Figura 4). Mutis sería finalmente exaltado frente a la comunidad internacional en una obra alterna de taxonomía botánica titulada *Plantæ æquinoctiales* y cuyo primer volumen fue publicado en 1808, el año de su muerte (Figura 5).

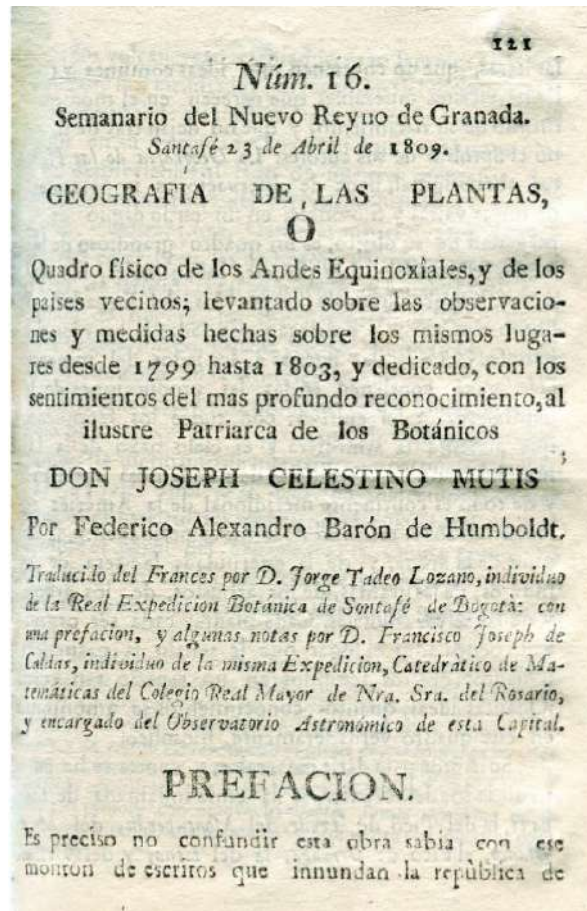


Figura 3. Dedicatoria a José Celestino Mutis en la primera versión del *Essai sur la géographie des plantes* (1803)



Figura 4. Dedicatorias a Jussieu y Desfontaines en la versión francesa, y a Goethe en la versión alemana del *Essai sur la géographie des plantes* (1807)

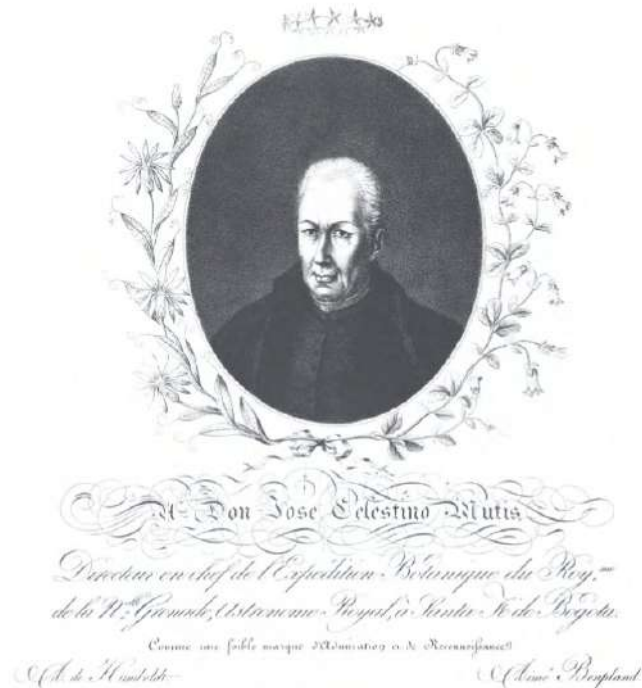


Figura 5. Dedicatoria a José Celestino Mutis en la obra *Plantae æquinoctiales* (1808)

Apuntes manuscritos de Alexander von Humboldt sobre la geografía de las plantas: 1801-1804

El primer borrador manuscrito de su *Essai sur la géographie des plantes* fue resultado de sus propias percepciones en los Andes, tanto como de conversaciones con ilustrados neogranadinos, incluyendo naturalmente a Mutis y a Caldas, a partir de 1801. Estas observaciones están debidamente anotadas en sus diarios manuscritos mientras viajaba por el Río Magdalena hacia Santafé de Bogotá, y luego de allí hacia Popayán y Quito en el sur de la

Nueva Granada a través de dos cadenas de la cordillera. En efecto, gracias a un riguroso trabajo de inspección de los diarios en Berlín, el historiador Ulrich Paessler ha podido registrar al menos 31 entradas relativas a la geografía de las plantas, distribuidas así: 11 en el volumen VII a/b (tramo Río Magdalena-Quito), y 20 en el volumen VII bb/c (tramo Almaguer, Cuenca, Pasto, Quito y alrededores), ambos en los años 1801 y 1802.

Una vez llegado a Acapulco, Humboldt continuó con sus elaboraciones sobre la geografía de las plantas, como puede verse en las sucesivas anotaciones de sus diarios manuscritos. Sin embargo, que sepamos, ninguna de estas concreciones e hipótesis manuscritas fue publicada entre los meses de marzo de 1803 y marzo de 1804, durante su estancia en la Nueva España, hoy México.

Cuando regresaba a Europa en los primeros meses de 1804, Humboldt volvió a Cuba antes de dirigirse a los Estados Unidos, donde conoció a Thomas Jefferson (1743-1826) y a varios miembros de la American Philosophical Society.⁶

Allí publicó una nota en tercera persona sobre su propio viaje entre 1799 y 1804, escrita en francés y traducida al inglés por John Vaughan (1756-1841), bajo el título “Travels of Baron Humboldt” en la edición de julio de *The Litterary Magazine and American Register* de Filadelfia (**Figura 6**). A pesar de la existencia previa del texto que fue publicado en Cuba dos meses antes (en mayo de 1804), el artículo de prensa norteamericano ha sido considerado usualmente como el primer reporte impreso sobre la biogeografía publicado en América;⁷ sin embargo, el artículo norteamericano sólo incluyó tres breves referencias a la geografía de algunas plantas en los siguientes términos, todas ellas sobre los Andes suramericanos:

[...] Desde Honda, nuestros viajeros ascendieron a través de bosques de robles, de melastomo (sic), y de quina (el árbol que proporciona la corteza peruana), hasta Santa Fe de Bogotá, capital del reino de Nueva Granada, situada en una fina llanura, elevada 1360 toesas (de seis pies franceses) sobre el nivel del mar [...].

En este tiempo, a pesar de que la estación de las lluvias había comenzado, emprendieron el viaje a Quito, y pasaron los Andes de Quindiu, que son montañas nevadas cubiertas de palmeras de cera (*palmiers a cire*), con passe flores (flor de la pasión) del crecimiento de los árboles, *storax*, y *bambusa* (bambú) [...].

El deseo de comparar las cortezas (cinchona) descubiertas por el Sr. Mutis, en Santa fe de Bagota (sic), y con las de Popayán, y la cuspa y cuspare de Nueva Andalucía, y del río Caroni (llamado falsamente *Cortex Augustura*), con las cinchonas de Loxa y Perú, los llevó a desviar su ruta [...] (**Humboldt**, 1804a, pp. 323-325).

En esta misma publicación, se encuentra una carta de Humboldt a Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822), astrónomo y matemático francés, miembro de la Académie des Sciences, y a partir de 1804 director del Observatorio Astronómico de París. En esta epístola, firmada en Lima el 25 de noviembre de 1802, Humboldt le anuncia a este astrónomo (no botánico) su intención explícita de hacer un trabajo sobre esta materia sin mencionar aún el *Tableau Physique*, infografía que estaba por eclosionar una vez se decantadas sus ideas dispersas en el puerto marítimo de Guayaquil, en donde los Andes se habían visto ya con suficiente perspectiva:

⁶ Al investigar las fuentes primarias asociadas con la visita de Humboldt a Thomas Jefferson a mediados de 1804, la historiadora Sandra Rebok encontró en el archivo del presidente una edición impresa de la *Aurora* de mayo 2 (copia conservada en la biblioteca William L. Clements de la Universidad de Michigan, signatura C1814Pe). Al respecto anotó que “aunque el contenido de este texto no estaba relacionado con el interés del Presidente en cuanto a la información geopolítica de su invitado, sí contribuyó a que se familiarizara con la obra científica de Humboldt y, en particular, con su pensamiento específico sobre la naturaleza, un tema de gran interés para el Presidente. Dada su fecha de publicación, Humboldt no pudo llevarse consigo cuando abandonó La Habana y no se sabe con certeza cuándo y a través de qué canales llegó a manos de Jefferson. Sin embargo, sabemos que el virginiano sí poseía su propio ejemplar de este panfleto y que añadió unas notas en la primera página que hacían referencia a la obra de Humboldt sobre Nueva España, [publicada por primera vez en París en 1811, lo cual] indica que este comentario es posterior a 1804” (**Rebok**, 2021).

⁷ Este relato del viaje americano de Humboldt sería reproducido en 14 gacetas norteamericanas y en 9 periódicos europeos entre 1804 y 1805 (**Lubrich et al.**, 2021, **Material Suplementario 2**, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/consideraciones-en-torno-al-primer-articulo-impreso-sobre-la-geo/3181>).

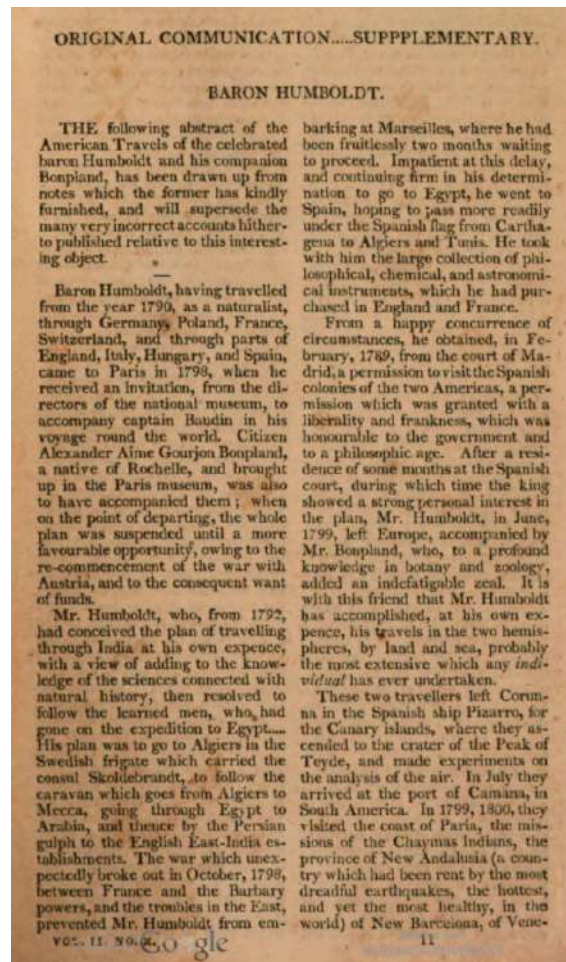


Figura 6. “Travels of Baron Humboldt”. *The Litterary Magazine and American Register* (1804)

Tenemos hoy 3784 descripciones muy completas en latín y cerca de 1/3 de plantas en los herbarios que por falta de tiempo no hemos podido describir. No hay vegetal del cual no podamos indicar la roca sobre la que habita y la altura en toesas a la que se eleva, de suerte que la geografía de las plantas encontrará en nuestros manuscritos materiales muy exactos (Humboldt [1802]1804, p. 211, traducida del inglés al español por el autor del presente artículo).

La primera nota impresa explícita de Alexander von Humboldt sobre la geografía de las plantas

El miércoles 2 de mayo de 1804 apareció un breve artículo en un periódico de La Habana, bajo el título: “Geografía física. Ideas sobre el límite inferior de la nieve perpetua, y sobre la geografía de las plantas: por el Señor Barón de Humboldt, traducidas del francés al español por A. R.” (Humboldt, 1804b) (Figura 7 y Material Suplementario 1, <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/consideraciones-en-torno-al-primer-articulo-impreso-sobre-la-geo/3180>, con la transcripción completa de la publicación en la *Aurora*).

El traductor fue, probablemente, Antonio Robredo (c. 1770-1830), astrónomo y matemático de origen gallego radicado en La Habana, editor del semanario *Aurora* entre 1800 y 1810, y cofundador de la primera biblioteca pública en la Real Sociedad Patriótica de Cuba.

Esta nota periodística, sin dedicatoria alguna, incluía una sección final sobre los límites de la nieve y la vegetación y, como tal, constituiría la primera referencia americana impresa de Alexander von Humboldt a la geografía de las plantas, después de su mención



Figura 7. Humboldt, A. “Geografía física”. *Aurora* (1804)

programática a Delambre en la carta manuscrita que le remitió desde Lima en noviembre de 1802, y que fue publicada en Filadelfia en junio de 1804.⁸ La “Geografía física ...” circuló en La Habana solo 3 a 4 días después de la salida de Humboldt hacia Filadelfia en el velero La Concepción, el sábado 29 de abril de 1804.

Es interesante anotar que un fragmento de una versión preliminar de este artículo, ya impreso, se conserva en el fondo Humboldt de la Staatsbibliothek de Berlín (Humboldt, 1804c). Contiene 23 enmendaduras que Humboldt hizo antes de embarcarse, y estas fueron atendidas en su totalidad por el impresor⁹ (Figura 8).

Aunque su título es “Geografía física”, y contiene una reflexión inicial que trata sobre el límite *geográfico* de las nieves perpetuas en diferentes latitudes¹⁰ en las páginas 137 a 142 (seis de las ocho páginas del artículo), el último tercio (de la página 142 a las páginas

⁸ Sobre la importancia de esta carta, debe considerarse que Humboldt presentó esta relación de sus viajes en los Andes justamente a Joseph Delambre, Secretario Perpetuo del Institut National (o Academia de Ciencias) de París, lo cual determinó su muy amplia difusión en Europa y América (Arboleda, 2021). En efecto, además de su publicación en inglés en el mes de junio de 1804 en Filadelfia, se han registrado a la fecha al menos 16 gacetas literarias o científicas europeas en las que esta misma carta fue publicada en el periodo de abril de 1803 a agosto de 1805 (Lubrich, *et al.*, 2021, **Material Suplementario 2**, <https://racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/consideraciones-en-torno-al-primer-articulo-impreso-sobre-la-geo/3181>).

⁹ Pude comprobar estas correcciones en la versión final al consultar la fuente primaria que me remitieron gentilmente los historiadores Michael Zeuske e Isaac Mengana, tanto como al compararla con la transcripción del original en Lubrich & Nehrlich, 2019, tomo II, pp. 267-273.

¹⁰ El asunto de fondo de esta reflexión consiste en explicar el procedimiento para calcular el límite de las nieves perpetuas teniendo en cuenta las diversas variaciones del fenómeno en distintos lugares de América y Europa. Este procedimiento uniforme consiste en un sistema universal de variables correlacionadas que intervienen en la determinación del límite de las nieves perpetuas. Humboldt se enorgullece de la originalidad, el rigor y la búsqueda de exactitud con que ha procedido en sus observaciones en esta materia. La función del epígrafe de Cicerón, “*Neque nos studium exquirendi defatigati relinquemus* [No nos agotarán las búsquedas de la investigación]”, apunta precisamente a destacar desde el comienzo del artículo estas características de su pesquisa. Una variable fundamental del sistema utilizado por Humboldt para determinar los límites de las nieves perpetuas es la altura de la montaña obtenida por procedimientos termo-barométricos de medición. Otras variables del sistema son la latitud del lugar geográfico, la temperatura y la humedad del aire, las capas isotérmicas, isobáricas e isotérmicas, etc (Arboleda, 2021).

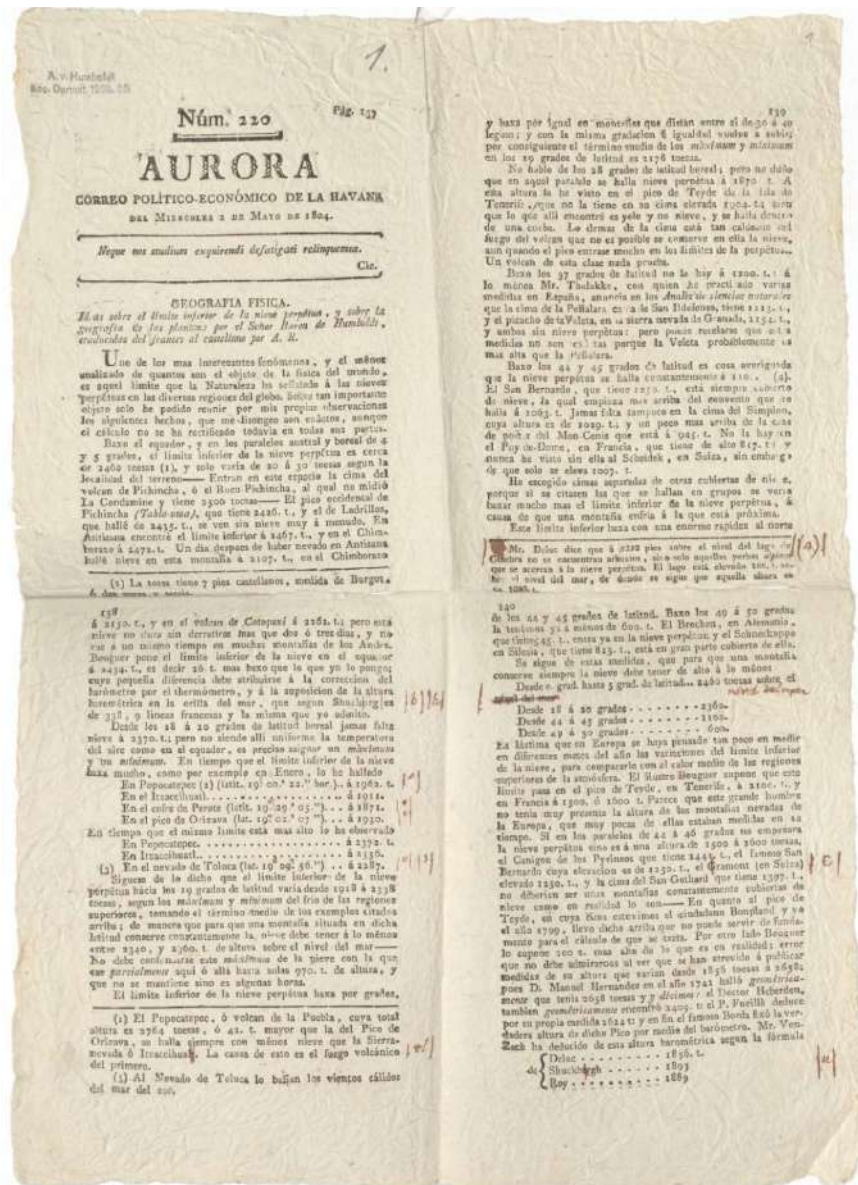


Figura 8. Humboldt, Alexander von. "Geografía física". *Aurora - Correo político-económico de La Habana* (1804). Copia personal de la prueba impresa conservada en el archivo de la Staatsbibliothek de Berlín.

143 y 144) incluye una breve síntesis sobre la biogeografía vegetal que había presentado ya por primera vez a Mutis (y a Caldas) desde Guayaquil, un año y tres meses antes, en febrero de 1803. Humboldt registró así en Cuba, al final de su artículo príncipes de La Habana, la que se debe considerar como su primera publicación formal de la idea de la geografía de las plantas (a no ser que aparezca otra publicada en México). Esta dice así:

Así como la nieve perpétua no se halla sino es á una cierta altura sobre el nivel del mar, la vegetación tiene tambien sus límites fixos, que dentro de poco tiempo expondré en mi Geografía de las plantas acompañada de mapas que á la vez manifiestan la temperatura, la humedad, la carga eléctrica, la cantidad de oxígeno, la cultura del terreno y la diferencia de animales, según las regiones á donde llegan dichos límites. Cerca del equador y hasta los 5 grados de latitud austral y boreal caen lánguidos los árboles y son muy raros desde la altura de 1600 á 2000 toesas. Las plantas gramíneas ocupan toda la region desde 2100 á 2300 toesas, habiendo

algunas que soportan una dilatación del aire igual á 16 pulgadas barométricas. Desde las 2300 ó 2460 toesas hasta aquella altura en que las nieves perpétuas ocultan los entes organizados, vegetan los líquenes y las plantas cryptogamas, que también se encuentran en las minas y en las cavernas bajo el nivel del mar. Lo interior del globo está animado en todas partes donde los gérmenes orgánicos han encontrado un hueco en que extenderse, y un fluido oxygenado con que alimentarse. De este modo los dos opuestos límites de la vegetación (el inferior y el superior) producen entes de una estructura análoga, y se aproximan como todos los extremos de la naturaleza física y moral.

En los Andes hemos observado que la Quina (Quinquina, *Cinchona*) ocupa una zona que empieza á 300 toesas sobre el nivel del mar y acaba en las 1560 t. Las especies más salutíferas de esta planta abundan principalmente entre las 900 y 1430 t.; y este hecho anuncia la región en que puede esperarse que se encontrarán Quinas ó Cinchonas medicinales; y también que esta preciosa producción puede hallarse en la falda oriental de la cordillera de Nueva España entre Xalapa y Perote. No se ha descubierto allí todavía esta planta, y quizás no ha atravesado el istmo de Panamá, donde hacia la parte meridional no tienen las colinas más que 160 á 200 toesas de alto, y son demasiado cálidas para la conservación de los *Cinchona* ó árboles de quina— En el reino de Nueva España, y bajo los 18 á 20 grados de latitud, toda región donde existen pinos no pasa de 2019 toesas de altura, que es el límite superior de esta planta; ni se encuentran á menos de 930 t. sobre el nivel del mar: lo que hace que sea tanto más extraordinario el verlos en esta isla de Cuba en regiones mucho más bajas; á lo que contribuye sin duda la latitud más boreal— Entre la ciudad de México¹¹ y Veracruz, ninguna encina (*quercus*) se encuentra á mayor altura de 1580 t. ni más abajo de 476— Bajo los 19 grados de latitud boreal (por ejemplo, en Xalapa que está en los 19 30' 46") el trigo, no grana sino es en una altura que exceda de 674 t— Entre Perote (que tiene de alto 1190 t. sobre el mar) y Veracruz no madura el fruto del plátano [(*Musa*)] sino es en terrenos elevados más de 770 t.

La vigorosa y bella vegetación de los trópicos, y las formas magestuosas que se ven en las Indias, suben desde el nivel del mar hasta la altura de 300 toesas. Esta región es la que con preferencia ofrece las más ricas producciones de las co[lo]nias. Sin embargo, en Guaduas, reino de Sta. Fe, se cultiva aun con abundancia la caña de azúcar á 600. t. de altura— Entre los trópicos reinan los grandes y constantes calores desde el nivel del mar hasta la altura de 300 t. La región templada se halla entre 500 [y] 900 toesas; es del todo agradable y en la que están situadas Xalapa, Chilpansing[o] [...] [y Cuernavaca en Nueva España; Guaduas, Villeta y Ibagué en el reino de Sta. Fe; y Guancabamba y Loja en el Perú; parajes todos justamente celebrados por su delicioso clima— Mas arriba de 1100 ó 1200 toesas el frío es por lo común desagradable; la vegetación es allí más débil, pero presenta á los ojos de los habitantes de los trópicos el curioso espectáculo de vegetales cuyas formas son idénticas á los de Europa (**Humboldt**, 1804b, pp. 142-144).

Humboldt mostraba ya, antes de regresar a Europa, evidencias de su percepción científica de la naturaleza. También, como se puede deducir de este texto habanero, evidencias de su percepción a la vez estética y, podríamos decir, ética, de los ambientes naturales: estos serían desarrollados en los años siguientes por el prusiano bajo dos descriptores que eran en esos días complementarios: la *fisonomía* y *fisiognomía* de las plantas.

¹¹ Yo he hallado que la elevación de la ciudad de México sobre el nivel del mar es de 1160 toesas; la de Lima, 61; la de Popayan, 901; la de Santa Fe de Bogota, 1347; la de Quito, 1480; la de Caracas, 426. La gran ciudad de Huancavelica en el Perú está fundada en un terreno elevado de 2134 toesas sobre el nivel del mar; esto es 230 toesas más alto que el Pico de Tenerife. ¿Qual será la altura de las montañas del cobre, y principalmente del pico de Tarquino en esta isla de Cuba? — La del cerro de Guajaibon. la halló de 390 toesas D. José Joaquín Ferrer, cuyas delicadas y exactas operaciones merecen la mayor confianza. ¿No da esto margen á pensar que el pico de Tarquino tendrá de 900 á 1000 t. y tal vez más? — La cima de las montañas azules de la Jamayca tiene de alto, según Edward, 7431 pie ingleses, ó 1159 toesas, que es algo menos que la cima de la silla de Caracas, la qual he hallado barométricamente de 1316 t. El Chimbarozo (sic), según Bouguer y la Contamine, se eleva á 3217 t., y según D. Jorge Juan á 3580; y esta diferencia no proviene de la señal de Caraburu, que los primeros la hacen de 1214 t. y el segundo de 1268. Yo he hallado geoméricamente que el Chimborazo tiene 3267 t. de alto. El Montblanc, Lima es la más alta montaña de todo el continente antiguo, tiene 2426 t. según la medida geométrica de Pictet; ó 2391 según la de Deluc. Saussure reduce de la suya barométrica 2419 t. por la fórmula de Deluc, y 2450 por la de Shuckburgh. Este último por una rara casualidad ha encontrado esta misma altura de 2450 t. por una medida directa trigonométrica. [Nota a pie de página original]

Conclusión

El primer reporte público de la geografía de las plantas de Alexander von Humboldt fue publicado en La Habana en mayo de 1804, sin dedicatoria alguna. Este texto, y las consideraciones planteadas en el presente artículo, permitirán precisar la evolución de los conceptos biogeográficos del viajero prusiano antes de regresar a Europa, en donde publicaría en París la obra que logró proyectarlo en el imaginario popular como el “fundador” de la biogeografía.

Agradecimientos

El autor agradece muy especialmente las muy estimulantes discusiones y aportes de los historiadores Ulrich Paessler y Tobías Kraft en Berlín, y Frank Holl en Múnich, en torno al desarrollo del concepto humboldtiano de la geografía de las plantas, así como los intercambios con los historiadores Michael Zeuske en Colonia, Sandra Rebok en San Diego e Isaac Mengana en La Habana. En Colombia, han sido particularmente significativas las conversaciones con los académicos Darío Valencia, Luis Carlos Arboleda, Jorge Arias de Greiff y Santiago Madriñán, sobre los primeros esbozos de la biogeografía en Humboldt, en Mutis y en Caldas.

Conflicto de intereses

El autor declara que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Arboleda, L. C.** (2020). Las mediciones barométricas de Humboldt y Caldas en la Nueva Granada, en Guerrero Pino, G. (comp.), *Estudios caldasianos: Ciencia y nación. A 250 años del natalicio de Francisco José de Caldas*, Santiago de Cali, Programa Editorial Universidad del Valle y Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, pp. 113-150.
- Arboleda, L. C.** (2021). Comunicación personal, correo electrónico del viernes 29 de octubre, 4:06 pm.
- Arias de Greiff, J.** (2018). Caldas y Humboldt, en **Valencia Restrepo, D.** (ed. acad.), *Francisco José de Caldas 1768-1816. Bicentenario de su muerte. Memorias Tercera Jornada Caldas*. Medellín, 31 de marzo de 2016, pp. 97-101.
- Bateman, A. & Arias de Greiff, J.** (1978). *Cartas de Caldas*, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá.
- Caldas, F. J.** (1802). [Carta a Santiago Arroyo, Quito, enero 21], en **Bateman, A., Arias de Greiff, J.** (eds.). (1978). *Cartas de Caldas*, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá.
- Buttimer, A.** (2012). Alexander von Humboldt and planet earth's green mantle, *Cybergeo: European Journal of Geography* [En línea], Epistemología, Historia de la Geografía, Didáctica, documento 616, en: <https://journals.openedition.org/cybergeo/25478>.
- Delèze, D. J.** (1814). *Esquisse des principales hauteurs des deux continents, dressée par M. Dr. Goethe*, citado en **Buttimer, A.** (2012). Alexander von Humboldt and planet earth's green mantle». *Cybergeo: European Journal of Geography* [En línea], Epistemología, Historia de la Geografía, Didáctica, documento 616, publicado el 3 agosto 2012, consultado el 16 octubre 2021: p. 28.
- Gómez Gutiérrez, A.** (2016). Alexander von Humboldt y la cooperación transcontinental en la Geografía de las plantas: una nueva apreciación de la obra fitogeográfica de Francisco José de Caldas, *HiN - Alexander Von Humboldt Im Netz. Internationale Zeitschrift für Humboldt-Studien*. 17 (33): 22-49.
- Gómez Gutiérrez, A.** (2018). *Humboldtiana neogranadina*, Cesa – Pontificia Universidad Javeriana – Universidad de los Andes – Universidad del Rosario – Universidad Eafit – Universidad Externado de Colombia, Bogotá.
- Humboldt, A.** ([1802]1804). A letter from Baron Humboldt to a member of the National Institute at Paris, *The Litterary Magazine and American Register* II (IX): 207-212, en <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=hvd.32044092530898&view=1up&seq=221&skin=2021&q1=July,%201804>

- Humboldt, A.** (1804a). Travels of Baron Humboldt, The Litterary Magazine and American Register **II** (X): 321-327, en <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=hvd.32044092530898&view=1up&seq=4&q1=July,%201804>
- Humboldt, A.** (1804b). Geografía física, Aurora - Correo político-económico de La Havana. **220**, miércoles 2 de mayo, pp. 137-144.
- Humboldt, A.** (1804c). Geografía Física. Ideas sobre el límite de la nieve perpétua, y sobre la geografía de las plantas. (...) (La Habana, 1804). Signatura: Nachl. Alexander von Humboldt, gr. Kasten 1, Mapped 5, Nr. 1, en https://digital.staatsbibliothek-berlin.de/werkansicht?PPN=PPN789851008&PHYSID=PHYS_0001&DMDID=DMDLOG_0001&view=picture-toolbox
- Humboldt, A.** [1805/1806]. Essai sur la géographie des plantes (Manuscrito), Bibliothèque Centrale, Musée National d'Histoire Naturelle de Paris, Ms456, ff. 8-9.
- Humboldt, A.** (1843). Mutis (Don Josef-Celestino), en Michaud, J. F. y Michaud L. G. (eds.) Biographie Universelle, ancienne et moderne. Histoire par ordre alphabétique de la vie publique et privée de tous les hommes qui se sont fait remarquer par leurs écrits, leurs actions, leurs talents, leurs vertus ou leurs crimes, vol. 29, pp. 658-662.
- Humboldt, A. & Bonpland, A.** ([1805]1807). Essai sur la géographie des plantes, Schoell, Paris.
- Humboldt, A. & Bonpland, A.** (1808). Plantæ æquinociales, Schoell, Paris, Tomo I.
- Lubrich, O. & Nehrlich, T.** (2019). Alexander von Humboldt. Sämtliche Schriften: Aufsätze, Artikel, Essays (Berner Ausgabe), DTV, München.
- Lubrich, O., Bärtschi, S., Görbert, J., Nehrlich, T., Strobl, M., Wernicke, N., Clark, R., Eibach, J., Wübben, Y., Metz, B., Müller-Tamm, J., Welge, J., Hagner, M., Knobloch, E., Košenina, A., Seeba, H., Fiedler C., Von Koppfels J.** (2021). Alexander von Humboldt. Editionen, <https://humboldt.unibe.ch/text>.
- Posada, E.** (1912). Obras de Caldas, Imprenta Nacional, Bogotá.
- Rebok, S.** (2021). Humboldt's empire of knowledge: from the Royal Spanish Court to the White House, University of California Press, Oakland (en imprenta).

Artículo original

Propuesta metodológica para abordar la restauración ecológica participativa en humedales de Bogotá D.C., Colombia

Methodological proposal to address participatory ecological restoration in wetlands of Bogotá DC (Colombia)

Lorena Cortés-Ballén, Juliana Zuluaga-Carrero*, Clara Morales-Rozo

Subdirección Científica, Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y Departamento de Ecología y Territorio, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

Los humedales son ecosistemas que representan valiosos refugios de biodiversidad en áreas urbanas y ofrecen innumerables servicios a los ciudadanos. Sin embargo, han sido dramáticamente transformados a través del tiempo, principalmente por procesos de urbanización. Se presenta una propuesta de estructura metodológica que aborda la restauración ecológica participativa en humedales de Bogotá D.C. en cuatro etapas y tres ejes de actuación: gestión social, educación ambiental y estrategias de restauración. De esta forma se consolidó una red con 596 integrantes de cinco grupos de interés, siendo la categoría comunitaria la de mayor participación. Se clasificaron las coberturas así: el 56,5 % de la superficie de los humedales correspondió a vegetación acuática, el 3 % a infraestructura y el 40,5 % a vegetación terrestre, 20 % de esta intervenida mediante las estrategias de restauración planteadas, que incluyeron 52 especies vegetales de tres gremios ecológicos en siete diseños florísticos en la franja terrestre. El establecimiento y permanencia en el tiempo de los procesos que se adelantan para conservar los humedales en Bogotá D.C. dependerá en gran medida de las estrategias ecológicas planteadas y la voluntad de los entes encargados de su administración.

Palabras clave: Diversidad; Educación ambiental; Gestión social; Gremios ecológicos; Recuperación.

Abstract

Wetlands are ecosystems that represent valuable refuges for biodiversity in urban areas and offer innumerable services to citizens. However, they have been dramatically transformed over time mainly by urbanization processes. We propose here a methodological structure to address the participatory ecological restoration in wetlands of Bogotá D.C. made up of four stages and three lines of action: social management, environmental education, and restoration strategies. In that context, a network with 596 actors from five interest groups was consolidated, mostly with participants from the communities. The coverage was classified as follows: 56.5% of the surface of the wetlands corresponded to aquatic vegetation; 3% to infrastructure, and 40.5% to terrestrial vegetation, of which 20% was intervened through the proposed restoration strategies including 52 plant species from three ecological guilds in seven floristic designs on the land strip. The establishment and permanence of the processes that are carried out to conserve wetlands in Bogotá D.C. will depend to a large extent on the ecological strategies proposed and the will of the entities in charge of their administration.

Keywords: Diversity; Ecological guilds; Environmental education; Social management; Recovery.

Citación: Cortés-Ballén L, Zuluaga-Carrero J, Morales-Rozo C. Propuesta metodológica para abordar la restauración ecológica participativa en humedales de Bogotá D.C., Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1205-1218, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1406>

Editor: Gabriel Roldán

***Correspondencia:**

Juliana Zuluaga-Carrero;
zuluaga.juliana@javeriana.edu.co

Recibido: 6 de marzo de 2021

Aceptado: 29 de noviembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Introducción

Los efectos de la urbanización en los ecosistemas de humedal de áreas urbanas se evidencian en profundas transformaciones ambientales, pues se ha disminuido notablemente su extensión superficial, se han modificado sus coberturas vegetales con el consecuente impacto en la biodiversidad, y, por ende, en la sustentabilidad metropolitana (Pintos &

Sgori, 2012; Salazar-Suaza & Quijano-Abril, 2020). Las dinámicas de crecimiento y ocupación poblacional son evidentes en los centros urbanos, donde se desconoce la importancia ecológica de estos ecosistemas, lo que se intensifica por la falta de continuidad en las intervenciones de recuperación de estos ecosistemas por parte de las administraciones locales (Guzmán, *et al.*, 2011).

En el departamento de Cundinamarca (Colombia) los humedales han sufrido las transformaciones generadas por las actividades socioeconómicas, por lo que hoy se encuentran en la categoría de peligro crítico de extinción (Etter, *et al.*, 2020). Específicamente en la sabana de Bogotá, los espejos de agua se han reducido en más del 84,5 % de su extensión original por causa de las actividades de urbanización en los últimos 60 años (García-Ubaque, *et al.*, 2020) y ello ha causado un avanzado proceso de fragmentación aislándolos en parches remanentes (Cortés-Ballén, 2018) y provocando que diferentes especies estén al borde de la extinción (Rodríguez-Linares, *et al.*, 2019). En Bogotá algunos humedales se encuentran en los parques ecológicos distritales de humedal (PEDH) bajo la categoría de protección establecida en el Decreto 190 de 2004, además, recientemente han sido incluidos en la lista de humedales de importancia de la Convención Internacional sobre los Humedales (Ramsar) reconocida mediante el Decreto 1468 del 2018. Sin embargo, una buena extensión de estos ecosistemas no está cobijada por ninguna figura de conservación y es vulnerable frente a los efectos de la transformación de la ciudad (Andrade, *et al.*, 2013).

En la defensa de los humedales han participado distintas instituciones que han impulsado movimientos ambientales (Patiño, 2014) y focalizado el interés de las iniciativas comunitarias que dieron lugar a los primeros proyectos de restauración ecológica (Guzmán, *et al.*, 2011). La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), conjuntamente con otras instituciones como universidades y ONG, ha hecho intervenciones de reconformación hidrogeomorfológica y recuperación en varios humedales estableciendo lineamientos básicos para su manejo y recuperación (Alcaldía de Bogotá, 2020). Asimismo, se han adelantado numerosas investigaciones que documentan sus características físicas, biodiversidad y procesos sociales (Mayorga, 2016; Cortés-Ballén, 2018; Cabrera-Amaya & López-Cruz, 2019), además de numerosos trabajos de grado multidisciplinarios.

En este contexto, es prioritario que los proyectos de restauración ecológica se originen en el ámbito público incorporándolos como una prioridad en las herramientas de planificación urbana a nivel local. En este marco, el esclarecimiento de las acciones adelantadas por la administración de la ciudad para la gestión de recursos naturales disminuiría la duplicidad de actuaciones y favorecería el seguimiento de los resultados (Simbaqueba, 2016). Actualmente las acciones en torno a los humedales de Bogotá no se basan en una aproximación metodológica que responda a las necesidades institucionales, sociales y ambientales, por lo que en este estudio se presenta una propuesta metodológica para la implementación de procesos de restauración ecológica participativa con base en los resultados obtenidos en la ejecución del convenio interadministrativo No. 9-07-24300-967-2013 entre el 2014 y el 2016 con énfasis en tres ejes de actuación: gestión social, educación ambiental y estrategias de restauración ecológica participativa para el manejo y protección de los humedales de Bogotá.

Materiales y métodos

Área de estudio

Se priorizaron 11 humedales de Bogotá ubicados en las localidades de Usaquén, Suba, Engativá, Kennedy, Fontibón y Bosa (Figura 1). Según los planes de manejo ambiental en estos ecosistemas, los suelos son poco desarrollados e hidromórficos y se caracterizan por ser rellenos conformados por limos orgánicos, arcilla con variaciones de profundidad según su cercanía al río Bogotá o a cuerpos de agua que aportan gran cantidad de sedimentos, además de materiales de construcción y otros desechos resultantes de procesos de urbanización.

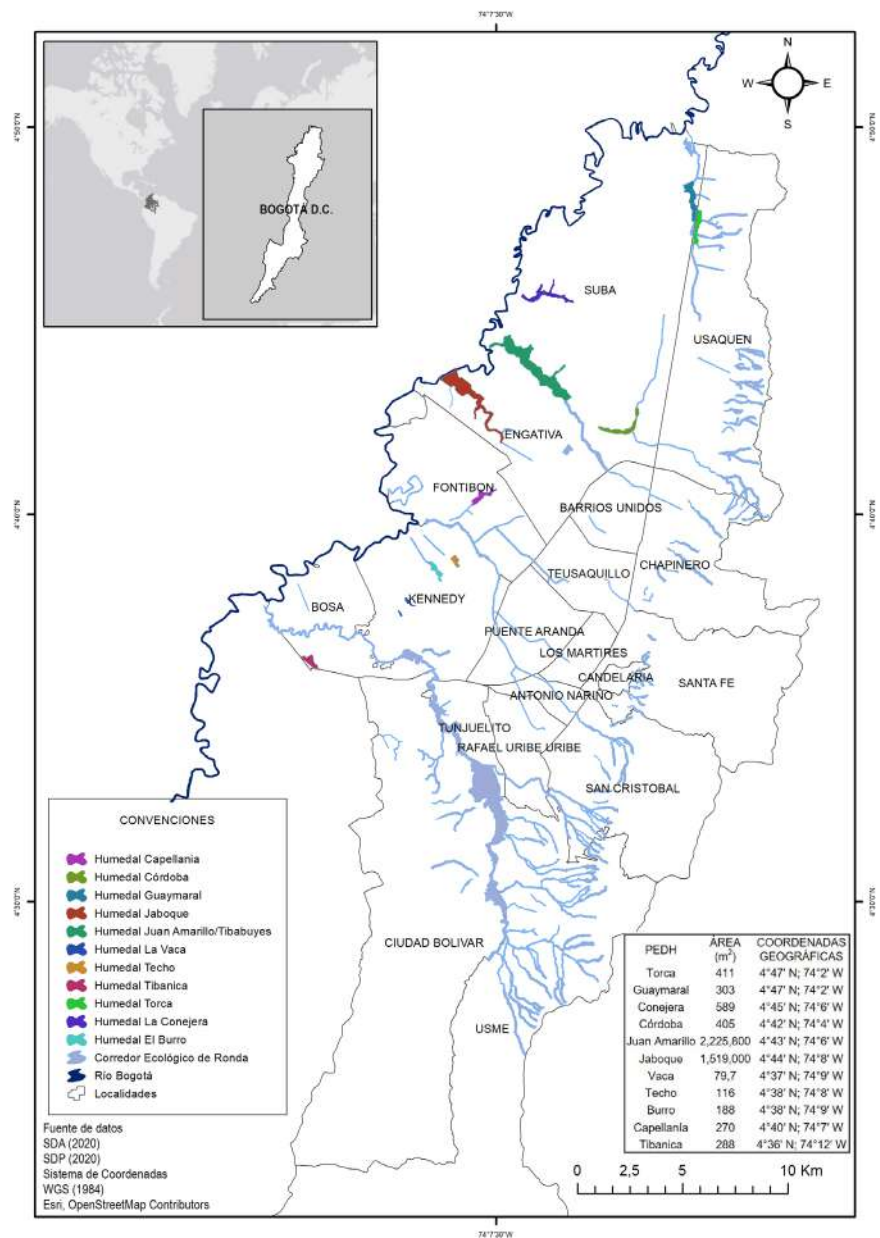


Figura 1. Localización de los humedales intervenidos en Bogotá D.C. en el marco del convenio interadministrativo No. 9-07-24300-967-2013

Los usos del suelo son diversos y no todos respetan la preservación y restauración de flora y fauna nativa que los regula (Decreto 190 del 2004): se han evidenciado prácticas como la ganadería, las urbanizaciones de uso residencial y comercial en sus inmediaciones, y la disposición de residuos que los expone a contaminantes, residuos sólidos y sustancias químicas que ocasionan procesos de eutroficación; a ello se suma la falta de un sistema hidráulico adecuado (Bejarano & Bonilla, 2009).

Los humedales están asociados de forma directa e indirecta a los corredores ecológicos de ronda que abarcan la red hidráulica de Bogotá y las zonas de manejo y preservación ambiental que conforman la estructura ecológica principal del Distrito Capital (**Secretaría Distrital de Ambiente - SDA, 2008**). Cada humedal cuenta con una delimitación interna en la que se destacan la llamada zona de manejo y preservación ambiental (ZMPA),

una zona de ronda hidráulica (RH) y el cuerpo de agua (SDA, 2008; Díaz-Espinosa, *et al.*, 2012). La temperatura, la precipitación y la humedad relativa varían a lo largo del territorio del Distrito, con un único patrón de lluvias de tipo bimodal (IDEAM, 2007); las precipitaciones medias anuales han variado en los últimos diez años entre 506,50 mm y 1.085,10 mm y la temperatura en un margen de hasta 2,4 °C con máximas y mínimas entre los meses de diciembre y marzo (SDA, 2020).

Estructura de la propuesta metodológica

La investigación se desarrolló en el marco del convenio interadministrativo celebrado entre el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, E.S.P. Dada la escasa documentación publicada sobre experiencias y resultados de procesos de restauración participativa en los humedales de Bogotá, se plantearon los siguientes tres ejes de actuación: gestión social, educación ambiental y estrategias de restauración ecológica participativa, los cuales se incorporaron en una ruta metodológica estructurada en cuatro etapas secuenciales siguiendo el marco lógico de los proyectos de gestión orientados a resultados (Ortegón, *et al.*, 2005; García-López & García-Moreno, 2010). Teniendo en cuenta los resultados y tiempos del convenio, se presentó una adaptación de proyectos de gestión contemplando las etapas de planeación, ejecución, monitoreo, seguimiento y evaluación. Debe aclararse que los resultados que aquí se presentan responden únicamente a las etapas de planeación y ejecución. En cuanto a las etapas de monitoreo y seguimiento, aunque no se abordaron, se sugieren algunos aspectos dada su importancia en los proyectos de restauración. Cada etapa contó con componentes específicos que respondieron a acciones necesarias para su realización y los ejes solo se tomaron en cuenta para la etapa de ejecución.

En la etapa de planeación se determinó el problema, los objetivos, el diseño y el levantamiento de información primaria y secundaria de orden social (selección de participantes e instrumentos de educación) y ecológico (especies históricamente reportadas, gremios ecológicos, definición de diseños florísticos y clasificación de coberturas) (Vargas, 2007, 2011; Ceccon, 2013).

Con estos datos se procedió a la etapa de ejecución estructurada en los ejes de actuación propuestos, cada uno de los cuales estuvo integrado por instrumentos de recolección de información específicos como talleres, cursos, interpretación ambiental, clubes de ciencia, semilleros de investigación, selección de especies, diseños florísticos y desarrollo de técnicas de mantenimiento. La red de participantes consolidó una matriz de información en torno a estos instrumentos en cinco categorías: comunitaria, educativa, gubernamental, no gubernamental (ONG) y privada. Los instrumentos de educación ambiental orientaron las estrategias de restauración ecológica, es decir, a partir de los grupos de participantes establecidos y las herramientas que permitieron explorar sus conocimientos, se obtuvieron insumos para la selección de especies y diseños florísticos y, consecuentemente, de las técnicas de mantenimiento.

Las últimas dos etapas de la propuesta se construyeron de forma teórica con base en Herrick, *et al.* (2006) y teniendo en cuenta la información recopilada hasta ese punto. La etapa de monitoreo y seguimiento integró cuatro componentes esenciales: la elaboración del plan de monitoreo y seguimiento, la definición de indicadores, el registro de información en bases de datos y el reporte de actividades, avances y retrocesos. Por último, para la etapa de evaluación se sugirieron componentes como el análisis de resultados, las alternativas de solución, la revisión de objetivos alcanzados, la divulgación de resultados y la retroalimentación en busca de oportunidades de mejora del proceso.

Gestión social y proceso participativo

En el eje de gestión social se incorporó un conjunto de mecanismos para orientar, configurar y potenciar acciones concretas en materia de medio ambiente. Se tuvieron en cuenta los niveles sectoriales y su intervención espacial empleando el instrumento de focalización (Cohen & Franco, 2005).

La selección de los participantes vinculados a la gestión social de cada humedal se hizo mediante técnicas cualitativas propias de la investigación social, es decir, un diagnóstico participativo y talleres e intercambio de saberes con grupos focales (**Palacios-Gómez, 2006**). Se seleccionaron grupos de interés a partir de la metodología de redes sociales (**Palacio, 2015**) para el desarrollo de la propuesta.

Una vez obtenido el listado de los eventuales participantes y sus categorías, se analizó la matriz generada mediante el programa CFinder-2.0.6 (**Palla, et al., 2005**), con el cual se construyó una red cualitativa de relaciones para determinar su representatividad en cada humedal basados en criterios de presencia o ausencia. Posteriormente, esta información se procesó utilizando el programa Past 4.03, con el fin de hacer un análisis de similitud entre humedales. Para ello se asignó una puntuación que reflejara la fortaleza de las conexiones entre humedales con base en los participantes comunes utilizando el algoritmo UPGMA (**Hammer, et al., 2001**). El total de participantes y relaciones se presentó a través de un diagrama que indicaba la cantidad de participantes por categoría y por humedal.

El segundo eje de la propuesta fue la educación ambiental, concebida como un proceso interdisciplinario para la comprensión holística de los humedales por parte de los ciudadanos partiendo del conocimiento ecológico de estos ecosistemas, así como de su entorno social y cultural (**Bermúdez & De Longhi, 2008**). Para favorecer la participación de un amplio rango de grupos etarios, se crearon cinco instrumentos: cursos, talleres, semilleros de investigación, interpretación ambiental y clubes de ciencias, este último diseñado para incluir a la población infantil.

A partir de la detección de los agentes interesados y mediante los instrumentos de educación implementados, se dio origen al tercer eje de actuación, es decir, las estrategias de restauración ecológica participativa, las cuales permitieron definir una selección de especies de plantas conforme al conocimiento cultural de los diferentes participantes. A partir de esta selección, se integraron los gremios ecológicos (heliófitas, hemisciófitas y esciófitas) contrastados con las características estructurales, sucesionales y funcionales, así como con sus atributos morfológicos, reproductivos y ecológicos para favorecer su adaptación a las condiciones de cada humedal (**Van der Hammen & González, 1963; Wilson, 1999; Mahecha, et al., 2010; Vargas, 2011; Gann, et al., 2019**).

Las especies vegetales se plantaron siguiendo diseños florísticos definidos como asociaciones heteroespecíficas para disminuir la homogeneidad composicional y favorecer las dinámicas sucesionales (**Gann, et al., 2019**), mediante estratos arbóreos, arbustivos (entre 1,5 a 3 m) y herbáceos (entre 30 a 50 cm). El material vegetal utilizado fue propagado en el vivero La Florida del Jardín Botánico de Bogotá, y se complementó con material propagado *in situ* en viveros satélite mediante propagación por semilla y esquejes de especies nativas encontradas en cada humedal en correspondencia con la selección establecida previamente. Esta estrategia permitió que el material vegetal tuviera una mejor adaptación a las condiciones ambientales de los humedales. La validación taxonómica y de hábitos de las especies se basó en el Catálogo de Plantas Líquenes de Colombia (**Bernal, et al., 2019**).

Resultados

Estructura de la propuesta

La etapa de planeación generó información para la etapa de ejecución en la que se integraron los ejes de acción propuestos (**Figura 2**). Los resultados obtenidos permitieron la recolección, análisis y posterior apropiación de la información, la cual se trabajó con los grupos de interés establecidos. En este tipo de propuesta la inclusión de estrategias de restauración debe considerarse un medio y no un fin, ya que su consolidación viene de prácticas participativas cuyo propósito es asegurar a mediano y largo plazo la estabilidad de las acciones adelantadas en estos ecosistemas.

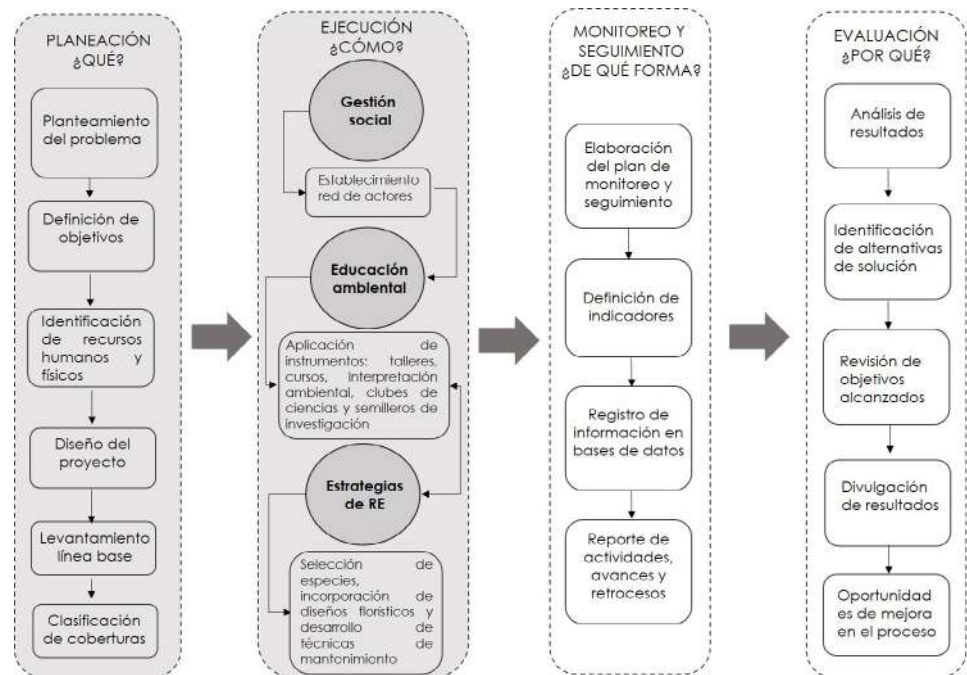


Figura 2. Estructura metodológica de la propuesta de restauración ecológica participativa

Gestión social y proceso participativo

A partir de la focalización, se construyó una red con los grupos de interés que permitió visibilizar cinco categorías conformadas por 596 participantes y se orientó de mayor a menor participación. La primera categoría reunió a 234 participantes: asociaciones, cabildos indígenas, colectivos, casas hogar, comedores, emisoras, periódicos comunitarios, grupos de adultos mayores, guardianes de humedales, iglesias, líderes ambientales, mesas ambientales, redes comunitarias, grupos LGBT y juntas de acción comunal. La segunda, la categoría educativa, integró a 215 participantes: jardines infantiles, colegios, gimnasios, institutos de formación técnica, universidades y un instituto de investigación. En la categoría gubernamental se determinaron 72 participantes de los sectores ambiental y social agrupando las dependencias de una misma entidad. La categoría no gubernamental reunió a 56 participantes de ONG. Por último, la categoría de instituciones privadas incluyó a 19 participantes (**Figura 3**).

Según el análisis de similitud, la mayor participación se registró en los humedales de la localidad de Kennedy: Burro (112 participantes), Vaca (102) y Techo (78) en los sectores educativos, comunitarios, de ONG y de algunos entes gubernamentales. Hubo otra agrupación de humedales con participación de sectores gubernamentales y ONG, principalmente en Capellanía (60 participantes) y Jaboque (58). Un tercer grupo se ubicó en los humedales Córdoba (75 participantes) y Torca-Guaymaral (52), con participantes de las categorías de ONG, educativa (universidades y un instituto de investigación) y comunitaria. Por último, se registró una menor participación en los humedales Tibanica (105 participantes), Conejera (83) y Juan Amarillo (55), con una mayoría de participación local comunitaria.

Educación ambiental

Se aplicaron los cinco instrumentos estipulados con la participación de todos los grupos etarios; el número de semilleros de investigación y cursos fue mayor en Torca-Guaymaral, Tibanica y Burro; en cuanto a los clubes de ciencia, el número de participantes varió y los más estructurados se ubicaron en los humedales de Jaboque, Capellanía y Tibanica;

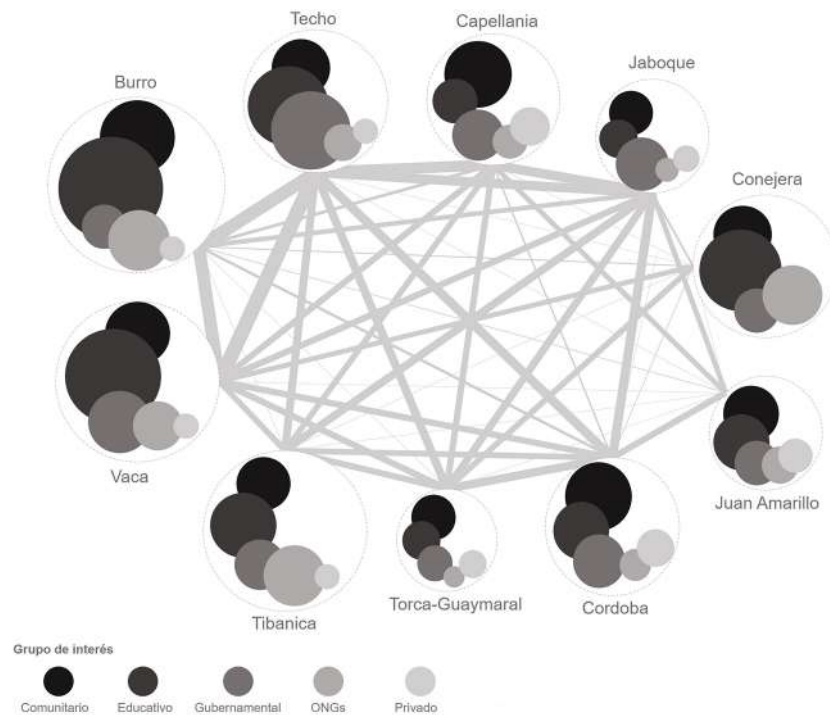


Figura 3. Red de participantes construida a partir del eje de gestión social de la propuesta de restauración ecológica participativa

se hicieron 4.258 recorridos y 3.168 ecotalleres con una mayor participación en los humedales de Córdoba, Juan Amarillo, Jaboque y Capellanía. Se evidenció que los talleres y los recorridos de interpretación ambiental tuvieron una mayor participación ciudadana, en especial en los humedales Tibanica, Conejera, Córdoba, Capellanía, Jaboque y Juan Amarillo.

Estrategias de restauración ecológica participativa

A partir de la clasificación de coberturas fue posible evidenciar que el 56,5 % de la superficie de los humedales correspondió a vegetación acuática, el 40,5 % a vegetación terrestre y el 3 % a infraestructura (senderos, edificaciones y afines); esta clasificación se socializó en diferentes espacios con los participantes de las categorías establecidas, con el fin de concertar las áreas de cobertura terrestre sobre las cuales se llevó a cabo la intervención. Asimismo, el producto de la información recopilada mediante los instrumentos de educación ambiental sobre el uso tradicional de las especies, su relación cosmogónica y su ecología permitió definir la selección inicial de las especies que luego se ajustó con base en la revisión bibliográfica. Además, se determinó la forma de ubicación espacial de las especies (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1406/3153>), por ejemplo, en el humedal Tibanica se desarrollaron diseños étnicos muiscas como la serpiente (dSM) y la doble espiral (dDEM).

Se plantaron 26 especies heliófitas, 21 hemisciófitas y cinco esciófitas, para un total de 52 especies, 45 géneros y 30 familias, el 63 % de ellas nativas y el porcentaje restante, cultivadas. Las familias con mayor diversidad de especies en los diseños fueron Asteraceae, Fabaceae, Solanaceae y Verbenaceae. Además, 12 especies se seleccionaron por su importancia comunitaria para consumo o uso medicinal (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1406/3153>). Estas especies fueron integradas y adaptadas en siete diseños florísticos, de los cuales un 53 % correspondió a especies de hábito arbóreo (árbol y arbolito), el 33 % al arbustivo (subarbusto y arbusto), el 10 % al herbáceo y un 4 % a plantas trepadoras y epífitas (**Figura 4**).

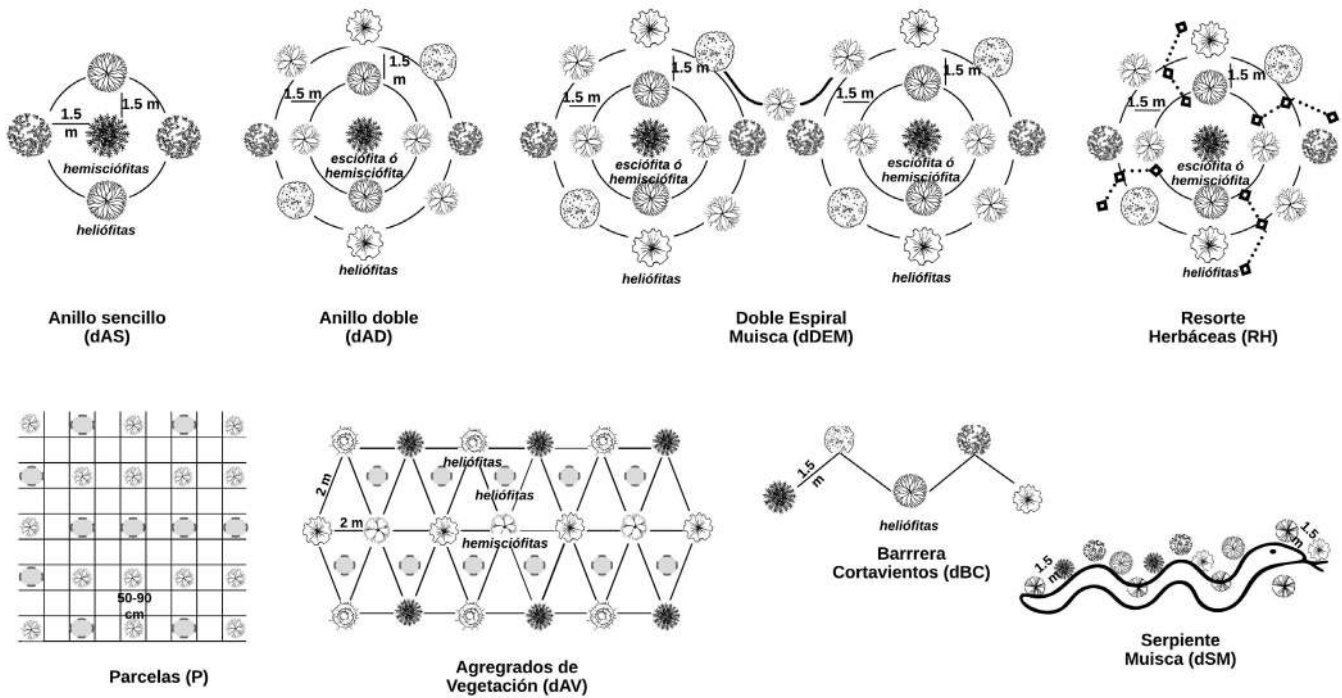


Figura 4. Diseños florísticos implementados en los humedales intervenidos

Las técnicas de mantenimiento se precisaron mediante los instrumentos de educación según las necesidades de las áreas e incluyeron actividades de plateo, tutorado, fertilización y manejo fitosanitario. También se hizo el control de especies que pudieran ser invasoras o colonizadoras agresivas como *Cenchrus clandestinus*, *Acacia decurrens* y *Ulex europaeus*. Esta última requirió un mayor control en los humedales Juan Amarillo, Capellanía, Conejera, Córdoba, Jaboque y Torca-Guaymaral.

Discusión

Los proyectos de restauración ecológica deben ir más allá de objetivos meramente conservacionistas y considerar el vínculo existente entre los ecosistemas y los sistemas sociales, los cuales dependen entre sí para su sostenibilidad (Swart, *et al.*, 2001). La incorporación de fases secuenciales para la recolección, análisis e integración de la información es el camino más apropiado para la consecución de resultados. La planeación, ejecución, seguimiento, monitoreo y evaluación han sido etapas parcial y totalmente abordadas en los proyectos de restauración ecológica desarrollados en el país, como lo registran los trabajos de Vargas, *et al.* (2007), la SDA (2008), Aguilar-Garavito & Ramírez (2015), y del Programa Bosques Andinos (2019). En este sentido, esta propuesta metodológica se orientó a integrar la participación ciudadana y la sostenibilidad de los ecosistemas.

El eje de gestión social adelantado en la etapa de ejecución permitió determinar el contexto histórico en el que se relacionaban los grupos de interés. La red generada permitió detectar 596 agentes para liderar la gestión en estos ecosistemas, lo que facilitó la actualización de las categorías señaladas por Palacio, *et al.* (2003), con 14 actores y Palacio & Hurtado (2005), con 16 actores. Se evidenció una mayor participación de sectores comunitarios, especialmente en el humedal La Conejera, lo que demostró una fortaleza comunitaria liderada por diferentes grupos de interés que se estaría reflejando en el estado de conservación del ecosistema. Este tipo de participación fue similar en los humedales Córdoba, Tibanica, Vaca y Burro (Palacio, *et al.*, 2003).

La participación de agentes gubernamentales se destacó en los humedales Techo, Jaboque, Córdoba y Tibanica, resultado que sugiere una relación directa con las obras de reconformación y adecuación lideradas principalmente por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (**Alcaldía de Bogotá**, 2020). Se evidenció una participación discontinua de los representantes de estos sectores, lo que repercute en la falta de comunicación de los procesos y ratifica la importancia de una articulación de la red que garantice la continuidad en la toma de decisiones (**Lubell, et al.**, 2010).

En el segundo eje de actuación, la educación ambiental, la mayor participación se registró en la población infantil y adolescente, especialmente en los humedales Tibanica, Conejera, Córdoba, Capellanía, Jaboque y Juan Amarillo, dado el interés del sector educativo en integrar en los programas ambientales escolares (PRAES) actividades de formación señaladas en la política pública distrital de educación ambiental (Decreto 675 del 2011). Estos resultados sugieren la importancia de incorporar en las estrategias educativas conocimientos que aporten a la formación en materia de protección, conservación y restauración de los humedales. Los clubes de ciencia, específicamente, fomentan habilidades científicas en la población más joven y pueden ser estrategias pedagógicas que, integradas a los valores y saberes ambientales, propician una relación de responsabilidad con el ambiente (**Calixto-Flores**, 2012), la cual puede fortalecerse integrando a otros sectores no gubernamentales como lo exponen **Murcia & Guariguata** (2014), **Pita-Corredor, et al.** (2015) y **Quimbayo-Ruiz** (2018), y específicamente con respecto al humedal La Conejera, **Guzmán, et al.** (2011).

En cuanto al eje de estrategias de restauración, la selección de especies vegetales fue el resultado de la información registrada en los dos ejes anteriores y complementada con la línea base de cada humedal. Se adoptó la diversidad de gremios ecológicos que comparten patrones similares de exigencias de radiación lumínica, regeneración y crecimiento (**Wilson**, 1999; **Martins, et al.**, 2003). De las 31 familias seleccionadas, algunas se distinguen por su resistencia a condiciones ambientales adversas, como Asteraceae, Fabaceae, Solanaceae, Araliaceae y Verbenaceae. En cuanto a las especies, algunas se incluyeron de acuerdo con las categorías de uso de la comunidad (alimento, cercas vivas, medicinales), y entre ellas se destacan la quinua, el gaque, la ña de gato, el corono, el tinto, el cerezo, el cedro, la ortiga, el laurel y la uchuva.

En términos de riqueza de especies, se resalta la introducción de un amplio número de taxones nativos en los humedales que reflejan la riqueza natural reportada para estos ecosistemas, además de la señalada como propicia para su manejo dentro de la ciudad por los instrumentos regulatorios y los entes encargados de su protección (**Van der Hammen, et al.**, 2008). En cuanto al estudio elaborado por **Natura** (2015), se encontró que esta propuesta involucra un 18 % adicional de diversidad en la selección de especies comparada con otros programas de restauración ecológica implementados en Bogotá. Las especies seleccionadas contribuyen a la incorporación de nutrientes y estabilización del pH del suelo, mejorando las condiciones microclimáticas que, en términos de los diseños florísticos propuestos, puede favorecer la regeneración de otras especies nativas mediante la activación del banco de semillas latente (**Barrera-Cataño, et al.**, 2010; **Natura**, 2015).

Los diseños florísticos fueron únicos y se adaptaron a las áreas disponibles para plantación en cada humedal y a la participación comunitaria, y a partir de ello se definió, se estableció y se dio reconocimiento al proceso. Se resalta el caso de Tibanica, en donde está el cabildo indígena muisca, con quienes se diseñaron la serpiente y la doble espiral muisca. En este sentido, **Garzón, et al.** (2014), **Villa** (2012) y **Gann, et al.** (2019) señalan la importancia de vincular conocimientos locales articulados con el territorio, la identidad y la tradición histórica, étnica, social y cultural en la selección de especies en procesos de restauración ecológica participativa.

En todos los humedales se plantaron árboles, arbustos y herbáceas de crecimiento rápido (hemisciófitas y heliófitas) para generar cobertura y un microclima propicio para las especies de crecimiento lento (esciófitas) (**Wallace & Clarkson**, 2019). Además, la inclusión de herbáceas con flores y frutos en las áreas terrestres fue una oportunidad en

aquellos humedales que aún hoy tienen remanentes de vegetación natural, como es el caso de Torca-Guaymaral y Conejera, lo que a su vez podrá traer propágulos de las áreas cercanas, favoreciendo así la recuperación de las coberturas (Vargas *et al.*, 2007).

A largo plazo, estas acciones en etapas iniciales favorecen la recuperación del ecosistema sin asistencia, lo que coincide con lo reportado en ecosistemas degradados en Bogotá por Barrera, *et al.* (2010) y Ramírez & Fennell (2014), y es comparable con lo reportado por Zeunert (2013), Standish, *et al.* (2013) y Wallace & Clarkson (2019), quienes resaltan la importancia de incluir especies que aporten a la recuperación de los procesos y funciones ecológicas en proyectos de restauración en ecosistemas urbanos, y que no necesariamente responden a un ecosistema de referencia.

En cuanto a las técnicas de mantenimiento y de control de especies invasoras y riego en esta propuesta, estas implicaron un gran despliegue de recursos físicos y humanos, dadas las necesidades evidenciadas durante los procesos de plantación. La dominancia de la especie invasora *Cenchrus clandestinus* en las áreas intervenidas, gramínea caracterizada por duplicar su volumen en períodos cortos de tiempo (Baptiste, *et al.*, 2010), hizo que en los humedales con mayor área y condiciones ambientales extremas se requiriera una labor más intensa para su control, como en el caso de Juan Amarillo y Tibanica. Es preciso mencionar que las técnicas de mantenimiento empleadas por las entidades de la administración pública para el control de especies invasoras han generado alteraciones en la estructura vertical y horizontal de estos ecosistemas debido a su eliminación constante, como en el caso del pasto kikuyo, lo que afecta el crecimiento de las especies nativas y el establecimiento del banco de semillas nativas. Esta situación ya ha sido ampliamente registrada en estudios de humedales en centros urbanos (Saeki, 2007). Se sugiere seleccionar especies de rápido crecimiento que puedan generar cobertura y compitan directamente con el pasto, como las seleccionadas en esta propuesta: *Baccharis latifolia*, *B. bogotensis*, *Bocconia arborea*, *Lycianthes lycioides*, *Cestrum mutisii*, *Solanum oblongifolium*, *Verbesina crassiramea*, *Physalis peruviana*, *Escallonia pendula* y *Dodonaea viscosa*. No obstante, es necesario evaluar su desempeño durante la etapa de monitoreo y seguimiento.

Según Díaz, *et al.* (2004), establecer especies que permitan restaurar la integridad de los ecosistemas, no solo generará competencia frente a especies exóticas y de comportamiento invasor, sino que es una estrategia incluso más efectiva que los tratamientos mecánicos (poda) o químicos (herbicidas) y reduce los gastos de mantenimiento. Natura (2015) resalta que *B. latifolia* (chilco), *V. crassiramea* (cervetano) y *S. oblongifolium* (tomatillo) han sido especies usadas para el rápido incremento de cobertura en otros ejercicios de restauración ecológica en Bogotá, D.C.

Conclusiones

La ruta metodológica empleada en esta propuesta permitió evidenciar la importancia de definir ejes de actuación de índole participativo que integren a todos los agentes presentes en el contexto de cada humedal y creó una sinergia entre los criterios ecológicos y los del territorio orientada a promover la responsabilidad social de los ciudadanos en materia de protección de estos ecosistemas. El establecimiento y permanencia en el tiempo de los procesos que se adelanten para conservar los humedales en Bogotá, D.C, dependerá en gran medida de las estrategias ecológicas planteadas y de la voluntad de los entes encargados de su administración.

Agradecimientos

Este proyecto fue auspiciado por el convenio interadministrativo No. 9-07-24300-0967-2013 entre el Jardín Botánico de Bogotá, José Celestino Mutis, y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Agradecemos a la Subdirección Científica y a la Subdirección Educativa y Cultural del Jardín Botánico de Bogotá, por el apoyo en recursos físicos y humanos integrados por equipos de trabajo interdisciplinario. Asimismo, se agradece a Diego Mauricio Cabrera-Amaya por la revisión crítica del manuscrito.

Información Suplementaria

Tabla 1S. Composición, estructura y diseños florísticos implementados en los humedales intervenidos. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1406/3153>

Contribución de los autores

LACB: construcción y desarrollo de la propuesta de investigación, diseño de la investigación, organización de la información, revisión de literatura, generación y análisis de resultados, revisión de forma y contenido del documento, discusión y conclusiones; JZC: diseño de la investigación, organización de la información, revisión de literatura, generación y análisis de resultados, discusión y conclusiones; CMR: organización de la información, revisión de literatura, generación y análisis de resultados, discusión y conclusiones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Aguilar-Garavito M. & W. Ramírez (eds.).** (2015). Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá D.C., Colombia. 250 p.
- Alcaldía de Bogotá.** (2020). Planes de manejo de los humedales de Bogotá. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/listados/tematica2.jsp?subtema=23402>
- Andrade, G. I., Remolina, F., Wiesner, D.** (2013). Assembling the pieces: a framework for the integration of multi-functional ecological main structure in the emerging urban region of Bogotá, Colombia. *Urban Ecosystems*. **16** (4): 723-739. Doi: 10.1007/s11252-013-0292-5
- Baptiste, M. P., Castaño, N., Cárdenas, D., Gutiérrez, F. D. P., Gil, D. L., Lasso, C. A.** (2010). Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, DC, Colombia. 200 p.
- Barrera-Cataño J. I., Contreras-Rodríguez, S.M., Garzón-Yepes, N.V., Moreno-Cárdenas, A.C., Montoya-Villarreal, S.P.** (2010). Manual para la restauración ecológica de los ecosistemas disturbados del Distrito Capital. Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). Bogotá D.C.
- Bejarano, P.A. & Bonilla, M.A.** (2009). Dinámica espacio-temporal del humedal Juan Amarillo entre 1950-2005. *Acta Biológica Colombiana*. **14** (1): 87-105.
- Bermudez, G. & De Longhi, A. L.** (2008). La educación ambiental y la ecología como ciencia. Una discusión necesaria para la enseñanza. *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*. **7** (2): 275-297.
- Bernal, R., Gradstein, S. R., Celis, M.** (2019). Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Cabrera-Amaya, D.M. & López-Cruz, J.W.** (2019). Riqueza florística y estructura de la vegetación acuática y terrestre en el humedal El Salitre, Bogotá, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **43** (168): 508-517.
- Calixto-Flores, R.** (2012). Investigación en Educación Ambiental. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*. **17** (55): 1019-1033.
- Ceccon, E.** (2013). Restauración en Bosques Tropicales: fundamentos ecológicos, prácticos y sociales. Ediciones Díaz de Santos. 290 p.
- Cohen, E. & Franco, R.** (2005). Gestión social cómo lograr eficiencia e impacto en políticas sociales. CEPAL. Siglo veintiuno editores, S.A. de C.V. México D.F. ISBN 968-23-2543-3. 316 p.
- Cortés-Ballén, L. A.** (2018). Aproximación al paisaje de los humedales urbanos de Bogotá dentro de la estructura ecológica principal de la ciudad. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. **27** (1): 118-130. Doi: 10.15446/redg.v27n1.60584
- Díaz, A., Bonilla, M. A., Vargas, O.** (2004). Competencia entre pastos exóticos y plantas nativas: una estrategia para la restauración del bosque altoandino. *Acta Biológica Colombiana*. **9** (2): 103. Doi: 10.1016/j.jaci.2012.05.050

- Díaz-Espinosa A.M., Díaz-Triana J.E., Vargas, O.** (eds). (2012). Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá. Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá, D.C., Colombia. 248 p.
- Etter, A., Andrade, A., Saavedra, K., Amaya, P., Arévalo, P., Cortés, J., Pacheco, C., Soler, D.** (2020). Lista Roja de Ecosistemas de Colombia. https://iucnrl.org/static/media/uploads/references/published-assessments/Brochures/brochure_lre_colombia_v_2.0.pdf
- Fundación Natura (Natura).** (2015). Evaluación y seguimiento a veintidós proyectos de restauración, recuperación y/o rehabilitación del Distrito Capital. Programas de evaluación y seguimiento. Informe Ejecutivo final de monitoreo. Convenio 999 de 2013. Fundación Natura y Secretaría Distrital de Ambiente.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., Dixon, K. W.** (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*. **27** (S1): S1-S46.
- García-López, R. & García-Moreno, M.** (2010). La gestión para resultados en el desarrollo. Avances y desafíos en América Latina y el Caribe. En Banco Interamericano de Desarrollo (Segunda, Vol. 2). 225p.
- García-Ubaque, C. A., Ladino-Moreno, E. O., Zamudio-Huertas, E.** (2020). Exploratory Study on Wetlands Area Decrease in Bogotá due to Construction Activity: 1950-2016. *Revista Facultad de Ingeniería*. **29** (54): e10891. Doi: 10.19053/01211129.v29.n54.2020.10891
- Garzón, N. V., Córdoba, M.P., Gutiérrez, J.C.** (2014). Construcción participativa de estrategias de restauración ecológica en humedales del Magdalena Medio, Colombia: una herramienta para el ordenamiento ambiental territorial. *Biota Colombiana*. **15** (Supl. 2): 58-86.
- Guzmán, A., Hes, E., Schwartz, K.** (2011). Shifting governance modes in wetland management a case study of two wetlands in Bogotá, Colombia. *Environment and Planning C: Government and Policy*. **29**: 990-1003.
- Hammer, O., Harper, D.A.T., Ryan, P.D.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontología Electrónica*. (U.S.A.) **4** (1): 1-9.
- Herrick, J.E., Schuman, G.E., Rango, A.** (2006). Monitoring ecological processes for restoration projects. *Journal for Nature Conservation*. **14**: 161-171.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).** (2007). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Bogotá D.C, Colombia. 116 p.
- Lubell, M.N., Henry, A.D., McCoy, M.** (2010). Collaborative Institutions in an Ecology of Games. *American Journal of Political Science*. **54** (2): 287-300.
- Mahecha, G., Sánchez, F., Chaparro, J., Cadena, H., Tovar, G., Villota, L., Quintero, M.** (2010). Arbolado urbano de Bogotá: identificación, descripción y bases para su manejo. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá, DC, Secretaría Distrital de Ambiente, SDA-Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. 397 p.
- Martins, M., Farinha, L., Schoeninger, M., Yamaji, F.** (2003). Classificação ecológica das espécies arbóreas. *Revista Acadêmica: ciencias agrárias e ambientais*, Curitiba. **1** (2): 73.
- Mayorga, J.M.** (2016). El proceso de urbanización de los humedales de Kennedy en Bogotá, Colombia: una perspectiva normativa. *Papeles de Coyuntura*. **42**: 14-53.
- Murcia, C. & Guariguata, M.R.** (2014). La restauración ecológica en Colombia: tendencias, necesidades y oportunidades. Documentos Ocasionales 107. Bogor, Indonesia: CIFOR. 86 p.
- Ortegón, E., Pacheco, J.F., Prieto, A.** (2005). Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas. Publicación de las Naciones Unidas CEPAL. Santiago de Chile. 124 p.
- Palacio, D.** (2015). Redes, actores y gobernanza desde un enfoque relacional. En: Ungar, P. (Ed.) (2015). Hojas de ruta. Guías para el estudio socioecológico de la alta montaña en Colombia (pp ¿?). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.
- Palacio, D., Hurtado, R., Garavito, L.** (2003). Redes Socio-ambientales en tensión: el caso de la gestión ambiental de los humedales de Bogotá. *REDES-Revista hispana para el análisis de redes sociales*. **4** (6): 1-31.
- Palacio, D.C. & Hurtado, R.G.** (2005). Narrativas y redes de la gestión ambiental de los humedales de Bogotá. *Nómadas*. **22**: 140-150.
- Palacios-Gómez, J. L.** (2006). Las técnicas cualitativas de Investigación Social en la medición de la calidad de los servicios públicos: una aproximación teórica y metodológica. *Revista Barataria*. **4**: 85-100. Doi: 10.20932/barataria.v0i4.270

- Palla, G., Derényi, I., Farkas, I., Vicsek, T.** (2005). Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society. *Nature*. **435**: 814-818.
- Patiño, J. C.** (2014). Acciones comunitarias para la defensa y conservación de los humedales de Bogotá. En: Territorios Ambientales de Bogotá. (pp. 219-255). Historias de acción colectiva. <https://controlatugobierno.com/bibliografia/miguel-angel-julio-y-andres-hernandez-quinonez-eds-territorios-ambientales-de-bogota-historias-de-accion-colectiva-alcaldia-mayor-de-bogota-y-universidad-de-los-andes-cider-2014/>
- Pintos, P. & Sgori, A.** (2012). Efectos del urbanismo privado en humedales de la cuenca baja del río Luján, provincia de Buenos Aires, Argentina. Estudio de la megaurbanización San Sebastián. *AUGMDOMUS*. **4**: 25-48.
- Pita-Corredor, E.M., Niño-Rocha, N., Quiroz-Manrique, G. E.** (2015). Incidencia de la educación ambiental en la configuración de agentes políticos a partir de procesos de recuperación del humedal La Conejera (localidad Suba, Bogotá D.C.). *Revista Aletheia*. **7**: 44-67.
- Programa Bosques Andinos.** (2019). Orientaciones metodológicas para la restauración del paisaje forestal andino. HELVETAS Swiss Intercooperation Perú. Lima, Perú. 94 p.
- Quimbayo-Ruiz, G.A.** (2018). People and urban nature: the environmentalization of social movements in Bogotá. *Journal of Political Ecology*. **25**: 526-547.
- Ramírez, F. & Fennell, D.** (2014). A comprehensive framework for ecotourism and wetland restoration: the case of Bogotá, Colombia. *Journal of Ecotourism*. **13** (2-3): 128-151. Doi: 10.1080/14724049.2015.1011161
- Rodríguez-Linares, J. C., Chaparro-Herrera, S., Sua-Becerra, A., Echeverry-Galvis, M. Á.** (2019). Estado poblacional del cucarachero de pantano, *Cistothorus apolinari* (Passeriformes: Troglodytidae) en siete humedales de la Sabana de Bogotá, Colombia. *Revista de Biología Tropical*. **67** (6): 1257-1268. Doi: 10.15517/rbt.v67i6.35619
- Saeki, I.** (2007). Effects of tree cutting and mowing on plant species composition and diversity of the wetland ecosystems dominated by the endangered maple, *Acer pycnanthum*. *Forest Ecology and Management*. **242**: 733-746. Doi: 10.1016/j.foreco.2007.02.009
- Salazar-Suaza, D. & Quijano-Abril, M. A.** (2020). Análisis multitemporal y caracterización de la vegetación hidrófita y heliófita de un cinturón de humedales urbanos en el altiplano del Oriente antioqueño. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **44** (171): 639-651. Doi: 10.18257/raccefyn.1060
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA).** (2008). Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. Alcaldía Mayor de Bogotá. Primera Edición. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA).** (2018). Cobertura vegetal en humedales. Bogotá D.C. Plataforma Distrital de Datos Abiertos de Bogotá. <https://datosabiertos.bogota.gov.co/>
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA).** (2020). Convenio 594 de 2015 Colnodo. <https://oab.ambientebogota.gov.co/>
- Gann, G.D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C.R., Jonson, J., Hallett, J.G., Eisenberg, C., Guariguata, M.R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., González, E.K, Shaw, N., Decler, K., Dixon, K.W.** (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*. S1-S46
- Simbaqueba-Moreno, N.** (2016). Una aproximación a la nueva gestión pública en Bogotá. *Administración & Desarrollo*. **46** (2): 200-218.
- Standish, R. J., Hobbs, R. J., Miller, J. R.** (2013). Improving city life: Options for ecological restoration in urban landscapes and how these might influence interactions between people and nature. *Landscape Ecology*, **28** (6): 1213-1221. Doi: 10.1007/s10980-012-9752-1
- Swart, J.A.A., Van der Windt, H., Keulartz, J.** (2001). Valuation of nature in conservation and restoration. *Restoration Ecology*. **9** (2): 230-238.
- Van der Hammen, T. & González, E.** (1963). Historia del clima y de la vegetación del Pleistoceno superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá. *Boletín Geológico*. **XI** (1-3): 189-266.
- Van der Hammen, T., Stiles, G. F., Rosselli, L., Chisacá, M., Camargo, G., Guillot, G., Rivera, D.** (2008). Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos (Primera Ed; S. Secretaría Distrital de Ambiente, Ed.). Bogotá, D.C. Colombia: Imprenta Nacional. 296 p.
- Vargas O., Díaz, A., Trujillo, L., Velasco, P., Díaz, R., León, L., Montenegro, A.** (2007). Barreras para la restauración ecológica. (pp. 46-66). En: O. Vargas (ed). Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia – Colciencias.

-
- Vargas, J. O.** (2007). Guía Metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. En J. O. Vargas (Ed.), Grupo de Restauración Ecológica (Primera). Bogotá, D.C. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 189 p.
- Vargas, J. O.** (2011). Restauración Ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta Biológica Colombiana*. **16** (2): 221-246.
- Villa, H.M.** (2012). Importancia histórica y cultural de los humedales del borde norte de Bogotá (Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. **15** (1): 167-180.
- Wallace, K.J. & Clarkson, B.D.** (2019). Urban forest restoration ecology: a review from Hamilton, New Zealand. *Journal of the Royal Society of New Zealand*. **49** (3): 347-369. Doi: 10.1080/03036758.2019.1637352
- Wilson, J. B.** (1999). Guilds, Functional Types and Ecological Groups. *Oikos*. **86** (3): 507. Doi: 10.2307/3546655
- Zeunert, J.** (2013). Challenging Assumptions in Urban Restoration Ecology. *Landscape Journal*. **32** (2): 231-242. Doi: 10.3368/lj.32.2.231

Brief communication

Confirmation of *Homoeoneuria* Eaton, 1881 (Ephemeroptera: Oligoneuriidae) record in Colombia

Confirmación del registro de *Homoeoneuria* Eaton, 1881 (Ephemeroptera: Oligoneuriidae) en Colombia

✉ Laura L. Garzón-Salamanca^{1,*}, ✉ Dennis Castillo-Figueroa², ✉ Hernán Aristizábal-García¹

¹eQual Consultancy and Environmental Services, Bogotá DC, Colombia

²Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

Abstract

Homoeoneuria Eaton, 1881 is a genus of the Oligoneuriidae family whose geographical distribution remains poorly documented, especially in the Northern region of South America. Here we confirm the record of *Homoeoneuria* in Colombia, thus extending its distribution in South America beyond the records from Brazil, Peru, and Argentina. The confirmation was done on three nymphs from the department of Cesar found on sandy-silt sediments in the transition between the Andean and Caribbean regions.

Keywords: Aquatic insects; Distribution; Taxonomy; Mayflies.

Resumen

Homoeoneuria Eaton, 1881 es un género de la familia Oligoneuriidae, cuya distribución geográfica se encuentra poco documentada, especialmente en la región norte de Suramérica. Confirmamos aquí el registro del género *Homoeoneuria* en Colombia, con lo que su distribución en Suramérica se amplía con respecto a los registros conocidos en Brasil, Perú y Argentina. La confirmación se hizo en tres ninfas del departamento del Cesar halladas sobre sedimentos limo-arenosos en la transición de las regiones Andina y Caribe.

Palabras clave: Distribución; Efémeras; Insectos acuáticos; Taxonomía.

Introduction

Ephemeroptera is considered one of the most important groups of benthic macroinvertebrates in the Neotropics (Salles, *et al.*, 2004). Besides the occupation of many available meso-habitats contributing to their biomass and diversity in freshwater ecosystems, these insects are water quality indicators and have been widely used in biomonitoring studies (Roldán-Pérez, 2003; Springer, 2010; Forero-Céspedes & Reynoso-Flórez, 2013; Castillo-Figueroa, *et al.*, 2018). Although considerable progress has been made in the study of Ephemeroptera taxonomy along the Neotropical region (Gutiérrez & Reinoso-Flórez, 2010; Gutiérrez & Dias, 2015; Marín-Eslava, *et al.*, 2021; Molineri, *et al.*, 2021), more information is still needed regarding the biogeography of this order in South America (Domínguez, *et al.*, 2006).

Over 702 species have been reported in South America (Salles, *et al.*, 2021) and roughly 123 are found in Colombia (Salinas-Jiménez, *et al.*, 2017; Granados-Martínez, *et al.*, 2018; Marulanda-López, *et al.*, 2020; Marín-Eslava, *et al.*, 2021; Dias, *et al.*, 2021) with the families Leptophlebiidae, Leptohyphidae, and Baetidae as the more representative ones (more than the 65% of the species) (Salinas-Jiménez, *et al.*, 2012, 2017). However, uncommon families remain poorly known in terms of geographical distribution, especially in the Northern region of South America.

Citation: Garzón-Salamanca LL, Castillo-Figueroa D, Aristizábal-García H. Confirmation of *Homoeoneuria* Eaton, 1881 (Ephemeroptera: Oligoneuriidae) record in Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1219-1223, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1506>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**
Laura Leandra Garzón-Salamanca;
lauralgarzons@gmail.com

Received: June 25, 2021

Accepted: December 3, 2021

Published: December 15, 2021



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

One of these families is Oligoneuriidae with five genera and 13 species reported (Salles, *et al.*, 2018), three of which occur in Colombia (Marulanda-López, *et al.*, 2020). One of its genera is *Homoeoneuria* Eaton 1881, a taxon mainly distributed in North and Central America (Salles, *et al.*, 2018), which has two known subgenera: *Homoeoneuria*, found in Central and North America, with a record in Brazil (Salles, *et al.*, 2009), and *Notochora* in South America with *Homoeoneuria* (*N.*) *fitzkau* (Pescador & Peters, 1980) also present in Brazil. Recently, this genus has been reported in Peru (Miñano, *et al.*, 2019) and Argentina (Ignacio, 2019), but in Colombia, there was no confirmed evidence of the genus since the only existing record lacks specimens deposited in biological collections (García-Alzate, *et al.*, 2008). Here, we confirm the record of genus *Homoeoneuria* in Colombia based on three nymphs collected in the country's Northeastern Andes, in Torcoroma creek.

Materials and methods

The nymphs were found in Torcoroma creek, San Martín municipality, department of Cesar, in the transition between the Caribbean and Andean regions of Colombia. This creek is the main tributary of the town and it is used for crop irrigation purposes. Its source is located at an elevation of 650 m and descends to 50 m (Figure 1) (Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres - CMGRD, 2020). The sampling site (centroid of the area: 7°54'57.1"N- 73°36' 01.4"W) was located on turbid waters with moderate currents and mud on the right bank; the substrate consisted mainly of sand, herbaceous and shrub vegetation, and allochthonous material composed of sticks, branches, and roots.

Specimens were preserved in 70 % ethanol and deposited at the *Museo Javeriano de Historia Natural* in *Pontificia Universidad Javeriana* (Bogotá, Colombia) (MPUJ_ENT 0071132-0071123). For the taxonomic identification, we used a revision of the genus

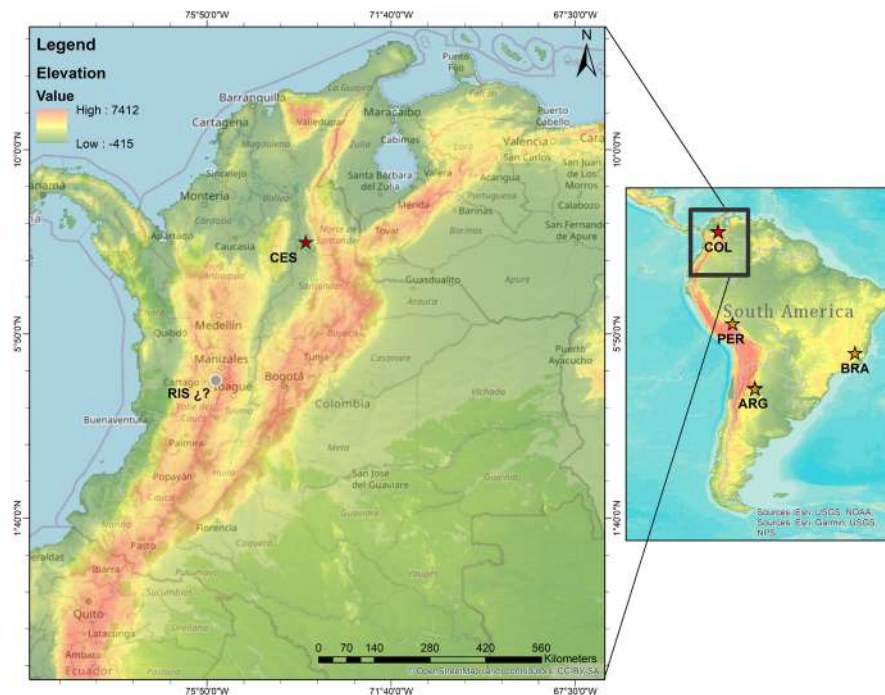


Figure 1. Record of *Homoeoneuria* in Colombia. Red star represents the new record of the genus in Cesar (Colombia) presented in this paper. Grey circle shows the dubious record in Risaralda reported by García-Alzate, *et al.* (2008) with no evidence. Orange stars indicate confirmed records of *Homoeoneuria* in South America

CES: Cesar (Colombia); RIS (Risaralda, Colombia); ARG: Argentina; BRA: Brasil; PER: Peru

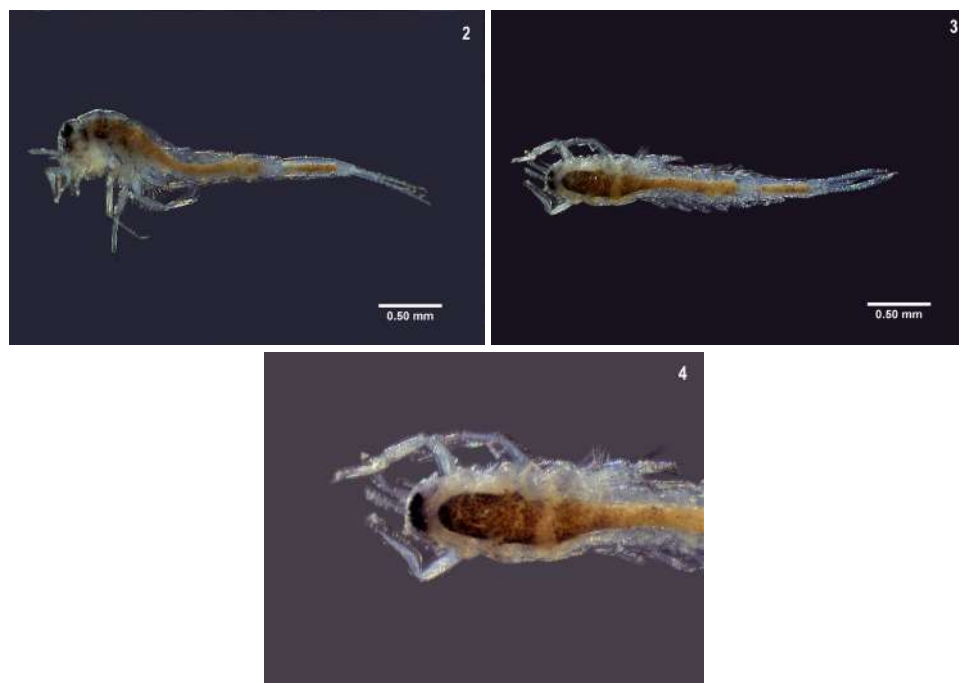
(Pescador & Peters, 1980), a recent key (Salles, *et al.*, 2018), and the confirmation of one expert in mayflies. The specimens were in the early stages (immature nymph), so identification at the species level was not possible. Measurements of body length and caudal filaments length were taken with the Image J software, v 1.8.0 (<https://imagej.nih.gov/ij/>) and the photographs with a Moticam camera attached to a stereomicroscope Motic SMZ-168TL. We registered means (\bar{x}), standard deviation (SD), and the minimum (Min) and maximum (Max) values for body length, caudal filaments, and total length of the three nymphs.

Results and discussion

We collected three specimens between November 2020 and January 2021 from sandy-silt sediments. This genus is commonly found on sandy substrates and warm rivers where it is well-adapted due to its modified middle and hind legs for digging, buried in small sand dunes in areas with river currents (Flowers & De La Rosa, 2010; Giberson, 2018).

We registered the following measurements for the specimens: total length: \bar{x} = 2.601, SD = 0.571, Min = 1.958, Max = 3.048 mm; body length: \bar{x} = 1.982, SD = 0.436, Min = 1.491, Max = 2.325 mm; caudal filaments length: \bar{x} = 0.618, SD = 0.134, Min = 0.467, Max = 0.723 mm. According to Salles, *et al.* (2018), *Homoeoneuria* can be recognized by its hypognathous head, abdominal segments with posterolateral projections restricted to segments VIII to IX, compound eyes almost contiguous, lanceolate, narrow gills, and enlarged mid and hind coxae. All these characters were observed in the specimens we found (Figures 2-4).

The confirmation of the Colombian record for *Homoeoneuria* updates the distribution of the genus in South America where most of the species have been reported in the North and Southeastern of Brazil (Salles, *et al.*, 2009) and recently, in Argentina (Ignacio, 2019) and Peru (Miñano, *et al.*, 2019). As the larvae we found were not at the last stage, we were not able to identify the species. It is also possible that they represent a new *Homoeoneuria* species since no adult-larvae relationship has been described before



Figures 2-4. *Homoeoneuria* larvae from San Martín, Cesar. 2. Lateral view; 3. Dorsal view; 4. Dorsal view of compound eyes. Pictures taken from the same specimen

in Colombian mayflies. Although **García-Alzate, et al.** (2008) reported this genus in a biological and physicochemical characterization of Otún River in the Cauca watershed (department of Risaralda) (**Figure 1**), there is no voucher deposited in biological collections nor photographs or any evidence of *Homoeoneuria* presented in their work. Moreover, as their research was focused on ecological relationships and biomonitoring, the taxonomic determination was not rigorous as the keys employed were inadequate for the identification of this genus, and the report was not confirmed by experts, which casts doubt about the scientific validity of the *Homoeoneuria* record in that study. In this sense, we encourage researchers to save specimens of new records in biological collections to preserve evidence to validate empirically the species found in our freshwater ecosystems. Previously, **Zúñiga, et al.** (2004) had suggested the possible presence of *Homoeoneuria* in Colombia based on existing South American records, which was now confirmed in Torcoroma creek. However, considering the substrate characteristics where this genus inhabits, we readily acknowledge that its occurrence in other regions of the country is highly possible.

Acknowledgments

We are greatly indebted to Dr. Carlos Molineri from the *Instituto de Biodiversidad Neotropical*, CONICET-UNT, Tucumán, Argentina, for confirming genus determination. We also want to thank the four reviewers and the editor for their comments and suggestions on the manuscript, which improved its quality.

Author contributions

LGS: identified the specimens, wrote the paper, prepared figures, and reviewed drafts of the paper; DCF: wrote the paper and reviewed its drafts; HAG: reviewed the drafts of the paper.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interests.

References

- Castillo-Figueroa, D., Garzón-Salamanca, L., Albarracín-Caro, J.** (2018). Aquatic macro-invertebrates as water quality bioindicators in Colombia: A systematic review. *Neotropical Biology and Conservation*. **13**: 235-248.
- Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD).** (2020). Plan municipal de gestión del riesgo de desastre. San Martín: Alcaldía municipal de San Martín. Accessed on: September 2, 2021. Available from: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/32401/PMGRD_SanMartinCesar_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Dias, L. G., Núñez-Avellaneda, M., Flowers, W.** (2021). First record of *Amanahyphes saguassu* Salles & Molineri (Ephemeroptera: Leptohiphidae) from Colombia and Perú. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **25**: 61-65.
- Domínguez, E., Molineri, C., Pescador, M., Hubbard, M., Nieto, C.** (2006). Ephemeroptera de América del sur. Biodiversidad Acuática en América Latina. Vol. 2. Sofía, Bulgaria: PENSOFT Publishers. 646 pp.
- Flowers, R. W. & De la Rosa, C.** (2010). Capítulo 4: Ephemeroptera. *Revista de Biología Tropical*. **58**: 63-93.
- Forero-Céspedes, A. M. & Reinoso-Flórez, G.** (2013). Estudio de la familia Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) en una cuenca con influencia de la urbanización y agricultura: río Alvarado-Tolima. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. **25**: 12-21.
- García-Alzate, C. A., Román-Valencia, C., Lopera, D., González, M., Simunovic, M.** (2008). Physico-Chemical and Biological Variables of San José Creek, Otún River Drainage/Upper Cauca, Colombia. *Revista de Investigaciones de la Universidad del Quindío*. **18**: 38-48.
- Giberson, D. J.** (2018). Crabwalkers and sand minnows: Searching for psammophilic mayflies in the central and western states (& provinces). *The Mayfly Newsletter*. **21**: 2-7.

- Granados-Martínez, C. E., Lasso, C. A., Fuentes-Reinés, J. M.** (2018). Primer registro del efemeroptero *Oligoneuria (Oligoneurioides) amazonica* (Demoulin, 1955) (Insecta: Ephemeroptera, Oligoneuriidae) para Colombia. *Biota Colombiana*. **19**: 60-64.
- Gutiérrez, Y., Díaz, Y.** (2015). Ephemeroptera (Insecta) de Caldas – Colombia, claves taxonómicas para los géneros y notas sobre su distribución. *Papéis Avulsos de Zoología*. **55**: 13-46.
- Gutiérrez, C. & Reinoso-Flórez, G.** (2010). Géneros de ninfas del orden Ephemeroptera (Insecta) del departamento del Tolima, Colombia: listado preliminar. *Biota Colombiana*. **11**: 23-32.
- Ignacio, E. J.** (2019). Tipología y caracterización de ríos permanentes de la provincia de Tucumán y áreas limítrofes. (Tesis doctoral). Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Naturales. 246 pp.
- Marulanda-López, J. F., Hernández, I. C., Gomes Dias, L., Salles, F.** (2020). New, additional and historical records of Leptophlebiidae (Insecta, Ephemeroptera) from Colombia. *Revista brasileira de Entomologia*. **64**: e20200063. <https://www.scielo.br/j/rbent/a/C6f7vHgBsFfLPq7GtzcRfRh/?lang=en>.
- Marín-Eslava, L. J., Zúñiga, M. del C., Dias, L. G.** (2021). Primer registro de *Campylocia araca* Gonçalves Salles (Ephemeroptera: Euthyplociidae) en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **45**: 541-545.
- Miñano, P., Olaya, M., Huamantínco, A. A.** (2019). Clave taxonómica de ninfas de Ephemeroptera (Insecta) del sudeste de Perú. *Revista Peruana de Biología*. **26**: 411-428.
- Molineri, C., Dias, L. G., del Carmen Zúñiga, M.** (2021). New insights into the phylogeny of *Tortopus* Needham and Murphy and *Tortopsis* Molineri (Ephemeroptera, Polymitarciidae) with description of three new species. *Arthropod Systematics & Phylogeny*. **79**: 151-170.
- Pescador, M. L. & Peters, W. L.** (1980). A revision of the genus *Homoeoneuria* (Ephemeroptera: Oligoneuriidae). *American Entomological Society*. **106**: 357-393.
- Roldán-Pérez, G.** (2003). La bioindicación de la calidad del agua en Colombia: uso del método BMWP/Col. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. 170 pp.
- Salinas-Jiménez, I. G., Dias, I. G., Bacca, T., Zúñiga, M. C., Rodríguez, M.** (2012). Primeros registros de Ephemeroptera (Insecta) para el departamento de Putumayo, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*. **16**: 198-208.
- Salinas-Jiménez, L. G., Rojas-Peña, J. I., Osorio-Ramírez, D. P., Caro-Caro, C. I.** (2017). New records of Ephemeroptera from the Colombian Orinoco River basin of the Meta department. *Revista Colombiana de Entomología*. **43**: 271-276.
- Salles, F. F., Da-Silva, E. R., Serrao, J. E., Francischetti, C. N.** (2004). Baetidae (Ephemeroptera) from Southeastern Brazil: New records and key to nymph genera. *Neotropical Entomology*. **33**: 725-735.
- Salles, F. F., Francischetti, C. N., Soares, E. D. G.** (2009). The presence of *Homoeoneuria* ss (Ephemeroptera: Oligoneuriidae) in South America with the description of a new species. *Zootaxa*. **2146**: 53-60.
- Salles, F. F., Domínguez, E., Molineri, C., Boldrini, R., Nieto, C., Dias, L. G.** (2018). Order Ephemeroptera. In: N. Hamada, J. H. Thorp, D. C. Rogers (Eds.), *Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates: Volume 3: Keys to Neotropical Hexapoda* (pp. 61-117). London, UK: Academic Press.
- Salles, F. F., Molineri, C., Nieto, C., Lima, L. R. C., Dias, L. G., Boldrini, R., Mariano, R., Domínguez, E.** (2021). Ephemeroptera da América do Sul. Accessed on: September 4, 2021. Available from: <http://ephemeroptera.com.br/lista/>
- Springer, M.** (2010). Capítulo 3: Biomonitorio acuático. *Revista de Biología Tropical*. **58**: 53-59.
- Zúñiga, M. C., Molineri, C., Domínguez, E.** (2004). El orden Ephemeroptera en Colombia. In: M. G. Andrade, G. Amad, F. Fernández (Eds.), *Insectos de Colombia* (pp. 17-42). Bogotá, Colombia: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Artículo original

Estudios electrónicos y electroquímicos del 2,2-bis[5'-(2'-carbonilfuranil)]propano

Electronic and electrochemical studies of 2,2-bis[5'-(2'-carbonylfuranyl)]propane

Esperanza Galarza

Grupo de investigación GISIOMCA, Departamento de Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Resumen

En este estudio se reporta la síntesis y caracterización del compuesto 2,2-bis[5'-(2'-carbonilfuranil)]propano (BCFP), el cual es un prototipo de bloque de construcción para la preparación de macrociclos, polímeros e, incluso, estructuras supramoleculares con diferentes aplicaciones. La síntesis del BCFP se llevó a cabo a través de la reacción de Vilsmeier-Haack del 2,2-bis(2'-furanil)propano usando *N,N*-dimetilformamida (DMF) y cloruro de fosforilo (POCl_3), con un 55 % de rendimiento. El compuesto exhibió una transición $n \rightarrow \pi^*$ característica de compuestos con átomos sp^2 que contienen pares libres no enlazantes. Mediante voltamperometría cíclica se evidenciaron dos procesos redox (reducción y oxidación) de naturaleza electroquímica y química irreversible. Los cálculos teóricos basados en la teoría del funcional de la densidad (*density functional theory*, DFT) corroboraron las transiciones electrónicas y los procesos redox. Los orbitales moleculares de frontera (HOMO y LUMO) fueron dominados por los grupos aldehído y los anillos de furano.

Palabras clave: Química supramolecular; Voltamperometría cíclica; Ligandos simétricos.

Abstract

The present study reports the synthesis and characterization of the compound 2,2-bis[5'-(2'-carbonylfuranyl)]propane (BCFP) which is a prototype of a building block for the preparation of macrocycles, polymers, and even supramolecular structures for different applications. The synthesis of BCFP was carried out through the Vilsmeier-Haack reaction of 2,2-bis(2'-furanil)propane using DMF and POCl_3 with a 55% yield. The compound exhibits an $n \rightarrow \pi^*$ transition characteristic of compounds with sp^2 atoms containing free nonbonding pairs. Likewise, cyclic voltammetry (CV) showed two irreversible redox processes (reduction and oxidation) which proved to be both electrochemically and chemically irreversible in nature. Theoretical calculations at the DFT level corroborated both electronic transitions and redox processes. The frontier molecular orbitals (HOMO and LUMO) were dominated by aldehyde groups and furan rings.

Keywords: Supramolecular chemistry; Cyclic voltammetry; Symmetric ligands.

Introducción

Desde el primer reporte de su síntesis presentado por Heinrich Limpricht (Limpricht, 1870), el furano ha sido un importante punto de partida para la síntesis de una gran cantidad de derivados industriales (Hoydonckx, *et al.*, 2007; Fauque, 1954) y moléculas de interés en química orgánica (Katritzky, *et al.*, 2010).

Los derivados de furano se conocen ampliamente como bloques de construcción para la preparación de polímeros (Gaitonde, *et al.*, 2014; Gandini & Belgacem, 1997; Moore, *et al.*, 1978; Moore & Kelly, 1978; Moore & Kelly, 1979; Moore & Kelly, 1984; Zeng, *et al.*, 2013) y su impacto en el desarrollo tecnológico agrícola y farmacéutico, así como en procesos sintéticos, se reconoce desde hace décadas (Peters, 1939).

Citación: Galarza E. Estudios electrónicos y electroquímicos del 2,2-bis[5'-(2'-carbonilfuranil)]propano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1224-1231, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1401>

Editor: Maria Ligia Sierra Garcia

Correspondencia:
Esperanza Galarza;
esperanza.galarza@correounivalle.edu.co

Recibido: 25 de febrero de 2021

Aceptado: 27 de agosto de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Dada su gran importancia sintética y aplicada, se emprendió la síntesis de un derivado de furano, específicamente el 2,2-bis[5'-(2'-carbonilfuranil)]propano (BCFP), utilizando la reacción de Vilsmeier-Haack. Este compuesto se presenta como un prototipo de molécula que podría emplearse como monómero en reacciones de polimerización y, gracias a su simetría, también como bloque de construcción en las estructuras metal-orgánicas (*metal-organic frameworks*, MOFs).

En el presente estudio se reporta la síntesis y caracterización del compuesto BCFP, cuyas propiedades electrónicas se estudiaron por espectroscopia UV-Vis, en tanto que las electroquímicas se analizaron por voltamperometría cíclica. Los resultados obtenidos se contrastaron con cálculos teóricos hechos con el programa Gaussian 16 usando el funcional B3LYP y una base 6-31+G (d,p). El objetivo fue resaltar la importancia de este compuesto como punto de partida en química supramolecular y explorar por primera vez las propiedades electrónicas y electroquímicas que permitan potenciar su utilidad.

Materiales y métodos

El seguimiento de las reacciones y la verificación de la pureza de los productos se hizo por cromatografía de capa delgada (CCD) empleando placas de gel de sílice 60F 254 con un espesor de 0,2 mm (Merck); como revelador se utilizó una lámpara Spectroline serie E con dos longitudes de onda, 254 y 363 nm. Los reactivos y solventes se adquirieron de las casas comerciales Sigma-Aldrich® y Merck® y se utilizaron sin purificación adicional. Los solventes eran de grado analítico y algunos se secaron según los protocolos establecidos.

Los puntos de fusión se determinaron con un fusímetro Stuart SMP3 o Barnstead Electrothermal modelo IA9300. Los espectros de infrarrojo (IR) se tomaron en un equipo FT-IR 8400 equipado con accesorio de ATR con punta de diamante. En un espectrómetro Bruker Ultrashield™ de 400 MHz, operado a 400 MHz para ¹H y 100 MHz para ¹³C, se capturaron los espectros de RMN utilizando como solvente CDCl₃-d. Además, se hicieron los experimentos bidimensionales HSQC, DEPT-135, HMBC, COSY y NOESY para verificar la naturaleza del producto.

La composición porcentual de los elementos de carbono e hidrógeno se determinó en un analizador elemental Thermo Flash EA 1112 Series y las mediciones de absorbancia se hicieron con un espectrofotómetro Pharma Spec Shimadzu JASCO V-730 UV-VIS. Los cálculos computacionales se hicieron con el programa Gaussian 16 usando el funcional B3LYP y una base 6-31+G (d,p). Las imágenes de orbitales moleculares de frontera se obtuvieron con la aplicación Gauss View 6.

Las pruebas de electroquímica se realizaron en un galvanostato potenciostato Metrohm Autolab PGSTAT302N utilizando como electrodo de trabajo carbón vítreo de 3 mm de diámetro, un alambre de platino como electrodo de conteo y un alambre de plata como electrodo de pseudoreferencia. Se agregó ferroceno sublimado como estándar interno para reportar los picos redox. Antes de iniciar las mediciones se dejó pasar un flujo de nitrógeno o argón (a través de la solución) para eliminar el oxígeno del medio. El comportamiento electroquímico se analizó mediante voltamperometría cíclica y de onda cuadrada (OSWV) empleando DMF previamente secada y hexafluorofosfato de tetrabutilamonio (*n*-Bu)₄NPF₆ como electrólito de soporte (0,1 M). Cada experimento se realizó a diferentes velocidades de barrido a partir de los 50 mV/s y hasta los 500 mV/s.

2,2-bis[5'-(2'-carbonilfuranil)]propano (BCFP)

Para la síntesis de este compuesto se siguió el protocolo reportado en la literatura (Chen & Wu, 2002). Se adicionó POCl₃ (1,2 equivalentes) gota a gota a una solución que contenía un equivalente de 2,2-di(2-furil)propano (TCI Chemicals) en 5 mL de DMF bajo atmósfera de nitrógeno en constante agitación y sobre un baño de hielo. Después de mezclados, se agitó la solución por 5 horas en un baño de agua a 50 °C hasta que la solución se tornó color vino tinto, punto en el cual se dejó enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente, se adicionaron gota a gota 10 mL de DMF y un (1) equivalente de POCl₃ a la solución en un baño de hielo. La reacción continuó durante 10 horas en un baño de agua a 50 °C que luego

se enfrió a temperatura ambiente y finalmente se vertió en agua-hielo. La mezcla resultante se neutralizó con hidróxido de sodio (NaOH) al 10 % y se dejó en reposo. Transcurridas 12 horas, se observó un sólido amarillo pálido que fue filtrado y recristalizado dos veces en etanol, resultando en un sólido blanco con un rendimiento del 55 %. RMN ^1H (CDCl_3 , 400 MHz) δ (ppm): 9.63 (s, 2H, CHO), 7.22 (d, $J=3.1$ Hz, 2H, ArH), 6.37 (d, $J=3.2$ Hz, 2H, Ar), 1.79 (s, 6H, CH_3). RMN ^{13}C (CDCl_3 , 100 MHz) δ (ppm): 26, 38, 108, 123, 152, 164, 178. IR (KBr) $\nu(\text{cm}^{-1})$: 1684, 1669 (C=O), 1374, 1361 (C-H), 1241, 968 (C-O-C). MS (EI) m/z 232, 217 (M-15). Punto de fusión: 91-93°C. Análisis elemental calculado para $\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{O}_4$: C 67,23 %, H 5,21 %, O 27,56 %. Experimental C 67,22 %, H 5,21 %, O 27,57 %.

Resultados y discusión

La reacción de Vilsmeier-Haack es una reacción de una amida sustituida con tricloruro de fosforilo y un areno activado. La reacción fue publicada por primera vez en 1927 por Anton Vilsmeier y Albrecht Haack (**Vilsmeier & Haack, 1927**) y desde entonces se ha utilizado ampliamente en la síntesis de aldehídos.

El BCFP se preparó a partir del compuesto comercial 2,2-di(2-furil)propano, el cual actúa como arilo activado (**Figura 1**). En el presente caso, la DMF fue una amina sustituida que reaccionó con el tricloruro de fosforilo para formar el ion cloroiminio (reactivo de Vilsmeier), el cual reaccionó a su vez con el 2,2-di(2-furil)propano (arilo activado) a través de una reacción de sustitución aromática electrofílica generando un ion iminio intermedio que luego se hidrolizó para obtener el compuesto objetivo. La reacción requirió ajustar el pH con NaOH (al 10 %) dado el aumento de acidez ocasionado por la presencia del subproducto protonado de la dimetilamina. Para garantizar que ambos anillos fueran formilados fue necesario prolongar la reacción y realizar dos adiciones de DMF y cloruro de fosforilo. El rendimiento de la reacción resultó aceptable (55 %), aunque ligeramente menor al reportado previamente (**Chen & Wu, 2002**). Cabe destacar que, a pesar de que la reacción de Vilsmeier-Haack es ampliamente conocida, en el caso de la síntesis del BCFP se requirieron múltiples ensayos debido al poco rendimiento producto de la no formilación paralela de los anillos. Al final del protocolo empleado se introdujo una modificación al reportado en la literatura (**Chen & Wu, 2002**), con la cual se obtuvo el mejor rendimiento.

Los espectros de RMN (^1H y ^{13}C) (**Figura 2**) mostraron las señales esperadas para el compuesto. Debido a su simetría, se observaron cuatro señales en el RMN protónico: la primera, un singulete que integra para dos protones, se localizó en las 9,63 ppm, lo que es típico de los aldehídos. La segunda señal, un doblete que apareció en las 7,22 ppm, integra para dos protones con una constante de acoplamiento J de 3.1 Hz y correspondió al protón 4 del anillo furano (marcado con un punto verde). Una tercera señal se observó en 6,37 ppm, que integra para dos protones con una constante de acoplamiento J de 3.2 Hz, y correspondió al protón 3 del anillo furano (señalado en rojo en la figura). Por último, en el campo de arriba se observó un singulete que integra para seis protones, el cual se asignó a los protones metílicos. Asimismo, el RMN ^{13}C (**Figura 2**) evidenció las 7 señales esperadas del compuesto BCFP. La asignación de dichas señales, así como las de RMN ^1H , se basaron en los resultados bidimensionales (COSY, HMBC, DEPT 135) de la RMN.

El espectro UV-Vis se tomó en cloroformo (**Figura 3**). Se observó una absorción principal en los 293 nm, con un hombro en los 276 nm. Dichas absorciones se desplazaron hipsocrómicamente al aumentar la polaridad del solvente (metanol), efecto debido

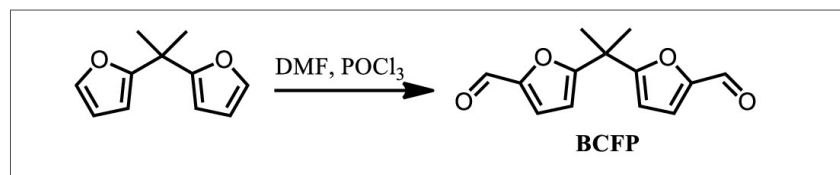


Figura 1. Síntesis del 2,2-bis[5'-(2'-carbonilfuranil)]propano a partir de DMF y POCl₃

al incremento en la solvatación del par electrónico libre de los oxígenos de las unidades furano (el otro par hace parte de la resonancia del anillo), lo cual tiene como consecuencia la disminución de la energía del orbital n. La transición de un electrón al orbital π^* produjo un estado excitado, cuyo nivel de energía no se vio afectado por el enlace de hidrógeno entre el metanol o los oxígenos. De esta forma, la energía asociada a la transición $n \rightarrow \pi^*$ se incrementó (reducción en la energía del orbital n). Por su parte, el hombro observado a 276 nm se asoció con la absorción de los grupos formilo laterales y exhibió el mismo fenómeno.

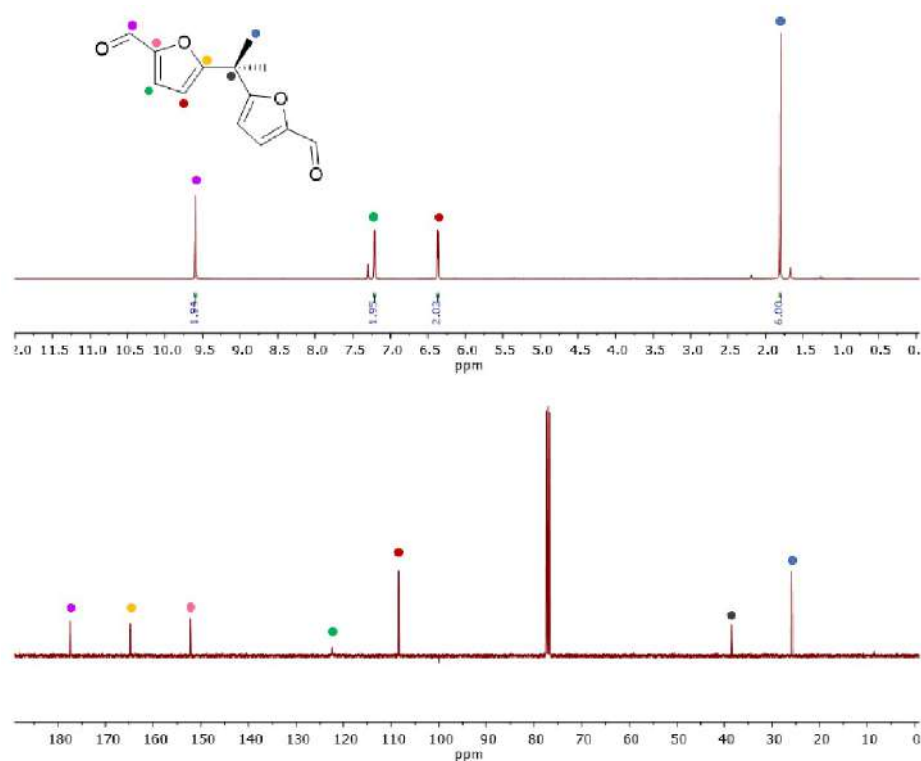


Figura 2. (Arriba) Espectro de RMN ^1H (CDCl_3 , 400 MHz). (Abajo) Espectro de RMN ^{13}C (CDCl_3 , 100 MHz)

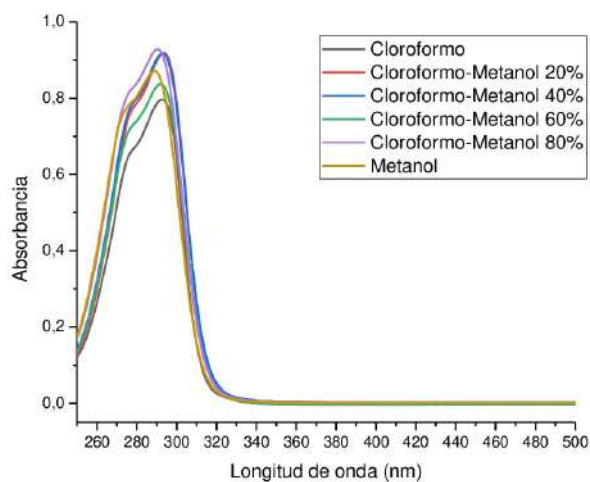


Figura 3. Espectro de absorción UV-Vis del compuesto BCFP en cloroformo y gradientes del solvente cloroformo-metanol

Se optimizó, asimismo, la geometría de la molécula BCFP utilizando el programa Gaussian 16 (Frisch, *et al.*, 2016) con el funcional B3LYP y la base 6-31+G (d,p). Como estructura de entrada se utilizaron los datos cristalográficos reportados por Gaitonde, *et al.* (2014) para una molécula similar. Los cálculos sirvieron para estimar las energías de los orbitales moleculares de frontera HOMO y LUMO (Figura 4), con el fin de correlacionar sus superficies con los resultados obtenidos por medidas electroquímicas y de UV-Vis.

La unidad básica del compuesto BCFP es el furfural, el cual tiene múltiples aplicaciones a nivel industrial y de química fina (Eseyinc & Steele, 2015). Sus propiedades electroquímicas ya se conocen y muchas de sus aplicaciones se centran en la oxidación a ácido furoico u otros ácidos derivados. Asimismo, la reducción del furfural permite la obtención del alcohol furfural (Mariscal, *et al.*, 2016; da Silva, *et al.*, 2017). En este sentido, se esperaba un comportamiento similar en el compuesto analizado en el presente estudio, con orbitales moleculares de frontera de una densidad electrónica localizada principalmente sobre los anillos de furano y los aldehídos. Los grupos metílicos actuaron como donantes de densidad electrónica, de ahí su baja contribución al orbital LUMO. Los anillos furano en el compuesto BCFP poseen seis electrones π deslocalizados entre los cinco átomos que conforman el anillo, siendo un compuesto aromático π excedente, por lo que se esperaba que el comportamiento electroquímico del compuesto estuviera gobernado por estas características electrónicas. Tal comportamiento también se observó en la UV-Vis, en la que la principal transición electrónica se debe al anillo furano con un hombro producto de transiciones en los grupos carbonilo de los aldehídos. La voltamperometría cíclica ha sido una técnica electroquímica ampliamente utilizada para entender los mecanismos y propiedades oxidativas o reductivas frente a procesos de transferencia de carga tanto en compuestos orgánicos como inorgánicos. Los procesos catódicos y anódicos del compuesto BCFP se muestran en las Figuras 5-7.

El compuesto BCFP exhibió un potencial de oxidación a 0,87 V, irreversible desde el punto de vista electroquímico, ya que no se observó una onda de reducción al escanear en la dirección catódica (Figura 5), lo que es indicativo de que el compuesto sufre un proceso químico que degrada o convierte la molécula en otra especie no activa dentro de la ventana de potencial de trabajo.

Cuando se aumentó la velocidad de escaneo de 50 mV/s a 500 mV/s, se observó un aumento en la intensidad de corriente para el proceso de oxidación (Figura 6) debido a que el aumento de la velocidad de escaneo disminuye el grosor de la capa de difusión en la interfase electrodo-solución. También se observó un evento reductivo, de baja intensidad, alrededor de los -0,15 V, más notorio al aumentar la velocidad de escaneo, lo cual es indicativo de que el comportamiento electroquímico de este compuesto en potenciales

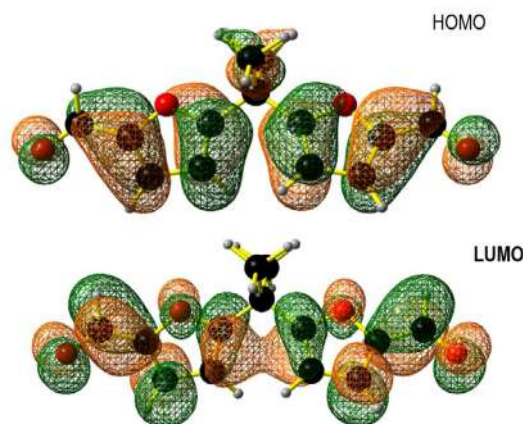


Figura 4. Representación tridimensional del HOMO (arriba) y LUMO (abajo) calculados para la molécula BCFP. Paquete gráfico: Gaussian View. Cálculos llevados a cabo con Gaussian 16 usando el funcional B3LYP y la base 6-31+G (d,p)

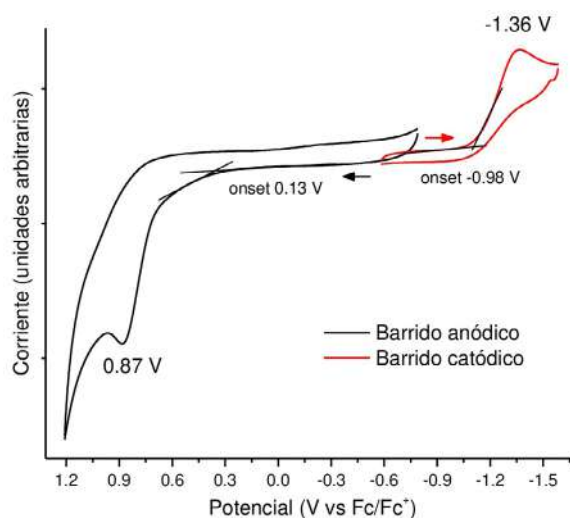


Figura 5. Voltamperograma cíclico del compuesto BCFP. Solución de 0,1 M de (n-Bu)₄NPF₆ en DMF. Se usaron carbón vítreo como electrodo de trabajo, alambre de plata como pseudo-referencia y alambre de platino como electrodo de conteo. Velocidad de escaneo: 100 mV/s

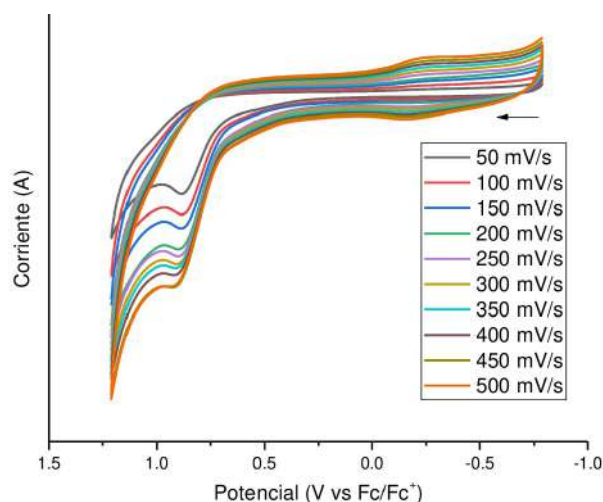


Figura 6. Voltamperograma cíclico (escaneo anódico a diferentes velocidades) del compuesto BCFP. Solución de 0,1 M de (n-Bu)₄NPF₆ en DMF. Se emplearon carbón vítreo como electrodo de trabajo, alambre de plata como pseudo-referencia y alambre de platino como electrodo de conteo

anódicos es una combinación de una transferencia electrónica lenta y una reacción química rápida. Por último, el análisis de la ecuación de Randles–Sevcik evidenció que la intensidad de corriente (i_p) no comportaba una dependencia lineal con la raíz cuadrada de la velocidad de escaneo ($v^{1/2}$) y tampoco se encontró relación lineal entre i_p y v , por lo cual se presumió que el proceso de transferencia electrónica ocurrió a través de especies adsorbidas a la superficie del electrodo.

En el caso del escaneo en potenciales catódicos, el compuesto BCFP exhibió una reducción electroquímica y químicamente irreversible. El aumento en la velocidad de escaneo no reflejó una reversibilidad, por lo menos apreciable, en el rango de las velocidades de escaneo utilizadas (**Figura 7**), y en la oxidación tampoco se observó una dependencia lineal de la corriente de pico con la velocidad de escaneo o su raíz cuadrada ni la presencia de pre-picos que pudieran sugerir procesos de adsorción evidentes.

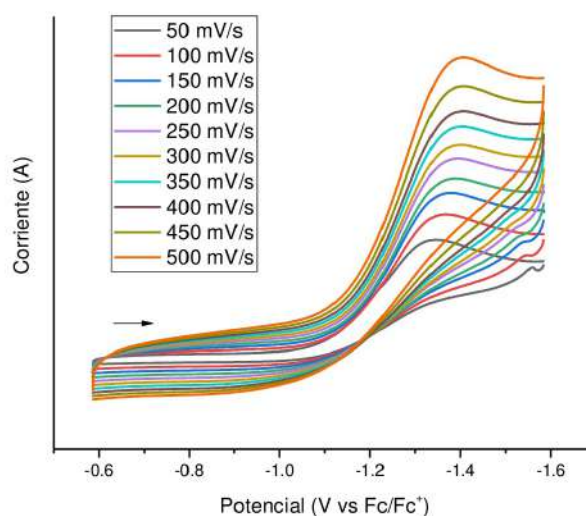


Figura 7. Voltamperograma cíclico (escaneo catódico a diferentes velocidades) del compuesto BCFP. Solución de 0,1 M de (n-Bu)4NPF6 en DMF. Se emplearon carbón vítreo como electrodo de trabajo, alambre de plata como pseudo-referencia y alambre de platino como electrodo de conteo

Al analizar la información electroquímica del compuesto BCFP, se observó que la intensidad de la onda de reducción fue mucho mayor que la del pico de oxidación, lo que lleva a pensar que el número de electrones involucrados en cada proceso es diferente y que, al comparar la intensidad de los picos y sus áreas, podrían representarse como dos procesos redox con diferente número de electrones involucrados: el primero, una oxidación en la que se abstrae un electrón para generar un catión radical, y la segunda, una reducción que involucra la transferencia de dos electrones (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1401/3133>). En ambos casos las especies resultantes reaccionaron químicamente de manera rápida y de ahí la irreversibilidad observada.

Gracias a la correlación entre los cálculos DFT y los voltamperogramas, en los que se observó en el LUMO una mayor localización en los carbonilos, en tanto que en los HOMO la localización estuvo sobre los anillos (Figura 4), se propone que la reducción ocurre sobre los aldehídos, lo que posiblemente conlleva a que estos pasen a formar alcoholes si hay trazas de agua o acidez en el medio. En el caso de la oxidación, esta se llevaría a cabo principalmente sobre el anillo furano, generando un radical catión con subproductos no activos electroquímicamente en la ventana de potencial en que se trabajó.

Los resultados obtenidos muestran que la molécula BCFP es termodinámicamente estable ($\Delta E = 2,23$ V), con transiciones electrónicas principalmente en la región ultravioleta y una química rigida por los grupos aldehído y la π -excedencia de los anillos aromáticos. Estas características lo sitúan como un buen candidato a bloque de construcción de arquitecturas supramoleculares. Por ejemplo, la reacción del BCFP con dos equivalentes de la 2-hidracinopiridina resultaría en un ligando ditópico tridentado, asemejando en cada extremo el bolsillo de una terpiridina. Este tipo de ligandos pueden aprovecharse para formar rejillas moleculares al coordinar iones metálicos (de coordinación octaédrica o tetraédrica).

Conclusiones

Se preparó un compuesto dialdehído simétrico (BCFP) basado en dos anillos de furano interconectados por un grupo metileno. La metodología de síntesis se basó en la reacción de Vilsmeier-Haack. El compuesto se caracterizó mediante resonancia magnética nuclear (^1H y ^{13}C), FT-IR, espectrometría de masas, análisis elemental, espectroscopia UV-Vis, voltamperometría cíclica y cálculos computacionales a nivel de DFT. Los procesos electro-químicos que sufrió el compuesto fueron irreversibles al igual que las

reacciones químicas que siguieron. Los datos de corriente de pico *versus* velocidad de escaneo sugieren que los procesos de transferencia de carga son mediados a través de especies adsorbidas.

Agradecimientos

Al profesor Manuel N. Chaur del departamento de Química de la Universidad del Valle, por su aporte a las discusiones sobre el estudio electroquímico del compuesto y otros en perspectiva.

Información suplementaria

Figura 1S. Procesos redox observados para el BCFP. Ver figura 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1401/3133>

Conflicto de intereses

La autora declara no tener ningún conflicto de intereses con respecto a este estudio.

Referencias

- Chen, Z.-H. & Wu, C.-T.** (2002). Synthesis of Schiff's base macrocyclic compounds containing furan ring. *Chinese Journal of Organic Chemistry*. **22** (8): 582-586.
- da Silva, J. L., Beloumini, M. A., Stradiotto, N. R.** (2017). Cathodic electrochemical determination of furfural in sugarcane bagasse using an electrode modified with nickel nanoparticles. *Analytical Methods*. **9** (5): 826-834.
- Eseyin, A. E. & Steele, P. H.** (2015). An overview of the applications of furfural and its derivatives. *International Journal of Advanced Chemistry*. **3** (2): 42-47.
- Fauque, L. L. J.** (1954). U.S. Patent 2,681,917.
- Frisch, N. M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., Scuseria, G. E., Robb, M. A., Cheeseman, J. R., Fox, D. J.** (2016). Gaussian 16, Revision B.01, Gaussian, Inc., Wallingford CT.
- Gaitonde, V., Lee, K., Kirschbaum, K., Sucheck, S. J.** (2014). Bio-based bisfuran: synthesis, crystal structure, and low molecular weight amorphous polyester. *Tetrahedron Letters*. **55**: 4141-4145.
- Gandini, A. & Belgacem, M. N.** (1997). Furans in polymer chemistry. *Progress in Polymer Science*. **22** (7): 1203-1379.
- Hoydonckx, H. E., Van Rhijn, W. M., Van Rhijn, W., De Vos, D. E., Jacobs, P. A.** (2007). Furfural and Derivatives. En *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH. Doi: 10.1002/14356007.a12_119.pub2
- Katritzky, A. R., Ramsden, C. A., Joule, J. A., Zhdankin, V. V.** 3.3 - Reactivity of Five-Membered Rings with One Heteroatom, Editor(s): Alan R. Katritzky, Christopher A. Ramsden, John A. Joule, Viktor V. Zhdankin. *Handbook of Heterocyclic Chemistry* (Third Edition), Elsevier, 2010, p. 383-472, ISBN 9780080958439. Doi: 10.1016/B978-0-08-095843-9.00009-4
- Limpricht, H.** (1870). Ueber das Tetraphenol C₄H₄O. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*. **3** (1): 90-91.
- Mariscal, R., Maireles-Torres, P., Ojeda, M., Sádaba, I., López-Granados, M.** (2016). Furfural: a renewable and versatile platform molecule for the synthesis of chemicals and fuels. *Energy & Environmental Science*. **9** (4): 1144-1189.
- Moore, J. & Kelly, J. E.** (1978). Polyesters Derived from Furan and Tetrahydrofuran Nuclei. *Macromolecules*. **11** (3): 568-573.
- Moore, J. & Kelly, J. E.** (1978). Thermally initiated crosslinking of an unsaturated heterocyclic polyester. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. **16** (9): 2407-2409.
- Moore, J. & Kelly, J. E.** (1979). Polymerization of furandicarbonyl chloride with bisphenol A poly(2,5-furandiylcarbonyloxy-1,4-phenylenedimethylmethylene-1,4-phenyleneoxycarbonyl). *Polymer*. **20** (5): 627-628.
- Moore, J. & Kelly, J. E.** (1984). Polyhydroxymethylfuroate [poly(2,5-furandiylcarbonyloxy methylene)]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. **22** (3): 863-864.
- Peters, F. N. Jr.** (1939). Industrial Uses of Furans. *Industrial and Engineer Chemistry*. **31** (2): 178-180.
- Vilsmeier, A. & Haack, A.** (1927). Über die Einwirkung von Halogenphosphor auf Alkyl-formanilide. Eine neue Methode zur Darstellung sekundärer und tertiärer p-Alkylamino-benzaldehyde. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft zu Berlin*. **60** (1): 119-122.
- Zeng, C., Seino, H., Ren, J., Hatanaka, K., Yoshie, N.** (2013). Bio-Based Furan Polymers with Self-Healing Ability. *Macromolecules*. **46** (5): 1794-1802.

Original article

Using a warm dioxane/MeOH/NaBH₄ mixture as convenient medium for the selective chemical reduction of the C=C double bond in α,β -unsaturated systems

Uso de una mezcla dioxane/MeOH/NaBH₄ en caliente como un medio conveniente para la reducción química selectiva del doble enlace C=C en sistemas α,β -insaturados

Rodrigo Abonia^{1,*}, Andrés C. García²

¹Research Group of Heterocyclic Compounds, Department of Chemistry, Universidad del Valle, Cali, Colombia
²Department of Chemistry, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Possession article for admission as corresponding member to Rodrigo Abonia at Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Abstract

Diversely substituted Knoevenagel products were subjected to reduction with NaBH₄ in MeOH/*p*-dioxane solution at 70 °C. Selectively reduction of their C=C double bond was achieved in all cases. Reduction conditions tolerated a variety of functional groups although simple aldolic or Claisen-Schmidt products showed to be less selective toward C=C reduction and on the contrary C=O bond was reduced under these reaction conditions. Additionally, selectivity of the NaBH₄-mediated chemical reduction was compared with the classical Raney-Nickel-mediated catalytic hydrogenation in order to find similarities and differences. Moreover, trying to explain the selective NaBH₄-mediated reductive process a plausible mechanistic pathway was proposed in this regard.

Keywords: Chalcones; Knoevenagel products; α,β -Unsaturated systems; Selective reductions; NaBH₄-mediate reductions; Catalytic hydrogenation.

Resumen

Productos de Knoevenagel diversamente sustituidos fueron sometidos a reducción con una solución de NaBH₄ en MeOH/*p*-dioxano a 70 °C. A través de este proceso, se alcanzó la reducción selectiva de sus dobles enlaces C=C en todos los casos. Las condiciones de reducción establecidas toleró una variedad de grupos funcionales, aunque productos simples de condensación aldólica o de Claisen-Schmidt mostraron menos selectividad hacia la reducción del doble enlace C=C, y por el contrario, condujo específicamente a la reducción de los grupos C=O. Adicionalmente, la selectividad de nuestras condiciones de reducción mediadas por NaBH₄ fue comparada con la clásica hidrogenación catalítica mediada por Raney-Nickel para encontrar algunas similitudes y diferencias. Así mismo, se propuso una secuencia de pasos mecanísticos, con el fin de intentar explicar el proceso de reducción selectiva mediada por NaBH₄.

Palabras clave: Chalconas; Productos de condensación de Knoevenagel; Sistemas α,β -insaturados; Reducciones selectivas; Reducciones mediadas por NaBH₄; Hidrogenación catalítica.

Introduction

The control of the selectivity remains as one of the main concerns in the synthetic organic chemistry (Balcells, *et al.*, 2016; Ward, 1999). Particularly, selective reduction of C=C double bonds in the presence of carbonyl and carboxyl functionalities (in α,β -unsaturated systems), is frequently a challenging aspect in synthetic organic strategies. For that, several approaches have been reported in that direction with varied grades of success (Cornubert

Citation: Abonia R, García AC. Using a warm dioxane/MeOH/NaBH₄ mixture as convenient medium for the selective chemical reduction of the C=C double bond in α,β -unsaturated systems. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1232-1245, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1465>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**
Rodrigo Abonia;
rodrigo.abonia@correounivalle.edu.co

Received: May 11, 2021

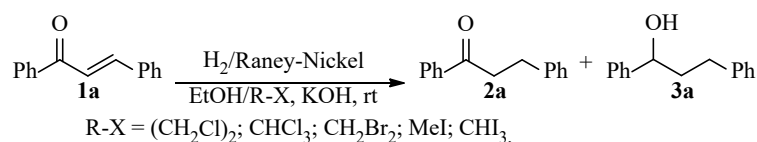
Accepted: September 3, 2021

Published: December 15, 2021



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

& Eggert, 1954; Cornubert & Thomas, 1954; Hammond, *et al.*, 2009; Inoue, *et al.*, 2002; Chikashita, *et al.*, 1987; Felpin & Fouquet, 2010; Gutierrez, *et al.*, 2010; Zheng, *et al.*, 2015; Keess & Oestreich, 2017; Mori, *et al.*, 2006; Lipshutz, *et al.*, 1998; Wang, *et al.*, 2016). In a classical procedure described by Cornubert *et al.*, the selective reduction of the C=C double bond in the α,β -unsaturated ketone (chalcone) **1a** was performed by means of a catalytic hydrogenation process in EtOH mediated by Raney-Nickel poisoned with halo-alkanes (R-X). Nevertheless, appreciable formation of the double-reduction side-product (i.e. saturated alcohol **3a**) also accompanied this process, Scheme 1 (Cornubert & Eggert, 1954; Cornubert & Thomas, 1954). When reaction was performed in absence of halo-alkanes, the double-reduction side-product **3a** was obtained exclusively (Tucker, 1950).



Scheme 1. Attempts to selective reduction of the C=C double bond in chalcone **1a** by catalytic hydrogenation using Raney-Nickel poisoned with halo-alkanes (R-X).

A modification to the above approach was performed by Hammond, *et al.*, replacing the reducing couple H_2 /Raney-Nickel by ammonium formate/Pd/C, affording the expected product **2a** in better yield (Hammond, *et al.*, 2009). Alternatively, NaBH_4 -based chemical reductions have also been performed but in most cases the carbonyl or both carbonyl and C=C double bond functionalities resulted in reduction (Zeynizadeh & Shirini, 2003; Aramini, *et al.*, 2000; Mohamadi, *et al.*, 2013).

As part of our current program on the synthetic utilization of chalcones and their analogues for the synthesis of diverse heterocyclic compounds (Insuasty, *et al.*, 2017; Ramírez-Prada, *et al.*, 2017; Montoya, *et al.*, 2016; Insuasty, *et al.*, 2016), herein, we wish to report two complementary approaches for the preparation of diverse α,β -reduced derivatives of synthetic interest mediated by the selective (catalytic and chemical) reduction of their α,β -C=C double bonds starting from their corresponding α,β -unsaturated precursors.

Materials and Methods

Melting points were determined on a Stuart SMP10 melting point apparatus and are uncorrected. FTIR spectra were recorded on a Shimadzu FTIR 8400 ATR technique. ^1H and ^{13}C NMR spectra were recorded on a Bruker Avance 400 spectrophotometer operating at 400 MHz and 100 MHz respectively, using CDCl_3 and $\text{DMSO}-d_6$ as solvents and tetramethylsilane (TMS) as internal standard. Mass spectra were run on a SHIMADZU-GCMS-QP-2010 Plus spectrometer (equipped with a direct inlet probe) operating at 70 eV. The starting indole was purchased from Merck (analytical grade reagent), and was used without further purification. The starting *N*-alkylindoles (i.e. 1-methyl, 1-butyl and 1-benzyl) were synthesized by *N*-alkylation reaction using iodomethane, 1-bromobutane and benzyl chloride, following the procedures described by (Kong, *et al.*, 2006). Synthetic details for the new and some representative known compounds are described as follow:

Selective reduction of the α,β -unsaturated C=C double bonds in chalcones 1 by catalytic hydrogenation

A mixture of chalcone **1** (1 gram), ethanol (5-10, mL), chloroform or DCM (0.5 mL) and Raney-Nickel (0.3 g) was stirred at room temperature under hydrogen pressure (20 psi) in a Parr apparatus for 15-20 min. The solid formed was completely dissolved by adding the adequate volume of ethyl acetate, the catalyst was removed by filtration and product recovered after removing the solvent mixtures under reduced pressure. No further purification was required to afford hydrogenated ketones **2**.

Synthesis of 1-methyl-1H-indole

In a 15 mL round-bottom flask, NaH (2 mmol) was added to a cold (0 °C) stirred solution of indole (1.0 mmol) in THF (5 mL). After 25 min, iodomethane (1.4 mmol) was added at 0 °C and the mixture was stirred at room temperature for 3 h. The solution was then quenched with a saturated solution of ammonium chloride (4 mL), and extracted with ethyl acetate (2 x 5 mL). The organic layers were combined, washed with brine, dried over anhydrous MgSO₄, and concentrated under reduced pressure. The resulting oil was purified by flash chromatography (eluent: hexane/dichloromethane 40%), to provide the corresponding product as a yellow oil in 98% yield. FTIR (ATR): $\nu = 3010$ (C-H), 2946 (C-H), 2929 (C-H), 2900 (C-H), 2842 (C-H), 1570 (C=C), 1550 (C=C) cm⁻¹.

General procedure for the synthesis of 1-benzyl- and 1-butyl-1H-indoles

Triturated KOH (1.5 g, 27.3 mmol, 3.2 equiv) was added to a stirred solution of indole (1.0 g, 8.53 mmol, 1 equiv) in acetone (15 mL). After 20 min of stirring benzyl chloride (1.73 g, 13.6 mmol, 1.6 equiv) was added. The solution was stirred at room temperature until the indol was no longer detected by TLC. The insoluble materials were removed by filtration, and the acetone was concentrated under reduced pressure. The resulting oil was purified by flash chromatography (eluent: hexane/dichloromethane 1:1). The same procedure was followed by using 1-bromobutane instead benzyl chloride.

1-Benzyl-1H-indole. Yellow oil, 86 % yield. FTIR (ATR): $\nu = 3005$ (C-H), 2940 (C-H), 2889 (C-H), 1585 (C=C), 1560 (C=C) cm⁻¹. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): $\delta = 5.40$ (s, 2H, CH₂Ph), 6.68 (d, $J = 3.0$ Hz, 1H), 7.05 – 7.53 (m, 9H), 7.79 (d, $J = 7.7$ Hz, 1H) ppm. ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): $\delta = 50.2$ (CH₂Ph), 101.8, 109.8, 119.6, 121.1, 121.8, 126.9, 127.7, 128.3, 128.8 (Cq), 128.9, 136.4 (Cq), 137.7 (Cq) ppm.

1-Butyl-1H-indole. Yellow oil, 82 % yield. FTIR (ATR): $\nu = 3007$ (C-H), 2956 (C-H), 2929 (C-H), 2872 (C-H), 1609 (C=C), 1483, 1463, 1456, 1315, 1242, 1199, 1012, 734, 713 cm⁻¹. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): $\delta = 1.11$ (t, $J = 8.4$ Hz, 3H, CH₃), 1.51 (m, $J = 15.1$, 7.4 Hz, 2H, CH₂), 1.97 (m, $J = 7.3$ Hz, 2H, CH₂), 4.25 (t, $J = 7.1$ Hz, 2H, CH₂), 6.68 (s, 1H, =C-H), 7.24 (d, $J = 2.8$ Hz, 1H, ArH), 7.29 (t, $J = 6.7$ Hz, 1H, ArH), 7.40 (t, $J = 6.0$ Hz, 1H, ArH), 7.52 (d, $J = 8.2$ Hz, 1H, ArH), 7.83 (d, $J = 7.8$ Hz, 1H, =C-H) ppm. ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): $\delta = 13.9$ (CH₃), 20.4 (CH₂), 32.5 (CH₂), 101.0, 46.2 (CH₂), 109.6, 119.3, 121.1, 121.4, 127.9, 128.7 (Cq), 136.1 (Cq) ppm.

General procedure for the synthesis of indole-oxo-propanenitriles

These compounds were obtained by adapting procedures described previously by (Fadda, *et al.*, 2014; Cai, *et al.*, 2018; Chen, *et al.*, 2013). In a 25 mL round-bottom flask coupled with a condenser and stir bar, a mixture of the corresponding indole (1.0 mmol), cyanoacetic acid (1.2 mmol) and acetic anhydride (2-3 mL) was stirred under heating in an oil bath at 105 °C for 1.5 h. During this time, the initial yellow solution turned dark-red and a precipitate was observed. After complete consumption of the starting indole (monitored by TLC), the solution was cooled to 0 °C overnight. The precipitate was filtrated and washed with methanol (2 x 1.0 mL). No further purification was required in any case.

3-(1H-Indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile. This compound was obtained according to the above procedure from indole as beige solid, 79% yield, mp 243 °C. FTIR (KBr): $\nu = 3225$ (N-H), 2253 (CN), 1643 (C=O), 1581 (C=C) cm⁻¹. ¹H NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆): $\delta = 4.47$ (s, 2H, CH₂), 7.19-7.27 (m, 2H), 7.47-7.52 (m, 1H), 8.10-8.16 (m, 1H), 8.36 (s, 1H), 12.14 (s, 1H, NH) ppm. MS (70 eV): m/z (%) = 184 (23) [M]⁺, 144 (100), 116 (27), 89 (26).

3-(1-Methyl-1H-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile. This compound was obtained according to the above procedure from 1-methyl-1H-indole as a brown solid, 73% yield, mp 153 °C. FTIR (ATR): $\nu = 3110$ (C-H), 2250 (CN), 1643 (C=O), 1581 (C=C) cm⁻¹. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): $\delta = 3.88$ (s, 2H, CH₂), 3.90 (s, 3H, CH₃), 7.31–7.48 (m, 3H), 7.81 (s, 1H), 8.27–8.37 (m, 1H) ppm. ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): $\delta = 29.6$ (CH₂), 33.9 (CH₃), 110.1, 114.2 (Cq), 114.9 (CN), 122.3, 123.5, 124.2, 126.1 (Cq), 136.2, 137.5 (Cq), 180.5 (C=O).

3-(1-Benzyl-1H-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile. This compound was obtained according to the above procedure from 1-benzyl-1H-indole as a beige solid, 72% yield, mp 124 °C. IR (ATR): $\nu = 3105$ (C-H), 2252 (CN), 1662 (C=O), 1602 (C=C) cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 3.90$ (s, 2H, CH_2CN), 5.41 (s, 2H, CH_2Ph), 7.21 (dd, $J = 7.5, 2.1$ Hz, 2H), 7.30-7.40 (m, 6H), 7.85 (s, 1H), 8.37 (dd, $J = 8.4, 1.7$ Hz, 1H) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, CDCl_3): $\delta = 29.8$ (CH_2), 51.1 (CH_2Ph), 110.6, 114.7 (Cq), 114.8 (CN), 122.5, 123.6, 124.4, 126.3 (Cq), 127.2, 128.5, 129.2, 135.1 (Cq), 135.2, 137.1 (Cq), 180.6 (C=O). Anal. Calcd. For $\text{C}_{18}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}$ (274.32): C, 78.81; H, 5.14; N, 10.21. Found: C, 78.93; H, 5.35; N, 9.94.

3-(1-Butyl-1H-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile. This compound was obtained according to the above procedure from 1-butyl-1H-indole as a yellow solid, 81% yield, mp 108 °C. FTIR (ATR): $\nu = 2249$ ($\text{C}\equiv\text{N}$), 1641 (C=O) cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 0.97$ (t, $J = 7.4$ Hz, 3H), 1.38 (m, $J = 7.4$ Hz, 2H), 1.88 (m, $J = 7.4$ Hz, 2H), 3.88 (s, 2H), 4.18 (t, $J = 7.2$ Hz, 2H), 7.42 – 7.29 (m, 3H), 7.82 (s, 1H), 8.34 – 8.27 (m, 1H) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 13.6$ (CH_3), 20.1 (CH_2), 29.7 (CH_2), 31.8 (CH_2), 47.2 (CH_2), 110.3, 114.2, 115.0 (Cq), 122.5, 123.4, 124.1, 126.3 (Cq), 135.1, 136.9 (Cq), 180.5 (C=O) ppm.

General procedure for the synthesis of the α,β -unsaturated α -cyanoketones 4

In a round-bottom flask coupled with a condenser and stir bar, a mixture of the oxopropanenitrile derivative (1.0 mmol), the corresponding aldehyde (1.2 mmol), triethylamine (TEA) (0.2 mL) and ethanol (4 mL) was stirred during 2 h at reflux, observing the formation of a yellow precipitate (corresponding to the α -cyanoketone **4**). When the starting oxopropanenitrile derivative was completely consumed, the solution was cooled to room temperature and the precipitate was filtrated and washed with methanol to provide the corresponding α -cyanoketone **4**. No further purification was required.

(E)-2-Benzoyl-3-(2-bromophenyl)acrylonitrile (4a). This compound was obtained according to the above procedure from benzoyl acetonitrile and 2-bromobenzaldehyde as an orange solid, 52% yield, mp 126 °C. FTIR (ATR): $\nu = 3015$ (C-H), 2225 (CN), 1664 (C=O), 1251, 1024 cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 7.39$ (t, $J = 7.7$ Hz, 1H), 7.49 (t, $J = 7.7$ Hz, 1H), 7.54 (t, $J = 7.6$ Hz, 2H), 7.65 (t, $J = 7.4$ Hz, 1H), 7.71 (d, $J = 8.0$ Hz, 1H), 7.92 (d, $J = 8.0$ Hz, 2H), 8.35 (s, 1H) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, CDCl_3): $\delta = 113.7$ (Cq), 115.8 (CN), 126.5 (Cq), 128.2, 128.9, 129.6, 130.2, 132.2 (Cq), 133.7, 133.8, 135.5 (Cq), 154.1, 188.7 (C=O) ppm.

(E)-3-(2-Bromophenyl)-2-(1-methyl-1H-indole-3-carbonyl)acrylonitrile (4d). This compound was obtained according to the above procedure from 3-(1-methyl-1H-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile and 2-bromobenzaldehyde as a yellow solid, 92% yield, mp 163 °C. FTIR (ATR): $\nu = 3018$ (C-H), 2212 (CN), 1635 (C=O), 1581 cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 3.95$ (s, 3H), 7.35 – 7.57 (m, 5H), 7.75 (dd, $J = 8.0, 1.3$ Hz, 1H), 8.20 (dd, $J = 7.8, 1.7$ Hz, 1H), 8.35 (s, 1H), 8.44 – 8.54 (m, 1H), 8.58 (s, 1H) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, CDCl_3): $\delta = 34.0$ (CH_3), 110.0, 113.9 (Cq), 114.1 (Cq), 117.8 (CN), 123.1, 123.5, 124.3, 126.1 (Cq), 127.4 (Cq), 128.0, 130.0, 132.8 (Cq), 132.9, 133.5, 137.2, 137.4 (Cq), 152.2, 178.6 (C=O) ppm. MS: (70 eV) m/z (%) = 366/364 (40/38) $[\text{M}]^+$, 285 (100), 236 (19), 158 (66), 152 (35). Anal. Calcd. For $\text{C}_{19}\text{H}_{13}\text{BrN}_2\text{O}$ (365.23): C, 62.48; H, 3.59; N, 7.67. Found: C, 62.22; H, 3.56; N, 8.00.

(E)-3-(2-Bromophenyl)-2-(1H-indole-3-carbonyl)acrylonitrile (4e). This compound was obtained according to the above procedure from 3-(1H-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile and 2-bromobenzaldehyde as a yellow solid, 95% yield, mp 249 °C. FTIR (ATR): $\nu = 3174$ (N-H), 3012 (C-H), 2218 (CN), 1631 (C=O), 1579 cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$): $\delta = 7.26$ -7.35 (m, 2H), 7.53 (t, 1H), 7.58 (d, 1H), 7.64 (t, 1H), 7.86 (d, 1H), 8.13 (d, 1H), 8.22 (d, 1H), 8.28 (s, 1H), 8.52 (s, 1H), 12.39 (s, 1H, NH) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$): $\delta = 113.1$ (Cq), 113.9, 115.9 (CN), 117.0, 121.8, 122.8, 123.1 (Cq), 125.0, 126.5, 128.7 (Cq), 130.6 (Cq), 133.2 (Cq), 133.7, 134.8, 136.8 (Cq), 137.2, 151.0, 180.9 (C=O) ppm. MS: (70 eV) m/z (%) = 352/350 (22/22) $[\text{M}]^+$, 144 (100), 271 (41), 116 (37), 89 (62).

(E)-2-(1-Benzyl-1*H*-indole-3-carbonyl)-3-(2-bromophenyl)acrylonitrile (**4f**). This compound was obtained according to the above procedure from 3-(1-benzyl-1*H*-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile and 2-bromobenzaldehyde as a yellow solid, 92% yield, mp 180 °C. FTIR (ATR): $\nu = 3018$ (C-H), 2225 (CN), 1656 (C=O), 1517 cm^{-1} . ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 5.44$ (s, 2H), 7.29 – 7.19 (m, 2H), 7.45 – 7.33 (m, 7H), 7.50 (td, $J = 7.7, 1.2$ Hz, 1H), 7.73 (dd, $J = 8.0, 1.1$ Hz, 1H), 8.19 (dd, $J = 7.8, 1.6$ Hz, 1H), 8.36 (s, 1H), 8.63 – 8.46 (m, 2H) ppm. ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): $\delta = 51.2$ (CH_2Ph), 110.5, 114.2 (Cq), 114.5 (Cq), 117.4 (CN), 123.1, 123.6, 124.4, 126.1 (Cq), 127.3, 127.6 (Cq), 128.0, 128.5, 129.2, 130.0, 132.7 (Cq), 132.9, 133.4, 135.1 (Cq), 136.6, 137.0 (Cq), 151.9, 178.3 (C=O) ppm. MS: (70 eV) m/z (%) = 442/440 (8/8) $[\text{M}]^+$, 361 (12), 234 (5), 91 (100).

(E)-2-(1-Benzyl-1*H*-indole-3-carbonyl)-3-(2-chloroquinolin-3-yl)acrylonitrile (**4g**). This compound was obtained according to the above procedure from 3-(1-benzyl-1*H*-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile and 2-chloroquinoline-3-carbaldehyde as a yellow solid, 89 % yield, mp 199 C. FTIR (KBr): $\nu = 3057, 2999, 2958$ (C-H), 2245 (CN), 1649 (C=O), 1589 cm^{-1} . ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 5.44$ (s, 2H), 7.30 – 7.27 (m, 2H), 7.44 – 7.33 (m, 6H), 7.73 – 7.64 (m, 1H), 7.93 – 7.84 (m, 1H), 8.00 (d, $J = 7.9$ Hz, 1H), 8.09 (d, $J = 8.5$ Hz, 1H), 8.37 (s, 1H), 8.51 (dd, $J = 8.5, 1.2$ Hz, 1H), 8.63 (s, 1H), 9.03 (s, 1H) ppm. ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): $\delta = 51.1$ (CH_2), 110.4, 14.2 (Cq), 114.9 (Cq), 1117.2 (Cq), 122.9, 123.6, 124.4, 124.9 (Cq), 126.3 (Cq), 127.2, 127.3 (Cq), 127.9, 128.2, 128.4, 128.6, 129.0, 132.6, 134.8 (Cq), 136.3, 136.8 (Cq), 138.9, 147.6, 147.9 (Cq), 149.6 (Cq), 178.2 (C=O) ppm. MS: (70 eV) m/z (%) = 449/447 (3/10), 234 (7), 91 (100).

(E)-3-(2-Chloroquinolin-3-yl)-2-(1-methyl-1*H*-indole-3-carbonyl)acrylonitrile (**4h**). This compound was obtained according to the above procedure from 3-(1-methyl-1*H*-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile and 2-chloroquinoline-3-carbaldehyde as a yellow solid, 70 % yield, mp 175 C. FTIR (KBr): $\nu = 2958, 2929$ (C-H), 2225 (CN), 1645 (C=O), 1589 cm^{-1} . ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 3.92$ (s, 3H), 7.39 – 7.36 (m, 3H), 7.66 (t, $J = 7.5$ Hz, 1H), 7.90 – 7.83 (m, 1H), 7.98 (d, $J = 8.1$ Hz, 1H), 8.05 (d, $J = 8.4$ Hz, 1H), 8.33 (s, 1H), 8.46 (dd, $J = 6.7, 3.0$ Hz, 1H), 8.65 (s, 1H), 9.00 (s, 1H) ppm. ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3): $\delta = 34.0, 110.0, 114.1$ (Cq), 114.9 (Cq), 117.7 (Cq), 123.1, 123.6, 124.4, 125.2 (Cq), 126.5 (Cq), 127.4 (Cq), 128.1, 128.5, 128.8, 132.8, 137.2, 137.4 (Cq), 138.9, 148.1, 148.3 (Cq), 149.9 (Cq), 177.9 (C=O) ppm.

(E)-2-(1-Butyl-1*H*-indole-3-carbonyl)-3-(2-chloroquinolin-3-yl)acrylonitrile (**4i**). This compound was obtained according to the above procedure from 3-(1-buthyl-1*H*-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile and 2-chloroquinoline-3-carbaldehyde as a yellow solid, 83 % yield, mp 147 C. FTIR (KBr): $\nu = 2951, 2929$ (C-H), 2250 (CN), 1645 (C=O), 1525 (C=C) cm^{-1} . ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 0.98$ (t, $J = 7.4$ Hz, 3H), 1.42 (m, 2H), 1.92 (m, 2H), 4.24 (t, $J = 7.1$ Hz, 2H), 7.47 – 7.36 (m, 3H), 7.66 (t, $J = 7.6$ Hz, 1H), 7.86 (t, $J = 7.7$ Hz, 1H), 7.99 (d, $J = 8.2$ Hz, 1H), 8.06 (d, $J = 8.5$ Hz, 1H), 8.36 (s, 1H), 8.51 – 8.44 (m, 1H), 8.65 (s, 1H), 9.02 (s, 1H) ppm. MS: (70 eV) m/z (%) = 415/413 (17/53), 378 (90), 200 (100), 144(58), 41 (33).

Methyl (*E*)-2-cyano-3-(4-methoxyphenyl)acrylate (**12**). This compound was obtained according to the above procedure from *p*-anisaldehyde (0.200 g, 1.47 mmol), methyl 2-cyanoacetate (0.220 g, 2.22 mmol), TEA (3 drops) under stirring at 70 °C for 2 h. The reaction produced a white solid, 95% yield, mp 64 °C. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3): $\delta = 3.85$ (s, 3H), 3.86 (s, 3H), 7.37 (s, 4H), 7.72 (s, 1H). Other spectroscopic data for this compound were already reported in the literature. CAS 14479-58-4. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/substance/318298647#section=Top>

(E)-2-Cyano-*N*-(2-iodophenyl)-3-phenylacrylamide (**14**). This compound was obtained starting from the (*E*)-2-cyano-3-phenylacrylic acid (0.300 g, 1.73 mmol) dissolved in 2.0 mL of thionyl chloride, the mixture was stirred at reflux for 1 h, after that, the excess of thionyl chloride was removed under reduced pressure. The acyl chloride (yellow solid) formed was dissolved in 5 mL of chloroform and 2-iodoaniline (0.380 g, 1.74 mmol) and TEA (5 drops) was added. The solution was stirred at room temperature by 2 h until the formation of a precipitate. The beige solid was filtered and dried at ambient, 62% yield,

140-142 °C. $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): δ = 6.95 (td, J = 7.7, 1.5 Hz, 1H), 7.44 (ddd, J = 8.4, 7.5, 1.4 Hz, 1H), 7.48 – 7.67 (m, 3H), 7.88 (dd, J = 8.0, 1.4 Hz, 1H), 7.99 – 8.10 (m, 2H), 8.37 (dd, J = 8.2, 1.5 Hz, 1H), 8.47 (s, 1H), 8.53 (s, 1H, NH) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, CDCl_3): δ = 90.5 (Cq), 104.3 (Cq), 116.6 (CN), 122.1, 126.9, 129.3, 129.4, 130.9, 131.7 (Cq), 133.2, 137.6 (Cq), 139.2, 154.0, 158.5 (C=O) ppm.

General procedure for the synthesis of partially-reduced compounds 5, 7, 9, 11, 13 and 15 via selective chemical NaBH_4 -mediated reduction of the double bond C=C in their α,β -unsaturated precursors 4, 6, 8, 10, 12 and 14, respectively

In an Erlenmeyer with a stir bar, precursor **4**, **6**, **8**, **10**, **12** or **14** (0.2-1.0 g, 1.0 equiv.) was dissolved in a mixture dioxane/methanol (1:4) (5-10 mL). The solution was stirred at 70 °C, then, NaBH_4 (1.0 equiv.) was added portionwise until the starting material was no longer detected by TLC. The solution was cooled at room temperature and the solvent was removed under reduced pressure. Water was added to the reaction flask, and the solid formed was filtered, washed with water and with cold methanol to provide the corresponding product.

2-(2-Bromobenzyl)-3-oxo-3-phenylpropanenitrile (5a). This compound was obtained according to the above procedure from **4a** (0.200 g) as a yellow oil. FTIR (ATR): ν = 3111, 2245 (CN), 1695 (C=O), 1257, 1026 cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): δ = 3.31 (dd, J = 13.8, 9.7 Hz, 1H), 3.58 (dd, J = 13.8, 5.9 Hz, 1H), 4.84 (dd, J = 9.7, 5.9 Hz, 1H), 7.21 (td, J = 7.7, 1.8 Hz, 1H), 7.77 – 7.31 (m, 6H), 8.17 – 7.97 (m, 2H) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, CDCl_3): δ = 36.1 (CH_2), 39.2 (CH), 111.1, 116.6, 124.2, 128.1, 128.9, 129.1, 129.6, 132.3, 133.1, 134.7, 135.2, 189.9 (C=O) ppm.

2-(2-Bromobenzyl)-3-(1-methyl-1H-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile (5d). This compound was obtained according to the above procedure from **4d** (1.000 g) as a beige solid, mp 146 °C. FTIR (ATR): ν = 3059 (C-H), 2249 (CN), 1641 (C=O), 1577 cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): δ = 3.38 (dd, J = 13.8, 9.5 Hz, 1H), 3.61 (dd, J = 13.7, 6.1 Hz, 1H), 3.89 (s, 3H), 4.53 (dd, J = 9.5, 6.1 Hz, 1H), 7.19 (td, J = 7.7, 1.7 Hz, 1H), 7.28 – 7.50 (m, 5H), 7.61 (dd, J = 8.0, 1.3 Hz, 1H), 7.89 (s, 1H), 8.43 (ddd, J = 6.8, 3.0, 1.5 Hz, 1H) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, CDCl_3): δ = 33.9 (NCH_3), 36.5 (CH_2), 40.4 (CH), 110, 114.1 (Cq), 117.9 (CN), 122.7, 123.5, 124.2 (Cq), 124.3, 126.5 (Cq), 128.1, 129.4, 132.4, 132.9, 135.8 (Cq), 136.2, 137.6 (Cq), 183.1 (C=O) ppm. MS: (70 eV) m/z (%) = 368/366 (2/2) $[\text{M}]^+$, 287 (9), 158 (100), 130 (17), 83 (61). Anal. Calcd. For $\text{C}_{19}\text{H}_{15}\text{BrN}_2\text{O}$ (367.25): C, 62.14; H, 4.12; N, 7.63. Found. C, 62.33; H, 4.11; N, 7.99.

2-(2-Bromobenzyl)-3-(1H-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile (5e). This compound was obtained according to the above procedure from **4e** (0.500 g) as a white solid, mp 246 °C. FTIR (ATR): ν = 3259 (N-H), 3028, 2247 (CN), 1666 (C=O), 1579 cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$): δ = 3.34-3.37 (m, 2H), 5.06 (t, 1H), 7.21-7.29 (m, 3H), 7.38 (t, 1H), 7.52 (t, 2H), 7.64 (d, 1H), 8.18 (d, 1H), 8.61 (s, 1H), 12.27 (s, 1H) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$): δ = 35.4 (CH_2), 39.9 (CH), 112.5, 113.7 (Cq), 118.4 (CN), 121.5, 122.5, 123.6, 124.2 (Cq), 125.4 (Cq), 127.8, 128.4, 129.3 (Cq), 131.6, 132.7, 136.0 (Cq), 136.8, 184.3 (C=O) ppm. MS: (70 eV) m/z (%) = 354/352 (2.9/2.5) $[\text{M}]^+$, 144 (100), 273 (43), 116 (23), 89 (13).

3-(1-Benzyl-1H-indol-3-yl)-2-(2-bromobenzyl)-3-oxopropanenitrile (5f). This compound was obtained according to the above procedure from **4f** (0.300 g) as a white solid, mp 146 °C. FTIR (ATR): ν = 3059 (C-H), 2250 (CN), 1671 (C=O), 1568 cm^{-1} . $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): δ = 3.34 (dd, J = 13.7, 9.8 Hz, 1H), 3.55 (dd, J = 13.6, 6.0 Hz, 1H), 4.50 (dd, J = 9.7, 6.0 Hz, 1H), 5.29 – 5.45 (m, 2H), 7.12 – 7.27 (m, 3H), 7.33 – 7.47 (m, 8H), 7.56 (dd, J = 8.0, 1.2 Hz, 1H), 7.89 (s, 1H), 8.42 – 8.50 (m, 1H) ppm. $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, CDCl_3): δ = 37.1 (CH_2), 40.7 (CH), 51.1 (CH_2Ph), 110.4, 114.5 (Cq), 117.6 (CN), 122.8, 123.7, 124.2 (Cq), 124.4, 126.7 (Cq), 127.6, 128.1, 128.7, 129.3, 129.4, 132.4, 132.9, 134.7 (Cq), 135.3, 135.6 (Cq), 137.3 (Cq), 183.6 (C=O) ppm. MS: (70 eV) m/z (%) = 444/442 (8/8) $[\text{M}]^+$, 234 (15), 149 (8), 91 (100). Anal. Calcd. For $\text{C}_{25}\text{H}_{19}\text{BrN}_2\text{O}$ (443.34): C, 66.44; H, 4.24; N, 6.87. Found. C, 66.61; H, 4.33; N, 6.91.

3-(1-Benzyl-1H-indol-3-yl)-2-((2-chloroquinolin-3-yl)methyl)-3-oxopropanenitrile (5g). This compound was obtained according to the above procedure from **4g** as a white solid, mp 198 °C. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ = 3.44 (dd, *J* = 13.8, 9.3 Hz, 1H), 3.70 (dd, *J* = 13.5, 6.1 Hz, 1H), 4.63 – 4.53 (m, 1H), 5.34 (s, 2H), 7.24 – 7.15 (m, 2H), 7.43 – 7.28 (m, 6H), 7.57 (t, *J* = 7.4 Hz, 1H), 7.73 (t, *J* = 7.5 Hz, 1H), 7.82 (d, *J* = 8.1 Hz, 1H), 7.89 (s, 1H), 8.00 (d, *J* = 8.4 Hz, 1H), 8.23 (s, 1H), 8.41 (dd, *J* = 8.3, 1.5 Hz, 1H) ppm. ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): δ = 34.3 (CH₂), 40.3 (CH), 51.2 (CH₂Ph), 110.5, 114.3 (Cq), 117.5 (Cq), 122.7, 123.8, 124.5, 126.6 (Cq), 127.3 (Cq), 127.5, 127.6, 127.7, 127.9 (Cq), 128.1, 128.8, 129.3, 130.8, 134.6 (Cq), 135.4, 137.3 (Cq), 140.6, 147.1 (Cq), 150.1 (Cq), 182.8 (C=O) ppm. MS: (70 eV) *m/z* (%) = 451/449 (0.1/0.3), 234 (14), 91 (100).

2-((2-Chloroquinolin-3-yl)methyl)-3-(1-methyl-1H-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile (5h). This compound was obtained according to the above procedure from **4h** as a white solid, mp 210 °C. FTIR (ATR): *v* = 2987, 2943, 2910 (C-H), 2243 (CN), 1663 (C=O), 1537 (C=C) cm⁻¹. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ = 3.48 (dd, *J* = 14.0, 9.2 Hz, 1H), 3.75 (dd, *J* = 13.0, 4.6 Hz, 1H), 3.86 (s, 3H), 4.62 (dd, *J* = 9.1, 6.3 Hz, 1H), 7.36 (d, *J* = 3.7 Hz, 3H), 7.56 (t, *J* = 7.5 Hz, 1H), 7.73 (t, *J* = 7.2 Hz, 1H), 7.82 (d, *J* = 8.2 Hz, 1H), 7.88 (s, 1H), 8.00 (d, *J* = 8.5 Hz, 1H), 8.23 (s, 1H), 8.38 (dd, *J* = 6.6, 2.8 Hz, 1H) ppm. ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): δ = 33.8 (NCH₃), 33.9 (CH₂), 39.8 (CH), 110.0, 114.0 (Cq), 117.7 (Cq), 122.6, 123.7, 124.4, 126.4 (Cq), 127.3 (Cq), 127.5, 127.6, 128.1 (Cq), 128.2, 130.8, 136.2, 137.6 (Cq), 140.6, 147.2 (Cq), 150.2 (Cq), 182.3 (C=O) ppm. MS: (70 eV) *m/z* (%) = 375/373 (0.1/0.3), 158 (100), 77 (29).

3-(1-Butyl-1H-indol-3-yl)-2-((2-chloroquinolin-3-yl)methyl)-3-oxopropanenitrile (5i). This compound was obtained according to the above procedure from **4i** as a white solid, mp 154 °C. FTIR (ATR): *v* = 3022, 2959, 2883 (C-H), 2258 (CN), 1678 (C=O), 1567 (C=C) cm⁻¹. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ = 0.96 (t, *J* = 6.8 Hz, 3H), 1.41 – 1.28 (m, 2H), 1.92 – 1.77 (m, 2H), 3.49 (dd, *J* = 13.1, 9.0 Hz, 1H), 3.75 (dd, *J* = 13.8, 5.4 Hz, 1H), 4.16 (t, *J* = 6.5 Hz, 2H), 4.69 – 4.50 (m, 1H), 7.43 – 7.30 (m, 3H), 7.57 (t, *J* = 6.9 Hz, 1H), 7.73 (t, *J* = 7.4 Hz, 1H), 7.82 (d, *J* = 7.9 Hz, 1H), 7.91 (s, 1H), 8.02 (d, *J* = 8.2 Hz, 1H), 8.25 (s, 1H), 8.43 – 8.32 (m, 1H) ppm. ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): δ = 13.6 (CH₃), 20.1 (CH₂), 31.7 (CH₂), 33.9 (CH₂), 39.9 (CH), 47.3 (CH₂), 110.3, 113.9 (Cq), 117.7 (Cq), 122.7, 123.6, 124.3, 126.6, 127.6, 127.7, 128.1, 128.1 (Cq), 130.9, 135.3 (Cq), 136.4 (Cq), 137.0 (Cq), 140.7, 147.1 (Cq), 150.1 (Cq), 182.5 (C=O) ppm; MS: (70 eV) *m/z* (%) = 415 (5), 380(21), 200 (100), 144(26).

Methyl 2-cyano-3-(4-methoxyphenyl)propanoate (13). This compound was obtained according to the above procedure from **12** (0.150 g) as a colorless oil. FTIR (ATR): *v* = 3008 (C-H), 2232 (CN), 1721 (C=O) cm⁻¹. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃): δ = 3.36 – 3.03 (m, 2H), 3.73 (dd, *J* = 8.3, 5.7 Hz, 1H), 3.83 (d, *J* = 3.9 Hz, 6H), 6.90 (d, *J* = 8.3 Hz, 2H), 7.22 (d, *J* = 8.2 Hz, 2H). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃): δ = 35.1 (CH₂), 39.8 (CH), 53.9 (OCH₃), 55.3 (OCH₃), 114.3, 116.1 (CN), 127.2 (Cq), 130.1, 159.2 (Cq), 166.1 (C=O) ppm.

2-Cyano-N-(2-iodophenyl)-3-phenylpropanamide (15). This compound was obtained according to the above procedure from **14** (0.120 g) as a white solid, mp 224 °C. FTIR (ATR): *v* = 3223 (N-H), 3068, 2221 (CN), 1662 (C=O), 1568 cm⁻¹. ¹H NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆): δ = 3.22 (dd, *J* = 13.6, 9.0 Hz, 1H), 3.40 (dd, *J* = 13.3, 8.8 Hz, 1H), 4.36 (dd, *J* = 9.0, 6.4 Hz, 1H), 7.06 (td, *J* = 7.6, 1.7 Hz, 1H), 7.48 – 7.26 (m, 7H), 7.92 (dd, *J* = 7.8, 1.4 Hz, 1H), 10.11 (s, 1H) ppm. ¹³C NMR (100 MHz, DMSO): δ = 36.1 (CH₂), 40.4 (CH), 97.1 (Cq), 118.3 (CN), 127.7, 128.0, 128.9, 129.0, 129.3, 129.6, 137.0 (Cq), 139.0 (Cq), 139.6, 164.3 (C=O) ppm.

The synthesis of the remaining known compounds have previously been reported elsewhere.

Results and discussion

Searching for diverse precursors to be used as starting material for the synthesis of new heterocyclic compounds, we required to obtain a variety of α,β -reduced ketone- and ester-derivatives. Selective reduction of the C=C double bond from their corresponding α,β -

unsaturated precursors was chosen as the more expeditious approach. Firstly, looking for a simple, cheap, selective and quantitative gram-scale yield of the desired partially-reduced ketone **2a**, Scheme 1, we performed an adaptation of the Cornubert's procedure for the selective reduction of chalcone **1a** as model reaction, using chloroform as catalyst-poisoning agent (Cornubert & Eggert, 1954; Cornubert & Thomas, 1954). Despite several synthetic variants were evaluated (i.e. adjusting the Raney-Nickel catalyst ratio, reaction times, volume of chloroform used as poisoning agent and hydrogen pressure, among others), not much success was achieved. Mixtures of the expected product **2a** along with the undesired doubly reduced product **3a** were obtained in all cases.

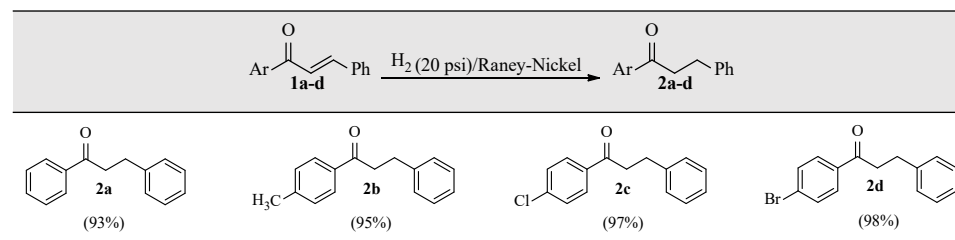
Finally, we found that controlling the volume of EtOH used as solvent was critical to achieve better results. Thus, in our alternative approach the minimum as possible volume of EtOH was used to dissolve the starting chalcones **1a-d**. Afterwards, the catalytic hydrogenation of the saturated ethanolic solutions of **1a-d** in the presence of Raney-Nickel poisoned with CHCl_3 at room temperature under (20 psi) pressure, afforded the desired ketones **2a-d** in almost quantitative yields, table 1. A gentle warming was required in some cases to get saturated solutions of chalcones **1**. Alternatively, the use of DCM instead CHCl_3 also worked well.

As mentioned above, we discovered that the control of the volume of solvent (i.e. EtOH) dramatically improved the selectivity towards the partially hydrogenated keto-derivatives **2**, in comparison with the previous approaches where larger volumes of EtOH were used (Cornubert & Eggert, 1954; Cornubert & Thomas, 1954; Tucker, 1950). This finding is supported by the experimental fact that products **2** were less soluble in the reaction media than the starting chalcones **1**. Thus, products **2** precipitated from the saturated ethanolic solutions as quickly as they were formed avoiding the subsequent reduction of their carbonyl groups. To confirm the above suggestion, a controlled experiment using chalcone **1a** and a large volume of EtOH was performed. In this case no solid precipitated and contrary formation of the dense-oily saturated alcohol **3a** turned into the main product of the reaction mixture.

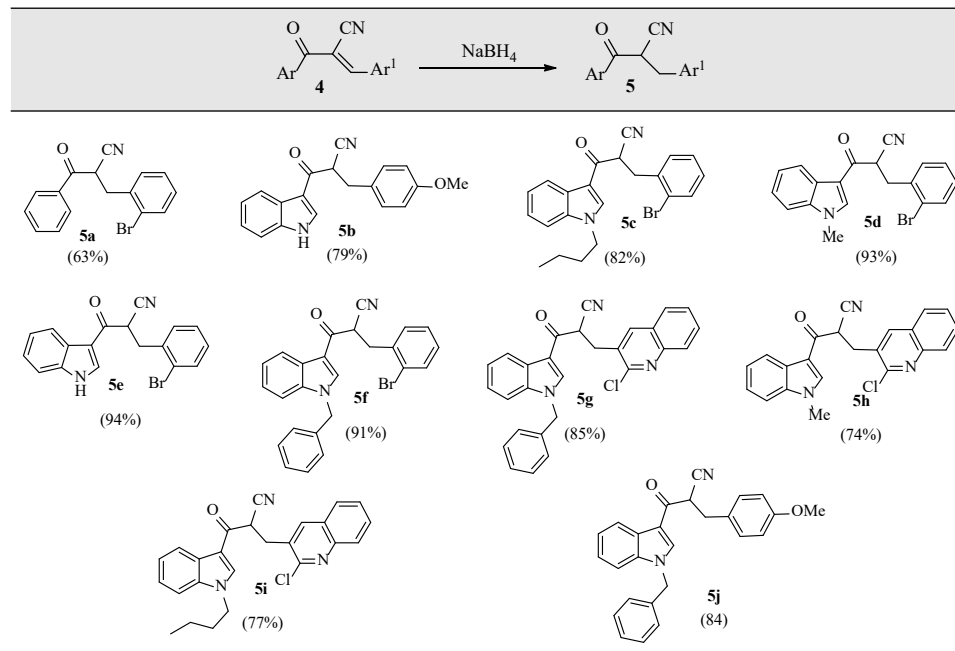
At this stage, it is worth to mention that attempts to extend the above approach to Knoevenagel cyano-keto derivatives **4** did not work. Alternatively, after several assays we found that trying the Knoevenagel adducts **4** with NaBH_4 in a *p*-dioxane/MeOH mixture at 70 °C afforded the expected partially-reduced products **5** in satisfactory yields, table 2.

Structures of the new obtained compounds **4** and **5** were confirmed by ^1H NMR, ^{13}C NMR, and MS spectra. Particularly, a comparative analysis of the ^{13}C NMR spectra for the starting α -cyanoketone **4d** and its corresponding partially-reduced product **5d** confirmed the efficacy of the established NaBH_4 -mediated selective-reductive conditions, figure 1. The appearing of two new aliphatic carbon atom signals at high field (i.e. 40.36 and 36.5 ppm) in spectrum for **5d**, the disappearing of the $=\text{C}$ signal at 152.21 ppm in the spectrum for **4d** and the presence of the carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) signals in both spectra at (178.6 and 183.1) ppm for **4d** and **5d**, respectively, are in agreement with the selectivity of the reduction process.

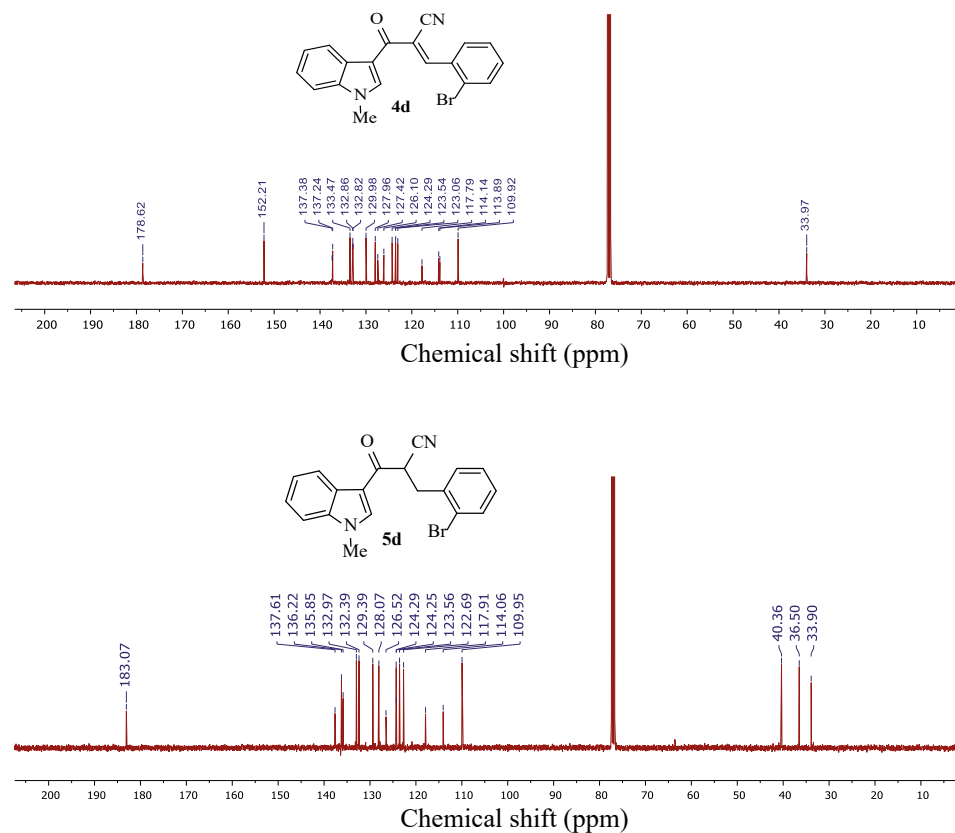
Table 1. Selective reduction of the α,β -unsaturated C=C double bonds in chalcones **1**.^{a,b}



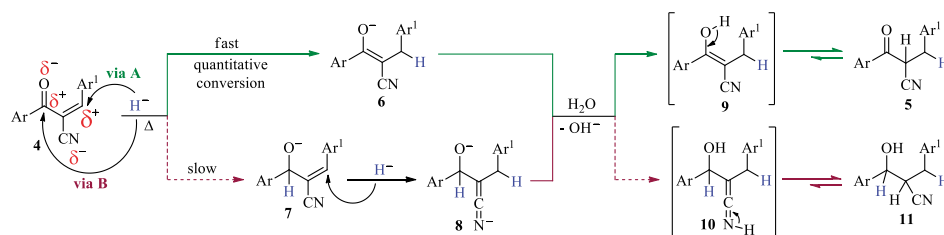
^aReaction conditions: Chalcone **1** (1.0 gram), Raney-Nickel (0.3 g), EtOH (5-10 mL), CHCl_3 or DCM (0.5 mL), rt, 15-20 min. ^bFor more details see Materials and Methods section.

Table 2. Selective reduction of the C=C double bonds in α,β -unsaturated α -cyanoketones **4**.^{a,b,c}

^aReaction conditions: Knoevenagel adduct **4** (0.2-1.0 gram, 1 equiv.), NaBH_4 (1 equiv.), *p*-dioxane/MeOH (1:4) (5-10 mL), 70 °C. ^bFor more details see Materials and Methods section. ^cThe synthesis of the starting indoles and cyanoindoles as precursors for cyanochalcones **4b-j** is described in the Materials and Methods section.

**Figure 1.** Comparative ^{13}C NMR spectra for α -cyanoketone **4d** and its partially-reduced product **5d**

Interestingly, when the above reactions were performed at room temperature mixtures of **5** and their corresponding doubly reduced side-hydroxyl products **11** (i.e. alcohol analogues type **3**), were obtained. A suggested mechanistic sequence for the selective formation of products **5** and alternatively, for the double reduced side-hydroxyl products **11** is drawn in Scheme 2.



Scheme 2. Suggested mechanistic sequence for the selective formation of the partially-reduced products **5**

In principle, the presence of two electron-withdrawing functional groups (i.e. CN and C=O) is the responsible of the higher electrophilicity of the β -carbon atom than the carbonyl C=O group. Apparently, a higher temperature also increases the electrophilicity of such β -carbon atom in **4**, as well as, the reactivity of the hydride anion (i.e. less selectivity), for a faster Michael type addition of H^- (via **A**) than that for the carbonyl H^- addition (via **B**), affording preferably the enolate species **6**. This species should prevent the subsequent reduction of the carbonyl group toward the hydroxyl-compound **11** as happened in the formation of alcoholic derivatives **3**, showed in Scheme 1. Then, the work-up by adding water to the reaction crude (after removing the solvent under reduced pressure), supplied the required protons to recover selectively the target ketonic tautomer **5**. We assume that using lower temperatures reduces the electrophilicity of the β -carbon atom in **4** and hence, increases the chance that H^- attack the β -carbon atom but also the carbonyl group in **4** through a mixture of species **6** and **7**, respectively. A further β -addition of H^- over species **7** (through species **8**), followed by the usual aqueous work-up afforded the detected and isolated mixture of products **5** and the doubly reduced cyanohydroxyl side-product **11**.

Remarkably, the established approach showed to be robust and a miscellaneous of cyanoester **12**, cyanamide **14**, ketoester **16**, diester **18** and diketone **20** derivatives, were also selectively reduced, as shown in tables **3** and **4**.

Table 3. Selective reduction of the C=C double bonds in α,β -unsaturated α -cyanoester **12** and α -cyanamide **14**.^{a,b}

Entry	Precursor	Product
1		
2		

^aReaction conditions: α -cyano-derivatives **12/14** (0.2-1.0 gram, equiv.), $NaBH_4$ (1 equiv.), *p*-dioxane/MeOH (1:4) (5-10 mL), 70 °C. ^bFor more details see Materials and Methods.

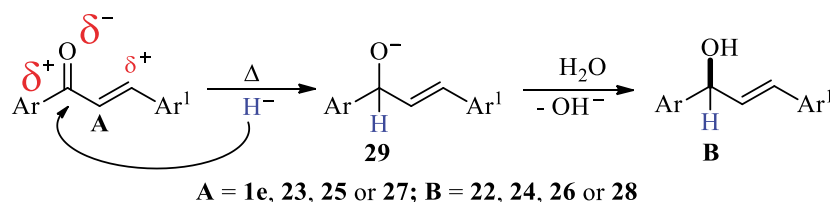
Table 4. Selective reduction of the C=C double bonds in α,β -unsaturated α -ketoester **16**, 1,3-diester **18** and 1,3-diketone **20**.^{a,b}

Entry	Precursor	Product
	<p style="text-align: center;">16,18,20 17,19,21</p>	
1	<p style="text-align: center;">16</p>	<p style="text-align: center;">17 (82%)</p>
2	<p style="text-align: center;">18</p>	<p style="text-align: center;">19 (87%)</p>
3	<p style="text-align: center;">20</p>	<p style="text-align: center;">21 (92%)</p>

^aReaction conditions: Dicarbonyl compounds **16/18/20** (0.2-1.0 gram, 1 equiv.), NaBH₄ (1 equiv.), *p*-dioxane/MeOH (1:4) (5-10 mL), 70 °C. ^bFor more details see Materials and Methods.

Noteworthy, when this approach was applied to simple Claisen-Schmidt condensation products (i.e. chalcones **1e**, **23**, **25** and *bis*-chalcone **27**), their corresponding hydroxyl-derivatives **22**, **24**, **26** and **28**, respectively, were obtained as unique isolated products, without affecting their C=C double bonds, **table 5**.

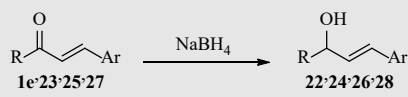
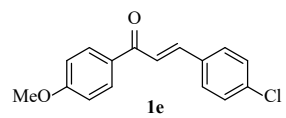
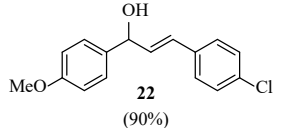
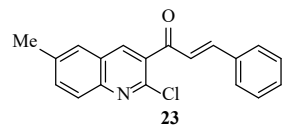
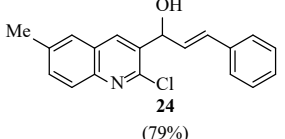
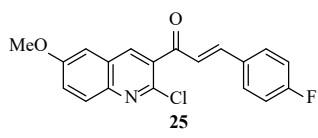
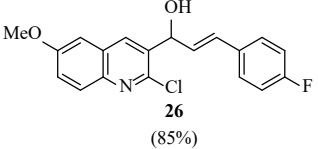
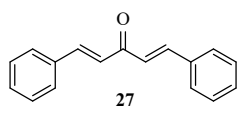
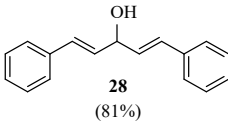
A suggested mechanistic sequence for the selective reduction of the carbonyl (C=O) groups for the above simple ketonic derivatives **A** (i.e. **1e**, **23**, **25** and **27**) is drawn in Scheme 3.

**Scheme 3.** Suggested mechanistic sequence for the selective reduction of the carbonyl (C=O) groups in simple ketonic derivatives **A** (i.e. **1e**, **23**, **25** and **27**)

In this case, the absence of the second electron-withdrawing group in simple ketones **A**, in comparison with precursors **4**, causes a lower electrophilicity of the β -carbon atom than that of the carbonyl C=O carbon atom in structure **A**. In this sense, the nucleophilic attack by H⁻ ion is produced preferably over the carbonyl C=O carbon atom producing the alkoxy intermediate **29**. Subsequently, by performing the work-up as usual, afforded the corresponding isolated allylic alcohols **B** (i.e. **22**, **24**, **26** or **28**) as shown in Scheme 3.

In summary, we implemented two complementary approaches for the selective reduction of the C=C functionality in diverse α,β -unsaturated precursors. In general, poisoned Raney-Nickel-mediated catalytic hydrogenation under controlled volume of EtOH worked

Table 5. Selective reduction of the C=O double bond in α,β -unsaturated ketones **1e**, **23**, **25** and **27**.^{a,b}

		
Entry	Precursor	Product
1	 <p>1e</p>	 <p>22 (90%)</p>
2	 <p>23</p>	 <p>24 (79%)</p>
3	 <p>25</p>	 <p>26 (85%)</p>
4	 <p>27</p>	 <p>28 (81%)</p>

^aReaction conditions: Chalcone **1e**, **23**, **25** or **27** (0.2-1.0 gram, 1 equiv.), NaBH₄ (1 equiv.), *p*-dioxane/MeOH (1:4) (5-10 mL), 70 °C. ^bFor more details see Materials and Methods.

well for ordinary chalcones **1**, while warm *p*-dioxane/MeOH/NaBH₄-mediated chemical reduction was the best reductive conditions for Knoevenagel condensation adducts **4**, **12**, **14**, **16**, **18** and **20**, affording the respective partially reduced products in almost quantitative to excellent yields. The fact that it was possible to reduce, in a selective way, the carbonyl group on some chalcone derivatives is also highlighted in this approach. Moreover, trying to explain the selective NaBH₄-mediated reductive process a plausible mechanistic pathway was proposed in this regard.

Acknowledgments

Authors are grateful to MINCIENCIAS and Universidad for financial support.

Authors contribution

RA, design of the study; ACG, experimental procedures; RA and ACG, analysis of the results and writing of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Aramini, A., Brinchi, L., Germani, R., Savelli, G. (2000). Reductions of α,β -unsaturated ketones by NaBH₄ or NaBH₄ + CoCl₂: Selectivity control by water or by aqueous micellar solutions. *Eur. J. Org. Chem.* **2000**: 1793-1797. doi.org/10.1002/(SICI)1099-0690(200005)2000:9<1793::AID-EJOC1793>3.0.CO;2-A

- Balcells, D., Clot, E., Eisenstein, O., Nova, A., Perrin, L.** (2016). Deciphering selectivity in organic reactions: A multifaceted problem. *Acc. Chem. Res.* **49**: 1070-1078. doi: 10.1021/acs.accounts.6b00099
- Cai, Q., Sheng, H.-Y., Li, D.-K., Liu, Y., Wu, A.-X.** (2018). Base-promoted tandem cyclization for the synthesis of polyfunctional 2-hydroxy-2,3-dihydrofurans from arylglyoxal monohydrates and 3-(1*H*-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile. *Synlett.* **29**: 1926-1932. doi: 10.1055/s-0037-1609555
- Chen, T., Xu, X.-P., Ji, S.-J.** (2013). Facile and efficient synthesis of indol-3-yl substituted pyran derivatives *via* one-pot multicomponent reactions under ultrasonic irradiation. *J. Heterocycl. Chem.* **50**: 244-251. doi.org/10.1002/jhet.983
- Chikashita, H., Nishida, S., Miyazaki, M., Morita, Y., Itoh, K.** (1987). In situ generation and synthetic application of 2-phenylbenzimidazoline to the selective reduction of carbon-carbon double bonds of electron-deficient olefins. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **60**: 737-746. doi.org/10.1246/bcsj.60.737
- Cornubert, R. & Eggert, H.G.** (1954). *Bull. Soc. Chim. Fr.* **21**: 522-523.
- Cornubert, R. & Thomas, P.** (1954). *Bull. Soc. Chim. Fr.* **21**: 524-528.
- Fadda, A.A., El-Mekabaty, A., Mousa, I.A., Elattar, K.M.** (2014). Chemistry of 3-(1*H*-indol-3-yl)-3-oxopropanenitrile. *Synth. Commun.* **44**: 1579-1599. doi.org/10.1080/00397911.2013.861915
- Felpin, F.-X. & Fouquet, E.** (2010). A useful, reliable and safer protocol for hydrogenation and the hydrogenolysis of *O*-benzyl groups: The *in situ* preparation of an active Pd⁰/C catalyst with well-defined properties. *Chem. Eur. J.* **16**: 12440-12445. doi.org/10.1002/chem.201001377
- Gutierrez, M., Nazareno, M.A., Sosa, V., López de Mishima, B.A., Mishima, H.T.** (2010). Hydrogenation of chalcones using hydrogen permeating through a Pd and palladized Pd electrodes. *Electrochim. Acta.* **55**: 5831-5839. doi.org/10.1016/j.electacta.2010.05.032
- Hammond, C.N., Schatz, P.F., Davidson, T.A.** (2009). Synthesis and hydrogenation of disubstituted chalcones. A guided-inquiry organic chemistry project. *J. Chem. Educ.* **86**: 234-239. doi.org/10.1021/ed086p234
- Inoue, K., Ishida, T., Shibata, I., Baba, A.** (2002). Remarkable dependence of diastereoselectivity on anhydrous or aqueous solvent in the indium hydride promoted reductive aldol reaction of α,β -unsaturated ketones. *Adv. Synth. Catal.* **344**: 283-287. doi.org/10.1002/1615-4169(200206)344:3/4<283::AID-ADSC283>3.0.CO;2-S
- Insuasty, B., Ramírez, J., Becerra, D., Echeverry, C., Quiroga, J., Abonia, R., Robledo, S.M., Vélez, I.D., Upegui, Y., Munoz, J.A., Ospina, V., Noguerras, M., Cobo, J.** (2015). An efficient synthesis of new caffeine-based chalcones, pyrazolines and pyrazolo[3,4-*b*][1,4] diazepines as potential antimalarial, antitrypanosomal and antileishmanial agents. *Eur. J. Med. Chem.* **93**: 401-413. doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.02.040
- Insuasty, D., Robledo, S.M., Vélez, I.D., Cuervo, P., Insuasty, B., Quiroga, J., Noguerras, M., Cobo, J., Abonia, R.** (2017). A Schmidt rearrangement-mediated synthesis of novel tetrahydro-benzo[1,4]diazepin-5-ones as potential anticancer and antiprotozoal agents. *Eur. J. Med. Chem.* **141**: 567-583. doi.org/10.1016/j.ejmech.2017.10.024
- Keess, S. & Oestreich, M.** (2017). Access to fully alkylated germanes by B(C₆F₅)₃-catalyzed transfer hydrogermylation of alkenes. *Org. Lett.* **19**: 1898-1901. doi.org/10.1021/acs.orglett.7b00672
- Kong, A., Han, X., Lu, X.** (2006). Highly efficient construction of benzene ring in carbazoles by palladium-catalyzed *endo*-mode oxidative cyclization of 3-(3'-alkenyl)indoles. *Org. Lett.* **8**: 1339-1342. doi.org/10.1021/ol060039u
- Lipshutz, B.H., Keith, J., Papa, P., Vivian, R.** (1998). A convenient, efficient method for conjugate reductions using catalytic quantities of Cu(I). *Tetrahedron Lett.* **39**: 4627-4630. doi.org/10.1016/S0040-4039(98)00855-7
- Mohamadi, M., Setamdideh, D., Khezri, B.** (2013). Regioselective and chemoselective reduction of α -unsaturated carbonyl compounds by NaBH₄/Ba(OAc)₂ as a reducing system. *Org. Chem. Int.* **2013**: Article ID 127585. dx.doi.org/10.1155/2013/127585
- Montoya, A., Quiroga, J., Abonia, R., Sortino, M., Derita, M., Zacchino, S., Ornelas, A., Insuasty, B.** (2016). Hybrid molecules containing a 7-chloro-4-aminoquinoline nucleus and a substituted 2-pyrazoline with antiproliferative and antifungal activity. *Molecules.* **21**: 969. doi.org/10.3390/molecules21080969
- Mori, A., Miyakawa, Y., Ohashi, E., Haga, T., Maegawa, T., Sajiki, H.** (2006). Pd/C-catalyzed chemoselective hydrogenation in the presence of diphenylsulfide. *Org. Lett.* **8**: 3279-3281. doi.org/10.1021/ol061147j

- Ramírez-Prada, J., Robledo, S.M., Vélez, I.D., Crespo, M.P., Quiroga, J., Abonia, R., Montoya, A., Svetaz, L., Zacchino, S., Insuasty, B.** (2017). Synthesis of novel quinoline-based 4,5-dihydro-1*H*-pyrazoles as potential anticancer, antifungal, antibacterial and antiprotozoal agents. *Eur. J. Med. Chem.* **131**: 237-254. doi.org/10.1016/j.ejmech.2017.03.016
- Tucker, S.H.** (1950). Catalytic hydrogenation using Raney nickel. *J. Chem. Educ.* **27**: 489-493.
- Wang, Q.-D., Yang, J.-M., Fang, D., Ren, J., Dong, B., Zhou, B., Zeng, B.-B.** (2016). Chemoselective Cu (I) catalyzed bis (pinacolato) diboron conjugate addition and reduction onto α,β -unsaturated carbonyl compounds. *Tetrahedron Lett.* **57**: 2587-2590. doi.org/10.1016/j.tetlet.2016.04.094
- Ward, R.S.** (1999). In *Selectivity in organic synthesis*, 1st Edition, Wiley eds., ISBN: 978-0-471-98779-6
- Zeynizadeh, B. & Shirini, F.** (2003). Mild and efficient reduction of α,β -unsaturated carbonyl compounds, α -diketones and acyloins with sodium borohydride/Dowex1-x8 system. *Bull. Korean Chem. Soc.* **24**: 295-298. doi.org/10.5012/bkcs.2003.24.3.295
- Zheng, H.-X., Xiao, Z.-F., Yao, C.-Z., Li, Q.-Q., Ning, X.-S., Kang, Y.-B., Tang, Y.** (2015). Transition-metal-free self-hydrogen-transferring allylic isomerization. *Org. Lett.* **17**: 6102-6105. doi.org/10.1021/acs.orglett.5b03124

Artículo original

Evaluación de un método rápido para determinar los requerimientos de cal en suelos de la zona cafetera colombiana

Evaluation of a rapid method to determine lime requirements in acid soils of the Colombian coffee zone

Vanessa Catalina Díaz-Poveda*, Siavosh Sadeghian

Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Manizales, Colombia

Resumen

La determinación de los requerimientos de cal para suelos ácidos requiere métodos prácticos, rápidos y efectivos. Algunas de las opciones actualmente utilizadas subestiman estos requerimientos, en tanto que otras los sobreestiman. En este estudio el objetivo fue evaluar la metodología de titulación directa con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como una alternativa más rápida frente al método de incubación, el cual se empleó como patrón. Se emplearon 25 muestras de suelo de la zona cafetera colombiana con un $\text{pH} < 5,5$ y propiedades fisicoquímicas contrastantes. Estas se trataron con dosis crecientes de dolomita ($\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$) en el método de incubación y de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0,02 M en el método de titulación. El incremento del pH en respuesta a los tratamientos en el método de incubación fue de tipo exponencial y menor que en el de titulación, el cual presentó una tendencia lineal y subestimó los requerimientos de cal comparado con el de incubación en todos los suelos para alcanzar un pH de 5,5. Mediante regresión múltiple se pudieron explicar las diferencias de los requerimientos de cal entre los dos métodos ($R^2=0,94^{**}$) en función de los contenidos de materia orgánica, N, P, K, Mg, S, Al, Na, Mn, Cu, B y limo de los suelos, y se generó un factor de corrección que se debe sumar a la dosis determinada por el método de titulación. Se concluyó que, a pesar de que el método de titulación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es más rápido que el de incubación, su aplicación en los suelos de la zona cafetera de Colombia requiere un factor de ajuste con base en las propiedades de sus suelos.

Palabras clave: Acidez del suelo; Encalamiento; Incubación; pH; Titulación- $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Abstract

Determining the lime requirements (LR) for acidic soils requires practical, fast, and effective methods. Some of the options currently used underestimate these requirements while others lead to overestimations. Here we evaluated the direct titration methodology with calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) as a faster alternative to the incubation method, which was used as a standard. We used 25 samples from the Colombian coffee zone with $\text{pH} < 5.5$ and contrasting physicochemical properties. We treated them with increasing doses of dolomite ($\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$) in the incubation method and with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0.02 M in the titration method. The increase in pH in response to the treatments in the incubation method was exponential and less than that obtained with the titration method. In all soils, the titration method showed a linear trend and underestimated the lime requirements to reach a $\text{pH} = 5.5$ compared to the incubation method. A multiple regression analysis ($R^2=0.94^{**}$) was used to explain the differences in lime requirements between the two methods based on several properties of the soils and generate the correction factor that should be added to the dose determined by the titration method. The soil properties considered in the regression analysis were the organic matter, N, P, K, Mg, S, Al, Na, Mn, Cu, B, and silt contents. We concluded that although the titration method with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is faster than the incubation method to determine the LR, its application in the Colombian coffee zone requires an adjustment factor based on the properties of the soil.

Keywords: Soil acidity; Liming; Incubation; pH; Titration- $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Citación: Díaz-Poveda VC, Sadeghian S. Evaluación de un método rápido para determinar los requerimientos de cal en suelos de la zona cafetera colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1246-1261, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1405>

Editor: Alexander Correa

***Correspondencia:**

Vanessa Catalina Díaz Poveda;
Vanessa.diaz@cafedecolombia.com

Recibido: 4 de marzo de 2021

Aceptado: 8 de noviembre de 2021

Publicado: 15 de diciembre de 2021



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

Introducción

Uno de los principales problemas de la agricultura en muchas regiones de Colombia es la acidez de los suelos. Específicamente en la zona cafetera del país una alta proporción de las muestras de suelos analizadas en las últimas tres décadas revela limitaciones debido a la acidez (**Sadeghian**, 2016). En estas condiciones se incrementa la solubilidad del aluminio intercambiable (Al^{3+}), disminuye la disponibilidad de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), y se reduce la solubilidad de fósforo (P) y la actividad de los microorganismos del suelo con consecuencias en el crecimiento de las plantas (**Havlin, et al.**, 2017; **Raij**, 2011; **Zapata**, 2014).

La acidez del suelo puede corregirse con la aplicación de cales (carbonatos, óxidos e hidróxidos de Ca y Mg) (**Caires**, 2010; **Raij**, 2011; **Sousa, et al.**, 2007). En este sentido, el requerimiento de cal se define como la cantidad de material de encalado necesario para cambiar el pH del suelo o el contenido de Al^{3+} a partir de la condición inicial hasta alcanzar el nivel óptimo para el crecimiento de la planta (**McLean**, 1982; **Soil Science Society of America - SSSA**, 2008).

Se han propuesto diversos procedimientos para estimar dichos requerimientos en diferentes tipos de suelos, pero no existe un consenso sobre el tema, bien sea porque se sobreestiman las cantidades necesarias o se subestiman (**Pagani & Mallarino**, 2011) dada la naturaleza propia de los suelos y su variabilidad en propiedades físicas y químicas, las cuales generan diferencias en el comportamiento de la acidez. Por ejemplo, el poder tampón, que puede incrementarse con el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la materia orgánica del suelo, y las fuentes de la acidez que pueden ser de origen biogénico o antropogénico (**Havlin, et al.**, 2017; **Zapata**, 2004). Lo anterior ha sido corroborado por **Sadeghian y Díaz-Marín** (2020) para algunos de los suelos de la zona cafetera de Colombia. Así, para una misma región es posible encontrar el uso de diferentes métodos con el fin de alcanzar recomendaciones más precisas (**Sims**, 1996).

Algunas de las propuestas para estimar los requerimientos de cal de los suelos recurren a algoritmos basados en investigaciones de campo, en tanto que otras se sustentan en pruebas de laboratorio. En las primeras se emplean criterios como la neutralización de Al^{3+} (**Kamprath**, 1970), el porcentaje de saturación de bases (**Cochrane, et al.**, 1980; **Raij**, 1991), la neutralización de Al^{3+} y el incremento de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (**Álvarez & Ribeiro**, 1999), y el aumento del pH, Ca^{2+} y Mg^{2+} en el caso del café (**Sadeghian**, 2008). Las técnicas de laboratorio, por su parte, incluyen el empleo de cales o reactivos alcalinizantes para elevar el pH hasta el valor deseado según las exigencias del cultivo. Tradicionalmente, en estas se han utilizado tres enfoques generales para determinar el requerimiento de cal: i) la incubación del suelo, ii) el uso de una solución tampón y, iii) la titulación directa con una base (**Godsey, et al.**, 2007). El método más ampliamente aceptado es el de incubación, ya que permite resultados más próximos a los obtenidos en los experimentos de campo (**Viscarra & McBratney**, 2001; **Sims**, 1996; **Alley & Zelazny**, 1987). De aquí que muchos investigadores consideren este método como el referente o patrón al evaluar las nuevas metodologías o modelos de estimación (**Teixeira, et al.**, 2020; **McFarland, et al.**, 2020). La incubación es un método semidestructivo en el que las condiciones del suelo determinan la cinética de reacción de la neutralización de la acidez. Consiste en la mezcla de dosis crecientes de cal con el suelo a capacidad de campo durante 30 a 60 días, tiempo después del cual se mide el pH o el Al^{3+} (**Cabrales, et al.**, 2018). La incubación, a pesar de ser el método ideal, resulta poco práctica debido al tiempo que se requiere, lo que ha impulsado la formulación de otras alternativas más prácticas.

En cuanto a los métodos basados en el uso de soluciones tampón propuestos por **Woodruff** (1948), **Shoemaker, et al.** (1961), **Adams & Evans** (1962), y **Mehlich** (1976), entre otros, aunque son más rápidos que la incubación, requieren el uso de reactivos como el p-nitrofenol, el cromo hexavalente y el bario, los cuales generan problemas de salud y seguridad, además de añadir costos para la disposición final de los residuos (**Sikora**, 2006). El método de titulación directa, por su parte, es destructivo y acelera el equilibrio a través

de la agitación de la muestra. Consiste en adicionar una solución de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) a la muestra de suelo mezclada con agua en una relación de 1:1, con lo que el equilibrio en el pH se logra aproximadamente en 30 min, es decir, el lapso en el que el valor del pH del suelo alcanza un valor constante (Liu, *et al.*, 2004, Kissel, *et al.*, 2007). El estudio de las titulaciones directas inició con Dunn (1943), quien con este método pronosticó el requerimiento de cal en suelos ácidos enfocándose en el tiempo de equilibrio de la reacción entre el suelo y la base, para el cual propuso 4 días. Sin embargo, el método seguía considerándose dispendioso en términos de tiempo, razón por la que se evaluó una titulación directa con 30 min como el intervalo de tiempo entre adiciones de la solución de Ca(OH)_2 (Liu, *et al.*, 2004). Desde entonces se han hecho estudios para medir aún más rápidamente el requerimiento de cal, incluso con una sola adición de Ca(OH)_2 (Liu, *et al.*, 2005), midiendo el pH inicial de la muestra y adicionando una sola cantidad de base; a partir de la curva de titulación obtenida, que se asume como lineal, se obtiene la cantidad de cal necesaria para elevar el pH a los valores requeridos. Entre los trabajos relacionados se pueden citar los de Aitken, *et al.* (1990) en Queensland (Australia), Alabi, *et al.* (1986) en Nebraska (Estados Unidos), Edmeades, *et al.* (1985) en Nueva Zelanda, Godsey, *et al.* (2007) en Kansas (EUA), Owusu-Bennoah, *et al.* (1995) en Ghana, Ssali, *et al.* (1981) en Kenya y Tunney, *et al.* (2010) en Irlanda.

En los últimos años se han desarrollado estudios en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), con el fin de determinar los requerimientos de cal de suelos de la zona cafetera de Colombia con base en el método de incubación (Sadeghian, *et al.*, 2019; Sadeghian & Díaz-Marín, 2020). Sin embargo, este resulta ser un procedimiento largo y dispendioso, razón por la que en el presente trabajo se propuso evaluar el método de titulación directa con Ca(OH)_2 como alternativa más rápida a la incubación para determinar dichos requerimientos.

Materiales y métodos

Muestreo, preparación y caracterización de suelos

En 25 localidades con lotes sembrados de café en la zona cafetera de Colombia, seleccionados previamente por las condiciones de acidez del suelo ($\text{pH} < 5,5$), se tomaron muestras de aproximadamente 10 kg a 20 cm de profundidad que luego se llevaron a Cenicafé en el municipio de Manizales (Caldas).

Las muestras se secaron en estufa a 40 °C, se pasaron por un tamiz No. 10 (apertura de 2 mm) y luego se analizaron las siguientes propiedades físicas y químicas (Tabla 1): pH, materia orgánica, calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+), aluminio intercambiable (Al^{3+}), CIC, fósforo (P), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y boro (B), así como su textura: arcilla (Ar), limo (L) y arena (A).

Para determinar el requerimiento de cal por el método de titulación con Ca(OH)_2 , las muestras se secaron a 40 °C y se pasaron por el tamiz No. 10 (apertura de 2 mm). Con el método de incubación, el cual se consideró como patrón, las muestras se secaron al aire y se pasaron por una zaranda (apertura de 10 mm), con el fin de eliminar terrones grandes buscando que las muestras fueran lo más parecidas posibles a la realidad de campo.

Método de incubación con cal

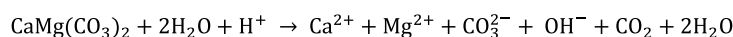
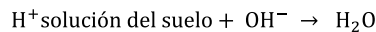
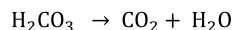
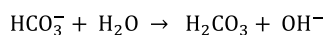
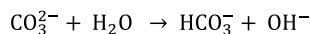
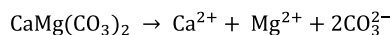
Se pesó un volumen de 0,184 dm³ (decímetro cúbico) de cada muestra de suelo y se trasladó a una matera plástica que luego se incubó durante 45 días con dosis equivalentes a 0,00; 1,25; 2,50; 5,00 y 10,00 g dm⁻³ de una cal dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) que contenía 34 % de CaO y 16 % de MgO, con un poder de neutralización de 102 %, una eficiencia granulométrica de 91 % y un poder relativo de neutralización total de 92 %. Las muestras se dispusieron por triplicado en el laboratorio de la Disciplina de Suelos de Cenicafé utilizando un diseño completamente aleatorio, y se regaron cada cuatro a cinco días con agua tipo II (conductividad < 1 $\mu\text{S cm}^{-1}$) para mantener la humedad a un 60 o 70 % de su máxima capacidad de retención. Al finalizar el tiempo de incubación, las muestras se secaron, se

Tabla 1. Propiedades químicas y textura de las muestras de suelo analizadas

Suelo	Departamento	Orden	pH ^a	N ^b	MO ^c	K ^d	Ca ^d	Mg ^d	Na ^d	Al ^e	CIC ^f	P ^g	S ^h	Fe ⁱ	Mn ⁱ	Zn ⁱ	Cu ⁱ	B ^h	Ar ^j	L ^j	A ^j	Textura
			%			cmol _c kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					%						
1	Meta	Entisol	4,0	0,26	5,8	0,23	0,39	0,17	0,02	2,9	18	12	15,0	515	13	1,3	7,0	0,10	36	27	36	FAr
2	Meta	Entisol	4,1	0,34	8,0	0,12	0,09	0,12	0,01	1,5	19	102	19,6	336	25	2,1	23,3	0,09	34	31	34	FAr
3	Meta	Entisol	4,0	0,22	4,7	0,20	0,38	0,16	0,01	3,0	18	3	24,0	475	21	1,0	2,6	0,13	40	28	32	FAr
4	Meta	Entisol	3,6	0,27	6,1	0,21	0,24	0,18	0,02	3,6	15	44	18,6	810	28	1,3	6,1	0,29	31	17	52	FArA
5	Meta	Entisol	3,7	0,27	6,2	0,15	0,15	0,12	0,02	4,6	18	15	15,1	1495	7	0,9	8,5	0,15	41	20	39	Ar
6	Meta	Entisol	3,8	0,21	4,6	0,19	0,21	0,12	0,01	3,4	14	64	14,6	497	24	1,4	4,4	0,56	33	22	45	FArA
7	Risaralda	Andisol	4,5	0,46	11,6	0,83	1,84	0,46	0,01	1,3	26	28	23,3	162	31	12,4	2,5	0,44	25	25	50	FArA
8	Risaralda	Inceptisol	4,5	0,17	3,6	0,25	1,56	0,58	0,03	3,9	18	2	18,7	86	122	1,2	6,0	0,00	55	34	11	Ar
9	Cauca	Andisol	4,6	0,70	21,6	0,27	1,69	0,47	0,04	1,6	39	12	5,5	758	22	6,3	4,3	0,34	24	35	41	F
10	Cauca	Andisol	5,3	0,58	16,2	0,58	5,71	2,24	0,04	0,3	33	12	4,8	168	22	8,8	5,5	0,49	28	31	41	FAr
11	Cauca	Andisol	4,8	0,66	19,4	0,27	1,00	0,30	0,03	1,4	39	12	3,0	149	14	4,1	4,8	0,33	26	32	42	F
12	Caldas	Andisol	4,3	0,46	11,6	0,07	0,22	0,09	0,05	1,2	26	30	20,0	165	9	2,7	5,9	0,35	21	27	52	FArA
13	Caldas	Andisol	4,6	0,46	11,8	0,09	0,16	0,07	0,04	1,0	26	36	16,8	183	7	2,9	26,0	0,39	20	29	51	F
14	Santander	Inceptisol	4,0	0,45	11,4	0,50	1,80	0,38	0,03	6,7	27	17	5,3	991	6	2,2	2,0	0,46	67	19	15	Ar
15	Santander	Molisol	5,2	0,21	4,6	0,16	4,17	0,81	0,06	0,2	12	9	5,3	358	108	2,7	2,1	0,39	19	23	59	FA
16	Santander	Inceptisol	4,5	0,34	8,2	0,16	1,39	0,15	0,06	2,5	19	6	3,0	704	4	2,4	1,7	0,42	44	25	30	Ar
17	Nariño	Andisol	5,2	0,38	9,3	0,54	1,60	0,35	0,06	1,1	19	14	4,3	159	16	2,2	8,9	0,49	20	24	56	FA
18	Huila	Inceptisol	4,8	0,29	6,7	0,43	1,13	0,49	0,01	1,1	10	43	5,4	244	22	2,6	1,0	0,44	13	18	69	FA
19	Huila	Inceptisol	4,6	0,28	6,4	1,07	4,69	1,58	0,03	1,6	22	28	9,2	409	17	5,7	4,0	0,42	31	26	43	FAr
20	Huila	Molisol	4,4	0,28	6,4	0,88	1,74	0,66	0,03	1,3	16	12	11,2	558	14	5,7	12,5	0,48	33	16	51	FArA
21	Huila	Inceptisol	4,7	0,32	7,6	0,25	2,73	1,85	0,08	0,9	19	4	11,2	396	38	3	5,5	0,07	49	20	30	Ar
22	Quindío	Andisol	5,1	0,28	6,4	0,25	2,07	0,44	0,03	0,5	18	24	16,3	135	9	2,7	3,2	0,18	13	22	65	FA
23	Quindío	Andisol	4,7	0,33	7,9	0,25	1,59	0,30	0,03	1,0	19	66	16,3	146	4	0,9	1,1	0,26	15	21	64	FA
24	Antioquia	Inceptisol	4,1	0,16	3,3	0,12	0,20	0,12	0,03	4,3	13	9	13,8	156	15	6,1	2,7	0,41	40	40	20	Ar
25	Antioquia	Andisol	4,2	0,47	12,1	0,16	0,07	0,16	0,02	4,0	28	3	18,3	559	7	2,2	2,1	0,50	54	22	24	Ar

^a Potenciométrico (H₂O, 1:1); ^b Calculado: %N=0,016 + 0,0453(%MO)-0,00063(%MO)²; ^c Materia orgánica según método Walkley-Black; ^d Ac. amonio 1,0 M pH=7,0 extractante; ^e KCl 1,0 M extractante; ^f Ac. amonio 1,0 M pH=7,0; ^g Bray II extractante; ^h Fosfato monocálcico extractante; ⁱ EDTA 0,01 M y Ac. amonio 1,0 M extractante; ^j Método de Bouyucos (Carrillo, 1985).

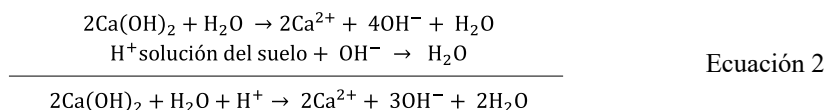
pesaron y se midió el pH. Con base en el volumen de las materas, el peso de suelo que ocupaba dicho volumen y la equivalencia de CaCO₃.MgCO₃ a CaCO₃, se hizo la conversión de unidades de dosis de dolomita en g dm⁻³ a CaCO₃ en g kg⁻¹ de suelo (**Anexo 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1405/3158>). La ecuación 1 describe las reacciones químicas que ocurren en el proceso de incubación y las especies formadas (Havlin, et al., 2017; Espinosa & Molina, 1999):



Ecuación 1

Método de titulación directa con Ca(OH)₂

Haciendo el procedimiento por triplicado, se agregó una muestra de 25 g de cada suelo a un tubo plástico de polipropileno de 250 mL con tapa de rosca; posteriormente, se adicionaron 25 mL de agua tipo II. La mezcla se agitó durante 30 min en un agitador horizontal marca Bioblock Scientific a 150 $\text{rot} \cdot \text{min}^{-1}$ y se midió el pH; se adicionaron después los siguientes volúmenes de Ca(OH)₂ 0,02 M hasta alcanzar valores de pH superiores a 6,0: 2, 4, 8, 16, 32 y 64 mL. El intervalo de tiempo para cada adición de la solución de Ca(OH)₂ fue de 30 min; la suspensión del suelo se agitó constantemente durante la titulación y la medición del pH entre cada intervalo de tiempo, según lo descrito por Liu, *et al.* (2004). Según la concentración de la solución de Ca(OH)₂, las equivalencias de los pesos moleculares y el peso de suelo evaluado, se hizo la conversión de unidades de dosis de Ca(OH)₂ en mL g^{-1} de suelo a CaCO₃ en g kg^{-1} de suelo (**Anexo 2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1405/3159>). La ecuación 2 describe la reacción química que ocurre en el proceso de titulación y las especies formadas (Havlin, *et al.*, 2017; Espinosa & Molina, 1999).



Análisis estadístico

Se evaluaron diferentes modelos de regresión para describir los cambios del pH con cada método de laboratorio en función de los tratamientos; para ello fue necesario expresar las dosis de dolomita y Ca(OH)₂ en unidades de CaCO₃ (g kg^{-1} de suelo). Para el análisis de la bondad del ajuste y la selección de los mejores modelos, se utilizaron el coeficiente de determinación (R²) y su variante ajustada (R² aj) y la raíz del cuadrado medio del error (RCME) (Kaplan & Kemal, 2018).

Este procedimiento permitió seleccionar dos modelos: el lineal ($y=a+bx$) y el exponencial ($y=a+b(1-e^{-cx})$). Una vez obtenidas las ecuaciones para cada método y suelo, se estimaron las dosis necesarias para alcanzar el pH de 5,5, definido como óptimo para el cultivo de café en las condiciones de Colombia (Sadeghian, 2016). Posteriormente, se compararon los valores promedio de los dos métodos mediante la prueba *t* de Student ($p<0,05$) y se hizo un análisis de regresión múltiple con el fin de establecer la relación entre las diferencias de las dosis de CaCO₃ para alcanzar el pH 5,5 según los métodos evaluados y las propiedades químicas y la textura de las muestras de suelo evaluadas (**Tabla 1**). El grado de acuerdo entre el método de incubación y el método de titulación ajustado se midió mediante la prueba de Bland-Altman. Para el procesamiento estadístico se utilizaron los programas SigmaPlot 10.0 (2006), Statgraphics Centurion XV 15.2.14 (2007) y SAS 9.4 (TS1M5).

Resultados y discusión

En la **figura 1** se presentan los cambios del pH en respuesta a los tratamientos en cada uno de los suelos evaluados. En el método de incubación los incrementos del pH se ajustaron a la función exponencial creciente de la forma $y=a+b(1-e^{-cx})$, en la cual las tasas tienden a reducirse con el aumento de las dosis equivalentes de CaCO₃, en tanto que en el método de titulación los incrementos del pH por unidad de CaCO₃ suministrada fueron mayores y se ajustaron a la función lineal $y=a+bx$. Como se discutirá más adelante, este resultado se relaciona con la diferencia en la solubilidad y con la reactividad de la caliza dolomítica y el hidróxido de calcio. Como consecuencia, en el método de titulación se requirió de una menor cantidad de agente alcalinizante para alcanzar el pH de 5,5.

Con el propósito de ilustrar las variaciones entre los dos métodos evaluados con mayor detalle, a manera de ejemplo, en la **figura 2** se presentan los cambios del pH en función de las dosis equivalentes de CaCO₃ y las dosis requeridas para alcanzar el pH de 5,5 para la muestra de suelo 1.

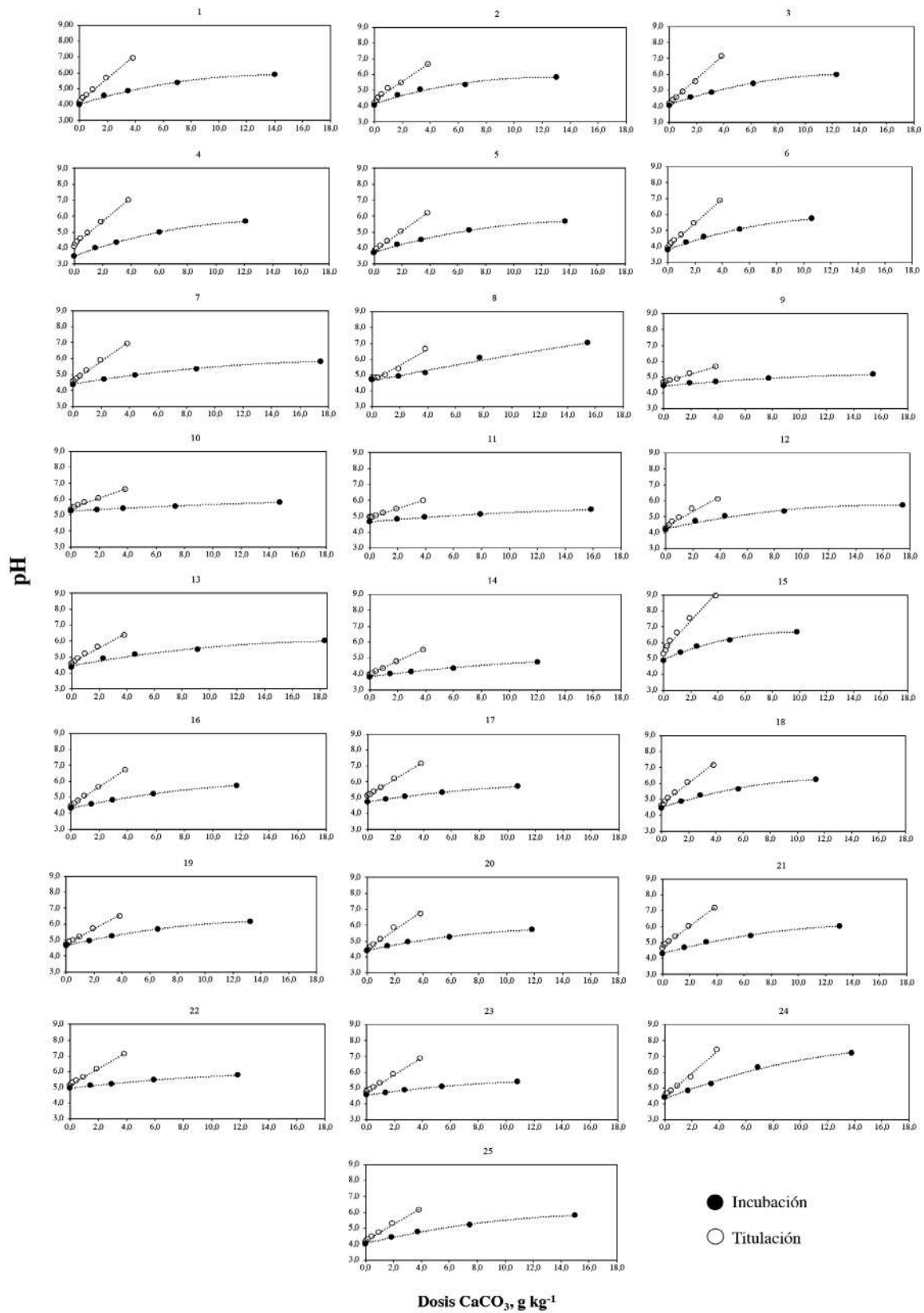


Figura 1. Cambios del pH del suelo en función de dosis equivalentes de CaCO_3 registrados en los métodos de titulación e incubación para 25 muestras de suelo de la zona cafetera de Colombia

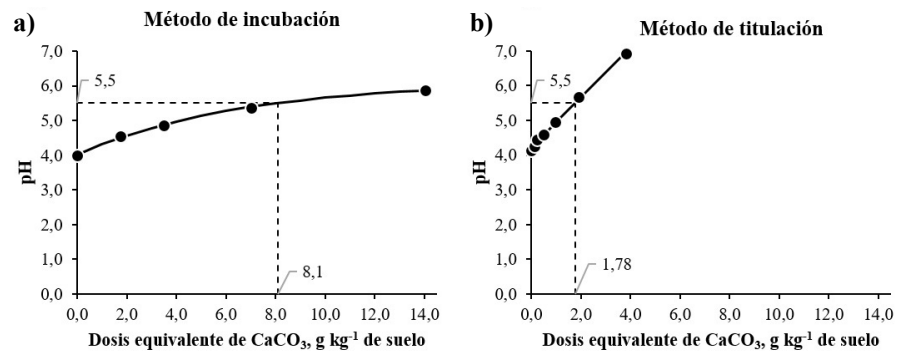


Figura 2. Cambios del pH del suelo en función de dosis equivalentes de CaCO₃ registrados en los métodos de incubación (a) y titulación (b) para la muestra de suelo 1

En las **tablas 2 y 3** se consignan las ecuaciones y los respectivos parámetros estadísticos que se tuvieron en cuenta como criterios de bondad de ajuste de los modelos seleccionados en cada uno de los métodos. Tanto los altos coeficientes de determinación (R^2) y de determinación ajustados (R^2 aj), como los menores valores de la raíz del cuadrado medio del error (RCME) y la significación de los parámetros de las ecuaciones ($p < 0,05$), muestran que los modelos exponencial y lineal presentaron buen ajuste y lograron describir adecuadamente los resultados de los métodos de incubación y titulación, respectivamente.

En el método de incubación el incremento del pH puede ocurrir de manera proporcional (lineal) (McFarland, *et al.*, 2020) o decreciente (exponencial asintótico); en este sentido, Sadeghian & Díaz-Marín (2020), Castro & Munévar (2013) y Castro, *et al.* (2006) reportaron para las condiciones de Colombia dos tendencias y relacionaron esta diferencia con las propiedades físicas y químicas de los suelos. Asimismo, Uchida & Hue (2000) y Bailey, *et al.* (1989) describieron en suelos de Hawaii y de Irlanda, respectivamente, respuestas en su mayoría exponenciales en las que, debido a las diferencias entre suelos, los primeros recomiendan preferiblemente determinar los requerimientos de cal para cada tipo de suelo. Por lo general, en las curvas de incubación las tasas del incremento del pH se reducen con el aumento de las dosis sin sobrepasar un pH de 7,0, ya que el material encalante, el cual suele ser cal agrícola, dolomita o una mezcla de ambas (Teixeira, *et al.*, 2020; Castro & Munévar, 2013), posee baja solubilidad y reduce sustancialmente su capacidad de reacción cuando el pH supera dicho valor. En este caso, el aumento de este parámetro está limitado por la velocidad a la que los hidrogeniones (H^+) se neutralicen, de modo que, para que continúe la reacción de disociación del carbonato (proceso en el que se da la formación a ácido carbónico), debe haber H^+ en la solución del suelo (ecuación 1) (Havlin, *et al.*, 2017; Espinosa & Molina, 1999).

En cuanto al método de titulación, se confirmó lo descrito por Magdoff & Bartlett (1985) y Weaver, *et al.* (2004) en cuanto a que las curvas de titulación son aproximadamente lineales en un rango de pH de 4,5 a 6,5. Por esta razón, en este método Liu, *et al.* (2004) y Liu, *et al.* (2005) sugieren una sola adición de hidróxido de calcio y un tiempo de reacción de 30 min para determinar los requerimientos de cal en suelos ácidos. Con este procedimiento se obtiene una ecuación lineal partiendo de un punto inicial (pH original del suelo) para llegar a un punto final con la adición de 3 mL Ca(OH)₂. Cabe aclarar que en estos trabajos se comparó el método de titulación directa con incubación aplicando una solución de hidróxido de calcio por 4 a 5 días, tiempo en el que el pH alcanzó estabilidad sin que se hiciera mezclado durante el proceso, lo que se denomina titulación con incubación.

En cuanto al tiempo requerido para las mediciones, en el método de incubación se necesitaron 50 días, en tanto que en el de titulación fueron necesarios 5 días. Cabe señalar que los períodos indicados tienen en cuenta el tiempo de preparación de la muestra, es decir, los procesos de secado y tamizado, así como la medición del pH posterior a la incubación en el método de incubación.

Tabla 2. Ecuaciones y estadísticos asociados con el modelo exponencial obtenidos para el método de incubación

Suelo	Ecuación	R ²	R ² aj	RCME
1	$\hat{y}=4,0125+2,1047(1-e^{-(0,1514x)})$	0,994	0,993	0,330
2	$\hat{y}=4,0957+1,7747(1-e^{-(0,2195x)})$	0,989	0,988	0,051
3	$\hat{y}=4,0744+2,3385(1-e^{-(0,1413x)})$	0,996	0,996	0,014
4	$\hat{y}=3,4942+2,7822(1-e^{-(0,1258x)})$	0,994	0,993	0,020
5	$\hat{y}=3,7133+2,3994(1-e^{-(0,124x)})$	0,990	0,989	0,020
6	$\hat{y}=3,775+2,5087(1-e^{-(0,1405x)})$	0,988	0,986	0,025
7	$\hat{y}=4,3832+1,7575(1-e^{-(0,0945x)})$	0,997	0,996	0,006
8	$\hat{y}=4,618+12,3193(1-e^{-(0,0141x)})$	0,980	0,977	0,117
9	$\hat{y}=4,4153+0,962(1-e^{-(0,0924x)})$	0,974	0,971	0,010
10	$\hat{y}=5,2522+1,0314(1-e^{-(0,0518x)})$	0,951	0,945	0,008
11	$\hat{y}=4,6448+1,0525(1-e^{-(0,0787x)})$	0,984	0,982	0,013
12	$\hat{y}=4,1807+1,6072(1-e^{-(0,1607x)})$	0,983	0,981	0,045
13	$\hat{y}=4,4048+1,8045(1-e^{-(0,1088x)})$	0,981	0,979	0,063
14	$\hat{y}=3,827+1,4534(1-e^{-(0,0825x)})$	0,968	0,964	0,009
15	$\hat{y}=4,907+1,9483(1-e^{-(0,2285x)})$	0,978	0,975	0,035
16	$\hat{y}=4,308+2,1449(1-e^{-(0,0939x)})$	0,959	0,954	0,007
17	$\hat{y}=4,7354+1,5004(1-e^{-(0,0956x)})$	0,983	0,981	0,012
18	$\hat{y}=4,4488+2,1767(1-e^{-(0,1485x)})$	0,996	0,995	0,031
19	$\hat{y}=4,6552+1,9316(1-e^{-(0,1139x)})$	0,992	0,991	0,012
20	$\hat{y}=4,4029+1,7188(1-e^{-(0,1196x)})$	0,989	0,987	0,020
21	$\hat{y}=4,3059+2,202(1-e^{-(0,1159x)})$	0,996	0,995	0,027
22	$\hat{y}=4,9458+1,2327(1-e^{-(0,0916x)})$	0,981	0,979	0,015
23	$\hat{y}=4,5475+1,2159(1-e^{-(0,1087x)})$	0,993	0,992	0,006
24	$\hat{y}=4,3207+4,4687(1-e^{-(0,077x)})$	0,988	0,986	0,089
25	$\hat{y}=4,0306+2,2512(1-e^{-(0,1026x)})$	0,994	0,993	0,024

Todos los parámetros del modelo fueron significativos ($p>0,05$), con excepción de a y b en el suelo 8 y b en el suelo 10.

Comparación de los métodos

Dado que los modelos matemáticos que explican las variaciones del pH en función de las dosis de CaCO_3 son diferentes, se puede afirmar que los métodos evaluados no son homogéneos o análogos. Es decir, que con el método de titulación no es posible obtener los mismos resultados que con el de incubación o, por lo menos, no de manera directa (**Tabla 4**). Lo anterior se pone de manifiesto en la diferencia significativa que presentaron los dos métodos objeto de estudio al estimar las dosis de cal necesarias para alcanzar un valor de pH igual a 5,5 (prueba t al 5 %). En las muestras de suelo 9 y 14 no fue posible determinar las dosis equivalentes de CaCO_3 requerida en el método de incubación, debido a que las curvas obtenidas no alcanzaron este valor de pH (**Figura 1**). En el caso de la muestra 15, usando el método de titulación no se necesitó adicionar cal para aumentar el pH, lo que se explicaría por su valor de pH cercano a 5,5. Como lo revelan estos resultados, el método de titulación subestimó los requerimientos de cal para neutralizar la acidez del suelo hasta alcanzar el nivel óptimo en el cultivo de café comparado con el método de referencia. Los hallazgos concuerdan con los reportes de **Godsey, et al.** (2007), quienes encontraron que las valoraciones por titulación generalmente subestiman, incluso cuando se deja un

Tabla 3. Ecuaciones y estadísticos asociados al modelo lineal obtenidos para el método de titulación

Suelo	Ecuación	R ²	R ² aj	RCME
1	$\hat{y}=4,2198+0,7184x$	0,996	0,995	0,056
2	$\hat{y}=4,3615+0,6037x$	0,979	0,977	0,113
3	$\hat{y}=4,1885+0,76x$	0,998	0,998	0,038
4	$\hat{y}=4,1817+0,7431x$	0,998	0,997	0,042
5	$\hat{y}=3,7853+0,632x$	0,997	0,997	0,044
6	$\hat{y}=3,974+0,7549x$	0,998	0,998	0,037
7	$\hat{y}=4,6099+0,6224x$	0,996	0,995	0,053
8	$\hat{y}=4,619+0,495x$	0,969	0,967	0,109
9	$\hat{y}=4,6471+0,2626x$	0,993	0,992	0,022
10	$\hat{y}=5,4545+0,3119x$	0,969	0,966	0,057
11	$\hat{y}=4,919+0,28x$	0,996	0,996	0,021
12	$\hat{y}=4,3799+0,4776x$	0,971	0,969	0,104
13	$\hat{y}=4,6371+0,4669x$	0,984	0,983	0,074
14	$\hat{y}=3,978+0,4047x$	0,997	0,997	0,019
15	$\hat{y}=5,5398+0,9274x$	0,972	0,969	0,177
16	$\hat{y}=4,4937+0,5832x$	0,998	0,997	0,025
17	$\hat{y}=5,1188+0,5296x$	0,997	0,997	0,023
18	$\hat{y}=4,7123+0,6572x$	0,991	0,991	0,075
19	$\hat{y}=4,7766+0,4654x$	0,993	0,992	0,040
20	$\hat{y}=4,4699+0,6125x$	0,979	0,978	0,096
21	$\hat{y}=4,7372+0,6435x$	0,997	0,997	0,040
22	$\hat{y}=5,1526+0,5155x$	0,999	0,999	0,019
23	$\hat{y}=4,7606+0,547x$	0,998	0,998	0,028
24	$\hat{y}=4,4361+0,7457x$	0,992	0,991	0,085
25	$\hat{y}=4,212+0,516x$	0,994	0,994	0,049

Todos los parámetros del modelo fueron significativos ($p>0,05$).

tiempo de equilibrio de siete días (**Baker & Chae, 1977**). Algunas de las discrepancias expuestas en los estudios se han explicado con el argumento de que los resultados son inherentes al tipo de suelo y que los métodos se han desarrollado para suelos de zonas específicas (**Godsey, et al., 2007**). En este sentido, **Bailey, et al. (1989)** y **Farhoodi & Coventry (2008)** concuerdan en que se debe discriminar la respuesta del material para encalado según el tipo de suelo, de allí la importancia de calibrar los requerimientos de cal con base en las características propias de los suelos locales o regionales (**Godsey, et al., 2007**). Se destaca que en este estudio se incluyeron muestras de suelo con propiedades físicas y químicas contrastantes procedentes de diversas áreas de la zona cafetera colombiana que tenían desde un pH muy ácido (3,6) hasta valores adecuados para el café (5,3); materia orgánica muy baja (3 %) y con niveles altos (22 %); Ca de 0,07 a 5,71 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; Mg de 0,07 a 2,24 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; K de 0,07 a 1,07 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; Al^{3+} de 0,2 y 6,7 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; CIC de 10 a 39 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; P de 2 a 102 mg kg^{-1} ; S de 3 a 24 mg kg^{-1} ; Fe de 86 a 1495 mg kg^{-1} ; Mn de 4 a 122 mg kg^{-1} ; Zn de 0,9 a 12,4 mg kg^{-1} ; Cu de 1 a 26 mg kg^{-1} , y B de 0,09 a 0,56 mg kg^{-1} (**Tabla 1**). Dichas variaciones se relacionan tanto con el origen de los suelos como con su manejo. En cuanto al origen, se resalta la representación de los principales órdenes de la zona cafetera: Inceptisol (60,7 %), Andisol (17,6 %), Entisol (10,5 %) y Molisol (8 %) (**Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC & Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2017**).

Tabla 4. Dosis equivalentes de CaCO₃ estimadas con los métodos de incubación y titulación para alcanzar un valor de pH de 5,5

Suelo	Método	
	Incubación	Titulación
	$x=f(y : 5,5)$	$x=f(y : 5,5)$
Dosis CaCO ₃ , g kg ⁻¹ suelo		
1	8,10	1,78
2	7,14	1,89
3	6,66	1,73
4	10,15	1,77
5	11,01	2,71
6	8,28	2,02
7	10,68	1,43
8	5,27	1,78
9	-	3,25
10	5,30	0,15
11	21,27	2,08
12	10,70	2,35
13	8,58	1,85
14	-	3,76
15	1,59	-0,04
16	8,64	1,73
17	7,45	0,72
18	4,44	1,20
19	5,05	1,55
20	8,50	1,68
21	6,74	1,19
22	6,52	0,67
23	14,07	1,35
24	3,98	1,43
25	10,31	2,50

Los resultados del estudio difieren de lo descrito por **Kissel, et al.** (2007), quienes proponen que el método de titulación se realice con dos mediciones de pH únicamente, una adición de hidróxido de calcio y un tiempo de equilibrio de 30 minutos. En este sentido, **Thompson, et al.** (2010) demostraron que el equilibrio en el pH del suelo después de la adición del hidróxido de calcio y de una agitación por 20 segundos se alcanzó después de 84 h. No obstante, con una relación calculada experimentalmente se recomienda la titulación en un tiempo de 30 minutos, tal como en el presente estudio. Además, se debe resaltar que en los trabajos de **Liu, et al.** (2004) y **Kissel, et al.** (2007) se empleó la prueba de incubación con una solución de Ca(OH)₂ por 3 a 5 días como estándar de comparación, en tanto que en este se empleó una incubación con cal dolomita por 45 días, lo que puede explicar parte de las diferencias encontradas.

Las variaciones en las dosis de cal entre el método de incubación y el de titulación pueden obedecer al tipo de material de encalado, la forma de aplicación y el tiempo de reacción. En el método de incubación se empleó dolomita incorporada en forma sólida a un

volumen de suelo, y la mezcla se mantuvo durante 45 días. En contraste, en el método de titulación se empleó una solución de hidróxido de calcio, la cual se adicionó a una mezcla de suelo y agua. En tanto que la cal dolomita reacciona en presencia de acidez y humedad y en el proceso se da formación a iones hidroxilo (OH⁻), los cuales causan el aumento del pH (ecuación 1), la solución de hidróxido de calcio ya los tiene disponibles, así que el aumento del pH se alcanza más rápidamente (ecuación 2). Vale la pena destacar, sin embargo, que en cada método se tuvo en cuenta el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio en el pH del suelo.

Es importante tener presente que la medición del pH en el método de titulación se efectuó a los 30 minutos de cada adición de la solución de Ca(OH)₂, en tanto que el procedimiento establecido para la medición de dicho parámetro en un análisis de suelos recomienda hacerlo pasada una hora.

Regresión múltiple

Debido a las diferencias significativas detectadas entre los valores promedio de los dos métodos, se buscó una expresión matemática que permitiera obtener una aproximación significativa a las dosis requeridas de cal a partir de los resultados logrados con cada método evaluado. Para ello se calculó la diferencia entre las dosis de CaCO₃ obtenidas con los dos métodos para alcanzar el valor de pH de 5,5. Posteriormente, se hizo una regresión múltiple que explicara estas diferencias en función de las propiedades medidas en el análisis de suelos (**Tabla 1**). El análisis de regresión múltiple generó una ecuación con la que se puede obtener un valor de corrección para el método de titulación con base en las propiedades químicas y la textura del suelo, el cual se debe sumar a la dosis determinada para el respectivo ajuste:

$$\hat{y} = 17,1184 + 7,81886MO - 217,177N + 0,0624708P + 7,50119K - 4,4739Mg + 0,203864S + 0,471334Al + 120,771Na - 0,0289981Mn - 0,131875Cu - 8,61187B - 0,265682L$$

La ecuación obtenida tiene un R² de 0,97 y R² ajustado de 0,94, con un marcado nivel de significación en todos los parámetros (p<0,05). A continuación se presenta un ejemplo de la aplicación de dicha ecuación para la muestra de suelo 1, en cuyo caso el requerimiento de cal por el método de titulación fue de 1,78 g CaCO₃ kg⁻¹ (**Tabla 4**). Los valores de las variables incluidas en la ecuación se encuentran en la **tabla 1**:

$$\hat{y} = 17,1184 + 7,81886*5,8 - 217,177*0,26 + 0,0624708*12 + 7,50119*0,23 - 4,4739*0,17 + 0,203864*15 + 0,471334*2,9 + 120,771*0,02 - 0,0289981*13 - 0,131875*7 - 8,61187*0,10 - 0,265682*27$$

$$\hat{y} = 5,22.$$

El resultado obtenido se suma a la dosis obtenida en el método de titulación. Así, la dosis necesaria para alcanzar un pH de 5,5 es igual a 1,78 g CaCO₃ kg⁻¹ + 5,22 g CaCO₃ kg⁻¹ = 7,00 g CaCO₃ kg⁻¹ de suelo.

Estos resultados corroboran lo descrito por **Teixeira, et al.** (2020) para estimar los requerimientos de cal. Para ello es necesario conocer algunas propiedades físicas y químicas de los suelos relacionadas con la resistencia al cambio de pH (capacidad de *buffer*). Entre las características de los suelos que han sido combinadas en modelos matemáticos para predecir los requerimientos se encuentran el pH y la materia orgánica (**Edmeades, et al.**, 1985), la CIC y el porcentaje de saturación de bases (**Quaggio, et al.**, 1985), el pH, el Al³⁺, las bases intercambiables y el carbono orgánico (**Hochman et al.**, 1995), el pH, la textura, el contenido de materia orgánica y la CIC (**Alatas, et al.**, 2005), la materia orgánica, el hierro extraíble y el contenido de arcillas (**Curtin & Trolove**, 2013) y el pH, la materia orgánica y el nivel de acidez potencial (**Teixeira, et al.**, 2020). En cuanto a la titulación con Ca(OH)₂, **Owusu-Bennoah, et al.** (1995) correlacionaron los requerimientos de cal con la materia orgánica, el Al³⁺ y el contenido de arcillas cuando el método se desarrolló en 72 horas. Así, se evidencia que la metodología evaluada puede ser efectiva para suelos de la

zona cafetera de Colombia, sin que necesariamente sea aplicable en otras regiones debido a las diferencias en las características de los suelos de cada zona, lo que es determinante en la forma de cambiar el pH de un suelo.

En la **figura 3** se observa la alta correlación entre las dosis de cal obtenidas en el método de incubación y las generadas con el de titulación una vez corregidas. Las muestras de suelo 9 y 14 no se incluyeron en el análisis dado que no alcanzaron valores de pH de 5,5, razón por la que el análisis se hizo con 23 muestras.

El grado de acuerdo entre los métodos, medido con la prueba de Bland-Altman, permitió obtener un diagrama de dispersión (**Figura 4**) que en el eje de las ordenadas presenta las diferencias entre los métodos de medición y en el eje de las abscisas, la media. Este análisis indica que el 95 % de las magnitudes de las diferencias entre los métodos se encontró dentro de un rango de diferencias de -1 y 1 dosis de CaCO_3 (g kg^{-1} suelo), lo cual indica que los dos métodos son consistentes, es decir, que pueden usarse indistintamente,

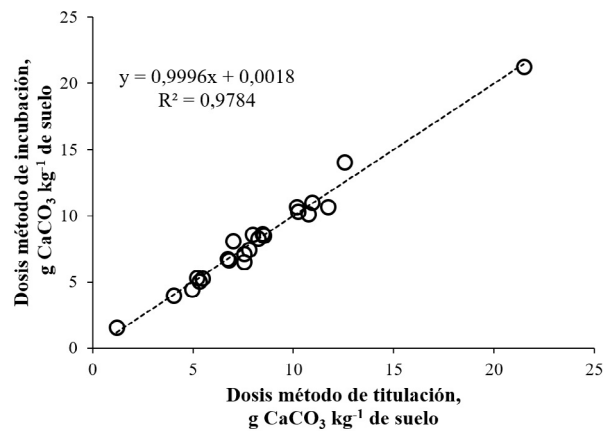


Figura 3. Requerimientos de CaCO_3 determinados por el método de titulación ajustado a través de la regresión múltiple en función de los requerimientos de cal obtenidos mediante el método de incubación (n=23)

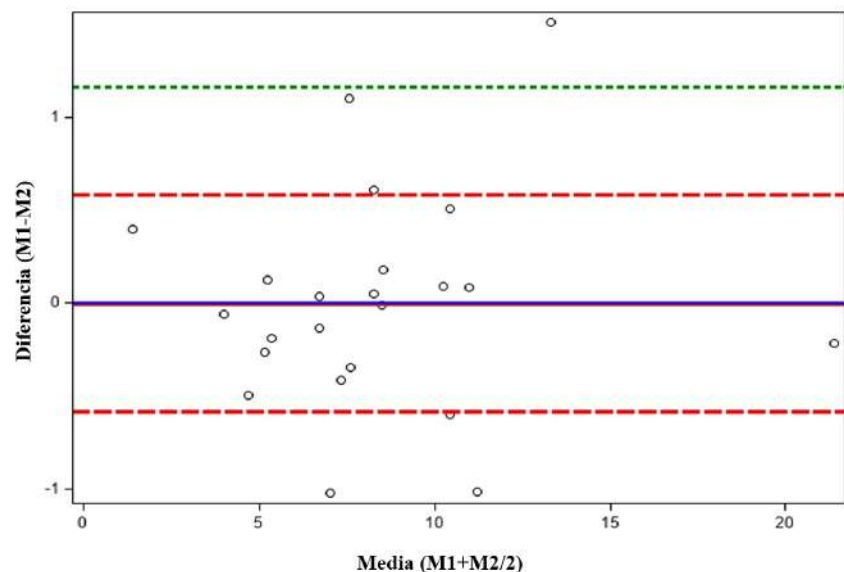


Figura 4. Análisis de concordancia de la diferencia entre el método de incubación (M1) y el método de titulación ajustado (M2) versus la media de las dos mediciones

dado que hay un nivel de discrepancia permitido en este tipo de determinaciones. Como resultado, el ajuste realizado al método de titulación lo equiparó con el método de incubación para determinar los requerimientos de cal en suelos con problemas de acidez en la zona cafetera colombiana.

Los resultados del estudio evidenciaron que el método de titulación para medir los requerimientos de cal puede emplearse en suelos de la zona cafetera colombiana si se hace un ajuste basado en la caracterización química y de la textura de las muestras. Se resalta que, como consecuencia de la naturaleza química de los suelos, el método de titulación pudo ajustarse mediante una expresión matemática.

Conclusiones

El método de titulación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para determinar los requerimientos de cal fue más rápido que el de incubación con caliza dolomítica ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$); sin embargo, este método subestimó dichos requerimientos para los suelos de la zona cafetera de Colombia. Por ello, las dosis obtenidas con este método no pudieron aplicarse directamente para definir dichos requerimientos.

Se halló una ecuación que permitió aproximar los valores de tales requerimientos obtenidos con la titulación a aquellos calculados mediante la incubación. Esta ecuación explicó el 94 % de la variación total y contiene las siguientes propiedades químicas y físicas del suelo: materia orgánica, N, P, K, Mg, S, Al, Na, Mn, Cu, B y limos. El valor generado por esta expresión matemática correspondió a un factor de corrección que se debe sumar a los valores obtenidos con el método de titulación.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a los líderes departamentales de extensión de la Federación Nacional de Cafeteros, y en Cenicafé, al Dr. Rubén Darío Medina, líder de la disciplina de biometría, y a la señora Claudia Marcela Ospina, auxiliar de la disciplina de suelos.

Información suplementaria

Anexo 1. Conversión de unidades de dosis de dolomita en g dm^{-3} a CaCO_3 en g kg^{-1} de suelo. Ver anexo 1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1405/3158>

Anexo 2. Conversión de unidades de dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en mL g^{-1} de suelo a CaCO_3 en g kg^{-1} de suelo. Ver anexo 2 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1405/3159>

Contribución de los autores

VCDP: seleccionó la metodología de titulación directa con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como alternativa frente al método de incubación, estandarizó los métodos, hizo los análisis de laboratorio, generó la base de datos y elaboró el manuscrito; SS: contribuyó con la idea de la investigación, seleccionó y obtuvo las muestras de suelos, participó en el análisis y discusión de los resultados y contribuyó en la revisión del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Adams, F. & Evans, C.E. (1962). A rapid method for measuring lime requirement of red-yellow podzolic soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. **26**: 355-357.
- Aitken, R. L., Moody, P. W., McKinley, P. G. (1990). Lime requirement of acidic Queensland soils. II. Comparison of laboratory methods for predicting lime requirement. *Soil research*. **28** (5): 703-715.

- Alabi, K. E., Sorensen, R. C., Knudsen, D., Rehm, G. W.** (1986). Comparison of several lime requirement methods on coarse-textured soils of Northeastern Nebraska. *Soil Science Society of America Journal*. **50** (4): 937-941.
- Alatas, J., Tsadilas, C.D., Sgouras, J.** (2005). Comparison of two methods of lime requirement determination. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **36** (1-3): 183-190. Doi: 10.1081/CSS-200043028
- Alley, M.M. & Zelazny, L.W.** (1987). Soil acidity: Soil pH and lime needs. En: Brown, J.R., *Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*, Volume 21, pp. 65-72. Soil Science Society of America, Inc. Doi: 10.2136/sssaspecpub21.c7
- Álvarez, V.H. & Ribeiro, A.C.** (1999). Calagem. En: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Álvarez V., V. H. (Ed.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a. Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 43-60.
- Baker, A.S. & Chae, Y.M.** (1977). A laboratory quick test for predicting lime requirement of acid mineral soils. *Tech. Bull. 88*. Washington Agric. Exp. Stn. Pullman. 1-11.
- Bailey, J.S., Stevens, D.J., Kilpatrick, J.** (1989). A rapid method for predicting the lime requirement of acidic temperate soils with widely varying organic matter contents. III. A lime-quality correction model. *Journal of Soil Science*. **40**: 831-847.
- Cabrales H., E. M, Velázquez H., C. M., Ayala C., J.** (2018). Determinación de la curva de requerimientos de cal para un alfisol bajo condiciones de vivero. Doi: 10.13140/RG.2.2.14825.13921
- Caires, E.** (2010). Manejo da acidez do solo. En: L. I. Prochnow, V. Casarin, S. R. Stipp (Eds.), *Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Contexto mundial e práticas de suporte* (Vol. 1, pp. 277-347). International Plant Nutrition Institute.
- Carrillo, I.** (1985). *Manual de laboratorio de suelos*. Chinchiná: Centro Nacional de Investigaciones de Café.
- Castro, H. & Munévar, O.** (2013). Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. **16** (2): 409-416.
- Castro, H., Gómez, M., Munévar, O., Hernández, D.** (2006). Diagnóstico y control de la acidez en suelos sulfatados ácidos en el Distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá) mediante pruebas de incubación. *Agronomía Colombiana*. **24** (1): 122-130.
- Cochrane, T., Salinas, J., Sánchez, P.** (1980). An equation for liming acid mineral soils to compensate crops aluminium tolerance. *Tropical Agriculture*. **57** (2): 133-140.
- Curtin, D. & Trolove, S.** (2013). Predicting pH buffering capacity of New Zealand soils from organic matter content and mineral characteristics. *Soil Res*. **51**: 494-502. Doi: 10.1071/SR13137
- Dunn, L. E.** (1943). Lime-requirement determination of soils by means of titration curves. *Soil Science*. **56**: 341-351.
- Edmeades, D. C., Wheeler, D. M., Waller, J. E.** (1985). Comparison of methods for determining lime requirements of New Zealand soils. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. **28** (1): 93-100.
- Espinosa, J. & Molina, E.** (1999). Acidez y encalado de los suelos. *Infopos*. **1-5**: 29-30.
- Farhoodi, A. & Coventry, D.R.** (2008). Field crop responses to lime in the mid-north region of South Australia. *Field Crops Research*. **108**: 45-53.
- Godsey, C. B., Pierzynski, G. M., Mengel, D. B., Lamond, R.E.** (2007). Evaluation of common lime requirement methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **71**: 843-850. Doi: 10.2136/sssaj2006.0121
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.** (2017). *Atlas cafetero de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, 65-254.
- Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, J., Beaton, J.** (2017). *Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management*, (8th edition). Pearson Prentice Hall. 35, 68-71, 81.
- Hochman, Z., Crocker, G.J., Dettman, E.B.** (1995). Predicting lime-induced changes in soil-pH from exchangeable aluminum, soil-pH, total exchangeable cations and organic-carbon values measured on unlimed soils. *Soil Res*. **33**: 31-41. Doi: 10.1071/SR9950031
- Kamprath, E. J.** (1970). Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils 1. *Soil Science Society of America Journal*. **34** (2): 252-254.
- Kaplan, S. & Kemal G., E.** (2018). Comparison of growth curves using non-linear regression function in Japanese quail. *Journal of Applied Animal Research*. **46** (1): 112-117. Doi: 10.1080/09712119.2016.1268965
- Kissel, D. E., Isaac, R. A., Hitchcock, L. S., Sonon, L. S. Venderll, P. F.** (2007). Implementation of soil lime requirement by a single-addition titration method. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **38**: 1341-1352. Doi: 10.1080/00103620701328735

- Liu, M., Kissel, D. E., Vendrel, P.F., Cabrera, M. L.** (2004). Soil lime requirement by direct titration with calcium hydroxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**: 1228-1233. Doi: 10.2136/sssaj2004.1228
- Liu, M., Kissel, D. E., Cabrera, M.L., Vendrell, P. F.** (2005). Soil lime requirement by direct titration with a single addition of calcium hydroxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **69**: 522-530. Doi: 10.2136/sssaj2004.1228
- Magdoff, F.R. & Bartlett, R.J.** (1985). Soil pH buffering revisited. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **49**: 145-148. Doi: 10.2136/sssaj1985.03615995004900010029x
- McFarland, C.; Shiwakoti, S.; Carpenter-Boggs, L.; Schroeder, K.; Brown, T., Huggins, D.** (2020). Evaluating buffer methods for determining lime requirement on acidified agricultural soils of the Palouse. *Soil Science Society of American Journal.* **84**: 1769-1781.
- McLean, E.O.** (1982). Soil pH and lime requirement. In: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* 2nd edition. Page AL ed., Am. Soc. Agronomy. Soil Sci. Soc. Am. 199-224.
- Mehlich, A.** (1976). New buffer pH method for rapid estimation of exchangeable acidity and lime requirement of soils. *Commun. in Soil Science and Plant Analysis.* **7** (7): 637-652. Doi: 10.1080/00103627609366673
- Owusu-Bennoah, E., Acquaye, D.K., Mahamah, T.** (1995). Comparative study of selected lime requirement methods for some acid Ghanaian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* **26** (7-8): 937-950. Doi: 10.1080/00103629509369346
- Pagani, A. & Mallarino, A. P.** (2011). Comparison of methods to determine crop lime requirement under field conditions, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **76**: 1855-1866. Doi: 10.2136/sssaj2011.0327
- Quaggio, J.A., van Raij, B., Malavolta, E.** (1985). Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soils. *Commun Soil Sci Plan.* **16**: 245-60. Doi: 10.1080/00103628509367600
- Raij, B. van.** (1991). *Fertilidade do solo e adubacao. Potafos*, 343.
- Raij, B. van.** (2011). *Acidez e calagem. En: Fertilidade do solo e Manejo de nutrientes.* IPNI. Piracicaba. 1-420.
- Sadeghian, S.** (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé.* **32**: 14-15.
- Sadeghian, S.** (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 466.
- Sadeghian K., S.; Alarcón T., V. F., Díaz-Poveda, V.C., Lince S., L. A., Rey S., J.C.** (2019). Fertilidad del suelo y manejo de la nutrición. En *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Ed.), Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo de café ajustado a las condiciones particulares del Huila*, (pp. 80-105). Cenicafé.
- Sadeghian K., S., Díaz-Marín, C.** (2020). Corrección de la acidez del suelo: alteraciones químicas del suelo. *Revista Cenicafé.* **71** (1): 7-20. Doi: 10.38141/10778/1116
- SAS Institute Inc.** (2017). SAS, Cary, North Carolina, USA.
- Shoemaker, H. E., McLean, E. O., Pratt, P. F.** (1961). Buffer methods for determination of lime requirements of soils with appreciable amounts of exchangeable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **25**: 274-277.
- Systat Software Inc.** (2006). Sigma Plot 10.0, Systat Software Inc., CA, USA.
- Sikora, F.J.** (2006). A buffer that mimics the SMP buffer for determining lime requirement of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**: 474-486. Doi: 10.2136/sssaj2005.0164
- Sims, J.T.** (1996). Lime requirement. En: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E., *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5.3, Soil Science Society of America, Inc. Doi: 10.2136/sssabookser5.3.c17
- Soil Science Society of America.** (2008). *Glossary of Soil Science Terms.* Soil Science Society of America, Madison.
- Sousa, D.M., Miranda, L.N., Oliveira, S.A.** (2007). Acidez do solo e sua correção. En: Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L., Cantarutti, R.B., Neves, J.C., eds. *Fertilidade do solo.* Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 206-274.
- Ssali, H. & Nuwamanya, J. K.** (1981). Buffer pH methods for estimation of lime requirement of tropical acid soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* **12** (7): 643-659.
- StatPoint Technologies. Inc.** (2007). *Statgraphics Centurion, X.V. Version 15.2.14; Software for Technical Computation.* StatPoint Technologies. Inc., Warrenton, VA, USA.

- Teixeira, W.G., Alvarez V., V.H., Lima, J.C.** (2020). New methods for estimating lime requirement to attain desirable pH values in Brazilian soils. *Rev Bras Cienc Solo*. **44**: e0200008. Doi: 10.36783/18069657rbcs20200008
- Thompson, J.S., Kissel, D.E., Cabrera, M.L., Sonon, L.S.** (2010). Equilibration Reaction from Single Addition of Base to Determine Soil Lime Requirement. *Soil Science Society of America Journal*. **74** (2): 663-669. Doi: 10.2136/sssaj2009.0168
- Tunney, H., Sikora, F. J., Kissel, D., Wolf, A., Sonon, L., Goulding, K.** (2010). A comparison of lime requirements by five methods on grassland mineral soils in Ireland. *Soil use and management*. **26** (2): 126-132.
- Viscarra R. & McBratney, A.B.** (2001). A response-surface calibration model for rapid and versatile site-specific lime-requirement predictions in south-eastern Australia. *Australian Journal of Soil Research*. **39** (1): 185-201. Doi: 10.1071/SR99131
- Uchida, R. & Hue, N.V.** (2000). Soil acidity and liming. En: Silva, J.A., Uchida, R. *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture*. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa. p. 101-111.
- Weaver, A.R., Kissel, D.E., Chen, F., West, L.T., Adkins, W., Rickman, D., Luvall, J.C.** (2004). Mapping soil pH buffering capacity of selected fields in the Coastal. *Plain. Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**: 662-668. Doi: 10.2136/sssaj2004.6620
- Woodruff, C.M.** (1948). Testing Soils for Lime requirement by means of a buffered solution and the glass electrode. *Soil Science*. **66**: 53-63.
- Zapata, R.** (2004). *Química de la acidez del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. p. 43-55.
- Zapata, R.** (2014). *Los procesos químicos del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. p. 440-449.

Mathematics

Original article

Learning complex functions with GeoGebra

Aprendiendo funciones complejas con GeoGebra

Ana Maria D'Azevedo Breda^{1,*}, José Manuel Dos Santos Dos Santos²

¹Departamento de Matemática, Universidade de Aveiro, Portugal

²Instituto GeoGebra Portugal & Centre for Research and Innovation in Education (inED), Escola Superior de Educação do Instituto Politécnico do Porto, Portugal

Abstract

In this paper we describe a teaching experiment targeting with students of Complex Analysis attending an undergraduate course of a portuguese university. Our main goal is the understanding of the GeoGebra role with respect to visualization and as technological mediator, according to Vygotsky theory, in the teaching and learning process of complex functions. The first step of our study was the conception of a sequence of didactical tasks and the development of GeoGebra tools related to the target didactical objectives. Here we will describe the procedure related to the tasks implementation in a classroom environment and the achieved results based on the collected data composed by written assignments produced by students, video recording the student performance during the experiment and the student constructions with GeoGebra. All the collected data was analysed from a qualitative and interpretative paradigm.

Keywords: GeoGebra, Mathematics learning, Mathematics Teaching, Complex functions.

Resumen

En este trabajo describimos un experimento didáctico dirigido a estudiantes de Análisis Complejo que asisten a un curso de pregrado de una universidad portuguesa. Nuestro principal objetivo es la comprensión del rol de GeoGebra con respecto a la visualización y como mediador tecnológico, según la teoría de Vygotsky, en el proceso de enseñanza y aprendizaje de funciones complejas. El primer paso de nuestro estudio fue la concepción de una secuencia de tareas didácticas y el desarrollo de herramientas GeoGebra relacionadas con los objetivos didácticos. Aquí describiremos el procedimiento relacionado con la implementación de las tareas en un ambiente de aula y los resultados obtenidos en base a los datos recopilados compuestos por las asignaciones escritas producidas por los estudiantes, la grabación de video del desempeño del estudiante durante el experimento y las construcciones de los estudiantes con GeoGebra. Todos los datos recolectados fueron analizados desde un paradigma cualitativo e interpretativo.

Palabras clave: GeoGebra, Enseñanza de las Matemáticas, Educación Matemática, Análisis Complejo.

Citation: D'Azevedo Breda AM, Dos Santos Dos Santos JM. Learning complex functions with GeoGebra. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):1262-1276, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1504>

Editor: Clara Helena Sánchez

***Corresponding autor:**

Ana Maria D'Azevedo Breda;
ambreda@ua.pt

Received: June 22, 2021

Accepted: October 14, 2021

Published: December 15, 2021



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

Introducción

The use of information and communication technology (ICT), as for instance computational mathematical software, helps in the visualization and dynamical representations of abstract ideas and establishment of connections with algebra (Wright, 2005; Hohenwarter, Hohenwarter, Kreis, & Lavicza, 2008; Lavicza, 2010; Kreis, 2004). Among the technological

resources used for teaching and learning mathematics are dynamic geometric environments (DGE), computer algebra system (CAS), and object programming software. In the case of the GeoGebra software, we have an immediately interaction between geometrical 2D and 3D view, Algebra views and CAS views. For these reasons, GeoGebra seem to us a resource with great potentialities that we can use for teaching and learning mathematics, in any level of education. As a 21st-century software conception, GeoGebra is one of the several new-generation mathematics learning technologies that are reshaping the representational infrastructure of mathematics education, providing the world community with an easy and freely software to interact with powerful mathematical processes and tools (**Bu, Spector, & Haciomeroglu**, 2011). In fact, several mathematicians point the role of visualization in the genesis of many of mathematical concepts and ideas, supporting and type of teach and learning in opposition a bourbaker point of view. Tristan Nendhan says that the bourbaker point of view led to the “divorce from one’s sensory experience of the world, despite the fact that the very phenomena one is studying were often discovered by appealing to geometric (and perhaps physical) intuition” (**Needham**, 1998, p. vii).

In spite of the use of technology in teaching mathematics at the university level, the knowledge about its efficiency as a teaching resource is insignificant (**Lavicza**, 2010). Here we are interesting in studying the effectiveness of GeoGebra in the teaching and learning of some properties of complex functions.

Literature Review

Here, our focus of attention is the exploration of the power of visualization for teaching and learning complex function analysis using, in a first moment, the framework about visualization proposed by (**Gutiérrez**, 1996) and based in the action-process-object-schema (APOS) view of an individual’s mental construction of a concept (**Asiala et al.**, 1997).

Studies concerning teaching and learning complex numbers are very scarce (**Danenhower**, 2006; **Harel**, 2013; **Nemirovsky & Soto-Johnson**, 2013; **Panaoura, Elia, Gagatsis, & Giatilis**, 2006; **Soto-Johnson & Troup**, 2014; **Nordlander & Nordlander**, 2012). These studies are essentially related with the sense and concept of the complex numbers and some of their algebraic properties. The results of these studies show that participants struggle to reason geometrically about complex numbers. Briefly, Panaoura et al. (2006) found that high school students had difficulty in the transition between algebraic and geometric reasoning. Within the framework of DNR - based on the three foundational principles of duality, necessity, and repeated-reasoning - (**Harel**, 2013) conducted three teaching experiments with prospective and in-service mathematics teachers as well as tested a DNR-based unit on complex numbers He highlighted three ways of thinking: structural reasoning (theory building and non-computational); deductive reasoning (definitional reasoning and reasoning in terms of quantifiers, connectives, and conditional statements); and reflective reasoning (retrospective reflection and forward reflection) (2013, p. 55). Harel also noted that the pre-service teachers of the experiments have serious difficulties to attach a geometric meaning to the addition and multiplication of complex numbers. **Nemirovsky and Soto-Johnson** (2013) observed that the use of the classroom floor as a model of the complex plane and making use of stick-on dots and strings, pre-service teachers discovered that multiplying by i corresponds to a 90° rotation around the origin.

Soto-Johnson and Troup (2014) found that undergraduates were integrating both algebraic and geometric reasoning while drawing a representative diagram of the algebraic operations. In this work the effect of gestures by the teacher’s interactions with their students was also an object of study. **Danenhower** (2006) has in consideration the university students’ understanding of their representations of complex numbers and the shift among these representations, using join Sfard’s (1991) and APOS (**Dubinsky**, 1991) theoretical framework: algebraic extension representation; Cartesian vector representation; polar representation;

and symbolic representation. He found that, while students were competent in polar and Cartesian forms, they were somehow “less proficient in translating from one to the other, and nearly half did not have good judgment about when to shift to another form” (**Danenhower**, 2006, p. 151), and whereas “almost all the interviewed students had a process understanding of the polar form; none had a clear object understanding” (**Danenhower**, 2006, p. 150).

Considering the integration of technology in the teaching process, some authors suggest that technology can cause harm by promoting over-generalizations (**Clements & Battista**, 1992; **Olive**, 2000) or an over-reliance on technology (**Salomon**, 1990). Other studies reveal that technology can help students and teachers in improving and clarifying mathematical ideas (**Arcavi & Hadas**, 2000; **Barrera-Mora & Reyes-Rodríguez**, 2013; **Hollebrands**, 2007; **Jones**, 2000; **Olive**, 2000; **Tabaghi & Sinclair**, 2013; **Heid & Blume**, 2008; **Vitale, Black, & Swart**, 2014). DGEs such as GeoGebra have been shown to help the development of mathematical concepts related to real-valued differentiation (**Hohenwarter et al.**, 2008). (**Olive**, 2000) and (**Hollebrands**, 2007) state that Geometer's SketchPad, another DGE, makes abstract ideas appear more concrete, which could help students ground reasoning and model the reality. (**Salomon**, 1990) suggested that DGEs may help students by providing multiple representations of mathematical objects.

(**Nemirovsky & Soto-Johnson**, 2013) conducted a study, using microethnographic analysis techniques, involving the exploration of the function $f(z) = e^{az}$, using Geometer's Sketchpad, by two pre-service teachers. From Sfard's theoretical framework (**Sfard**, 1991, 1994), their results suggest that perceptuomotor activities involving technology may serve as an instrument in facilitating reification of abstract mathematical objects such as complex-valued functions.

Next, we analyze some results of the research, considering the mathematical content to be studied, which requires: the use of multiple representations of the same mathematical object, the characteristics of our experiment target group, and the students visualization capabilities.

In the study that we have carried out, the visualization had a crucial role; the students visualization of GeoGebra applets, built by them, allowed that specific properties of the complex functions were acquired by the students. Indeed, the visualization includes processes of constructing and transforming both visual and mental images and graphical sketches that may led to mathematical reasoning (**Presmeg**, 1997). These sketches are central for mathematical communication and comprehension of certain rules/properties/concepts (**Roth**, 2003, p. 3). As Arcavi states:

“ visualization is described as the process and the product of creation, interpretation, use of and reflection upon images, diagrams, in our minds, on paper or with technological tools, with the purpose of depicting and communicating information, thinking about and developing previously unknown ideas and advancing understandings (**Arcavi**, 2003, p. 217).”

Also, the role of visualization in teaching and learning mathematics, namely in higher education, has been studied by several authors (**Mascarello & Winkelmann**, 1986). For instance, (**Meng, Jiang, Shi, & Liang**, 2014) have used MatLab in the context of simulation problems. **ming Zhang and Wang** (2013) mention the use of computational tools, they refer “mathematical software”, to compute integrals of complex functions in a collaborative context. It worth mention that the above-mentioned authors, focused in mathematical computations and visualization. It should be noted that in the described research GeoGebra is not used.

We found the use of GeoGebra, in a research work with a control student group, as a collaborative and cooperative learning tool focused in topics of real analysis (**Takači, Stankov, & Milanovic**, 2015), and there are also works making use of GeoGebra for the illustration of some geometric properties of complex functions using two 2D views of GeoGebra

The technology used in this experiment allows the learner to perform several relevant explorations for the study of complex functions analysis, reducing mindless calculations and promoting situations of questioning, conjecturing, explanation and verbalisation, which are fundamental for the development of mathematical reasoning - inductive, deductive and even abductive (**A. M. D. Breda & Dos Santos**, 2016).

In fact, the authors of this paper have created specific GeoGebra tools for the colouring domain technique in the complex plane. This technique was initially developed by Farris in 1997 (**Farris**, 1997) and latter on was broadly used for visualising properties of complex functions (**Poelke & Polthier**, 2009; **Wegert & Semmler**, 2010; **Wegert**, 2012). Briefly, in GeoGebra we have construct, among others, tools to get the stereographic projection of spherical points making use of GeoGebra dynamic colour proprieties (**Liste**, 2014) to create colouring domains (**A. Breda et al.**, 2013; **A. M. D. Breda & Dos Santos**, 2015).

In relation to the teaching and learning of mathematics our study took in consideration the role of mediation in the learning processes. The concept of mediation, central in Vygotsky's theory of learning (**Vygotsky**, 1978), considers that the use of devices, socially and culturally constructed, with effects on the conceptions and the individual learning are dependent on the contexts of interaction (**Cole & Wertsch**, 1996). In our study we made use of the human interaction and the technological and educational mediation devices. By human interaction we mean all the actions among students and students and teachers. The technological device of mediation used was the environment provided by GeoGebra, supporting the exploratory nature of the educational tasks proposed. Finally, the educational mediation is given by the communication established in the class, in particular, the communication of results expressed through written productions.

The APOS (Action-Process-Objects-Schema) theory for the learning of mathematics, namely in the contents of algebra and functions related to complex analysis, will be part of our theoretical framework. (**Dubinsky**, 1991; **Dubinsky, Czarnocha, Prabhu, & Vidakovic**, 1999; **Dubinsky & Mcdonald**, 2002; **Dubinsky & Wilson**, 2013). It is the gap between the experience and the individual mental structure that drive his/her cognitive development and the acquisition/construction of new knowledge. The new object of knowledge is assimilated by the students through the structures already constituted, the being of the new object perceived in a certain way. The new object made produces internal conflicts, which are or not overcome by the accommodation of cognitive structures. When the internal conflict end-up the new object is perceived in another way. New knowledge is being built.

An action in APOS theory context is a repeatable physical or mental manipulation that transforms objects (**Dubinsky**, 1984). Actions are procedures or transformations that are performed on objects, usually in a very step-by-step manner. In the tasks proposed, namely in the analysis of the domain and the co-domain of the complex functions, the actions can be repeated several times until the student interiorize the behaviour of the function in analysis. GeoGebra assists the transformation of a physical action (by dragging) into mental action when a student is able to make instant identification of some property, with or without the graphical resource of the function. Indeed, here in the action process dragging "offers a feedback to the discovering phase, and in this way it provides support to the role of proofs as real "explanations" of conjectures or properties." (**Arzarello, Olivero, Paola, & Robutti**, 2002, p. 66) Also, in the change of the function algebraic expression we have actions supported by the multiple views present in GeoGebra.

Through interiorization, a sequence of actions can be reflected upon, envisioned and analyzed trough mental procedures. When an individual interiorize a sequence of actions we say that they have constructed a process.

Here, when the students apply a set of actions in the analysis of several functions behaviour, we consider that they have constructed a process. In this sense the use of GeoGebra applications and tools for complex functions is of great help in getting, from the graphical representation of a complex function, several outputs. The written description of properties inferred by distinct representations, given by GeoGebra, are evidence that a process has occurred. These evidences are visible in the collected videos of the dyads and in the written responses of the students. Note that a process can be transformed in an object when it is perceived as an entity upon which actions and processes can be made, however there are objects that never can't be a process (**Dubinsky**, 1984).

When an individual is able to reflect upon a process as a whole and even apply other actions to that process, we say that the individual has encapsulated that process into an object. In our study, we expect to obtain data whose analysis reveals that the students encapsulated some processes in their heuristics.

Finally, actions, processes, and objects are associated to schemas. The construction of these schemas by the students will be an object of analysis looking at their written answers.

According to Ponte (2005), there are two main factors determining learning: the activity students develop and the reflection they carry out on the activity. The task is the starting point for a mathematical activity, which may or not occur (**Ponte**, 2005). The tasks can be differentiated by their degree of structure and the degree of difficulty. In terms of the degree of structure, we distinguish between closed and open tasks. In closed tasks it is clearly stated what is given and what is requested, being left to the executer the way to a get solution; in open tasks, there is a considerable degree of uncertainty, leaving the executer the freedom to play an important role in chose the data to work with and what can be discover under the choosing assumptions (**Ponte**, 2005). With regard to the degree of difficulty, tasks may represent a reduced challenge or a high challenge. Thus, among the open tasks, we have explorations and investigations running through in an increasing degree of challenge. In our study, given the time limitation and our interest in focusing on the influence of the use of GeoGebra in the insights and in the argumentative process used by the students, we have chosen some specific problems.

In the research we have conducted the researcher interact with the student and research object, the learning procedures, and where they do occur, having in mind that the experiment is being done in a context of social interaction in the presence of diverse languages. Thus, considering the objectives of this study, we place ourselves in an interpretative paradigm, within a qualitative approach (**Bogdan & Biklen**, 1997; **Guba, Guba, & Lincoln**, 1994).

The study, here reported has several characteristics of qualitative research, according to the perspective of (**Bogdan & Biklen**, 1997). Namely, researchers are the main agents for collecting and interpreting data. These data have a highly descriptive and detailed nature, allowing them to analyse actions and facts in detail. Choosing to carry out a teaching experiment research methodology the identification and the analysis of the process of the phenomenon under study are the main focus of this research. The learning outcomes are also subject to scrutiny, not being our main concern. It should be pointed out that (**Bogdan & Biklen**, 1997) understand the role of the qualitative researchers as being a non-interventional role, looking for the least effect of possible contamination with their immersion in the medium that intends to investigate. However, given the research design chosen for the study, the researchers were intentionally interventional, but this was also scrutinised and following all the correspondig ethical rules.

The option by the interpretive paradigm results from the need to explore, interpret and understand the facts from the point of view of the participants in the study, taking into account the particularities of the environment where the study took place.

The teaching experiment as a research methodology emerged in the United States in the

1970s. “It has a nature of intervention, since it intends to investigate the possibilities for educational improvement bringing up new forms of learning in order and studying them.” (Cobb, Confrey, DiSessa, Lehrer, & Schauble, 2003). The design of the teaching experiment involves the elaboration of a sequence of tasks to be proposed to the students, which is used as a teaching hypothesis subject to re-evaluations and readjustments (Cobb et al., 2003).

The learning sequence consisted of eight tasks involving: the action of complex functions over subsets of their domain; the use of coloured domain to obtain properties of complex functions, making the interpretation of its coloured graphs; and the study of Möbius transformations. All tasks forced the use of GeoGebra tools that students would have to adapt to the situations proposed to be analysed. The tasks were chained in a logical sequence, with progressive levels of difficulty, some of them being held in classes, others to be executed as homework and send the resolutions/doubts by email to the researchers.

The tasks were given in printed on paper, accompanied by the necessary GeoGebra files. They should write their answers in printed tasks and save their GeoGebra applications. Another instrument of analysis is the students’ attitudes to GeoGebra inventory (IAAFG) (Dos Santos & Peres, 2012), the students answered the IAAFG at the beginning and at the end of the experiment.

Materials, participants and methods

We have conceived tasks appealing to the use the GeoGebra tools to visualise the domain, the co-domain, the action of a complex function, f , of a subset of its domain and also the 3D visualizations of the graphs components function of f . We have also make use of the colouring domain technique (A. M. D. Breda & Dos Santos, 2016). In the task conception the mediation processes were also taking in consideration, focusing in the interaction among students, teachers and technology. A sequence of tasks that obey to an increasing level of difficulties was thought. The nine conceived tasks were grouped in four activities as follows, see figure 1.

In this study the participants are: the students attending the complex analysis course; the senior professor responsible for the course, which we will designate from now on by a *class professor*; two researchers, one has assumed the role of tutor of the class (which we will be designate, from now on, by *research professor*) and the other researcher focused on the observation of the student’s interactions, cautioning computational and video recording mechanisms necessary for the realisation of the experiment.

Each one of the seven students, who participate in the experiment, were enrolled in a complex analysis course, a curricular unity of a mathematics undergraduate course (3rd year) at a Portuguese university. Three of the seven students were females. The students’ ages were between nineteen and twenty. All the participants accepted to be part of the experiment, being guaranteed, their anonymity and privacy.

Special attention to ethical dilemmas were taken in consideration. The students’ participation in this research did not interfere with the class professor’s decisions regarding the students’ formal evaluation process.

The teaching experiment took place during a lecture; the students by themselves have chosen to work in dyads and only one student work alone. The classroom was equipped with computers that would allow them work individually.

During the teaching experiment several data were collected in different supports allowing its analysis and triangulation. The matrix of the collected data can be visualized in figure 2. The data included work carried out autonomously at home and during the lecture about mentioned. However only two students from the same dyad (d2) sent their homework.

Activity 1
Observe the behaviour of the complex function $f(z) = z^4$. Write a short text with the conclusions you reached indicating the procedure that you have used.
Note: Use the application example01.ggb.
Time: 15 min.

Activity 2
Observe the behaviour of the complex functions $f(z) = z^2 - 1$ and $f(z) = z^2 - 1$ near their zeros. Write a short text indicating the procedure and justifying the conclusions reached.
Note: Use the application example02.ggb. Make any necessary changes, and save your file named task02.ggb.
Time: 15 min.

Activity 3
Study the behaviour of the complex function $f(z) = \sin(z)$. Write a short text indicating the procedure and justifying the conclusions reached.
Remind: $\sin(z) = (e^{iz} - e^{-iz}) / (2i)$.
Note: Use the application example02.ggb. Make the necessary changes, and save your file named task03.ggb.
Time: 15 min.

Activity 4
The Möbius transformations are particular cases of complex functions defined by: $m(z) = (az+b)/(cz+d)$, $z \in \mathbb{C}$, $ad - bc \neq 0$. They form a group generated by the transformations:

- * $m_1(z) = z + k$, $z \in \mathbb{C}$, $k \in \mathbb{C}$;
- * $m_2(z) = rz$, $z \in \mathbb{C}$, $r \in \mathbb{R}^+$;
- * $m_3(z) = e^{i\theta}z$, $z \in \mathbb{C}$, $\theta \in \mathbb{R}$ and by
- * $m_4(z) = 1/z$, $z \in \mathbb{C}$.

Note: Use the application example01.ggb or example02.ggb. Make the necessary changes, and save your file with a name related tasks indicated below.
Time: 30 min to manage the tasks in this section.
Study the behaviour of the following Möbius transformations:

- a) $m_1(z) = z + 1$; b) $m_2(z) = 2z$; c) $m_3(z) = e^{i\pi/2}$;
- d) $m_4(z) = 1/z$; e) $m_5(z) = (z-1)/z$, $z \in \mathbb{C}$.

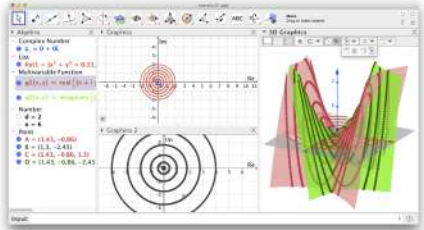


Image of example01.ggb .

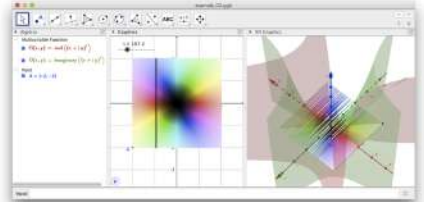


Image of example02.ggb .

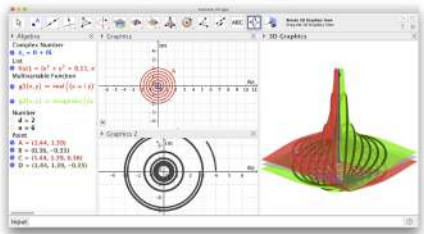


Image of example03.ggb .

Figure 1. Tasks

Discussion and results

The lecture begun and was led by the research teacher, who presented the tasks, giving brief indications of the procedures to be used in GeoGebra using the complex function $f(z) = z^2, z \in \mathbb{C}$ as example in the first task. In the other tasks, the students worked in an autonomous way, answering the questions in the printed tasks. During the autonomous work of the students the researchers were available to answer to any question posed by them, as well as to observe the actions, reactions and the work of the students performance.

One of the strategies used, by the students, to analyse properties of complex functions was the exploration/visualization of the behaviour of the action of complex function on specific subsets of its domain. Within this purpose, GeoGebra tools were developed, namely, tools creating specific types of grids. Using two GeoGebra views students were observing at the same time the movement of a point in the domain of the function, f , and the correspondence movement of its images under the action of f .

Being GeoGebra a software that allows the user interaction with geometric and algebraic properties simultaneously, the possibility of moving points on particular subsets of the domain and the assessment to instantaneous images of the image set of these points, allowed the arise of conjectures. The use of the 3D capabilities of GeoGebra applied to the components of the complex function (A. Breda et al., 2013), has deepen their knowledge about some properties of functions of complex variable.

Data		Professor	Researchers		Dyad 1 (d1)		Dyad 2 (d2)		Dyad 3 (d3)		Student Alone (s)	
		Senior Professor (SP)	Professor Researcher (RP)	Researcher (R)	(sBd1)	(sTd1)	(sLd2)	(sMd2)	(sAd3)	(sId3)	(sD)	
Notes		X	X	X								
Tasks	Printed (PT)	Participant observation			X	X	X	X	X	X	X	
	GeoGebra (GT)				X	X	X	X	X	X	X	X
	Home (HT)						X	X				
IAAFG	ACI				X	X	X	X	X	X	X	X
	BCI				X	X	X	X	X	X	X	X
Video Recording					X	X	X	X	X			

Figure 2. Matrix of Collected Data

In the Activity 1, the written responses were analysed and categorized as shown in figure 3. All the students involved were able: to input the complex functions in GeoGebra; view the domain; the co-domain; and the graph of the correspondents component functions.

Activity 1 Observe the behaviour of the complex function $f(z) = z^n$. Write a short text with the conclusions you reached indicating the procedure that you have used. Note: Use the application example01.ggb. Time: 15 min.	Dyad 1 (d1)		Dyad 2 (d2)		Dyad 3 (d3)		Student Alone (s)
	(sBd1)	(sTd1)	(sLd2)	(sMd2)	(sAd3)	(sId3)	(sD)
The student makes annotations during the introduction made by the Senior Professor.	0	0	0	0	0	0	1
There are input errors in introduce the complex function of GeoGebra, but students in presence in an unexpected result correct their error.	1	1	0	0	0	0	0
Students recognize that circumferences centred at the origin of referential are mapped in two circles.	1	1	1	1	1	1	1 (I)
Students recognize that a turn of a circle in the domain corresponds to four turns for the corresponding circle image in the co-domain.	0	0	1	1	1	0	1 (II)
Students refer a relation between the radius of the circumference in the domain and the corresponding radius of the circumference image:							
Without details;	1	1	0	0	1	0	0
With some precision;	0	0	1 (III)	1 (III)	0	0	0
Using some precision, stating that if the radius of the original circumference is p then the radius of its images is p^4 .	0	0	0	0	0	1	0
The student refers to the component functions.	0	0	0	0	0	1(IV)	1(IV)

Legend:
 0 - There is no evidence.
 1 - Exist evidence.
 (I) The situation inferred based on an inductive reasoning of the student.
 (II) The student generalize for the function $f(z)=z^n, n \geq 2$ and n natural number.
 (III) A correct visualization description of the action of the complex function but the student is not able to get and algebraic relation between the radius.
 (IV) The student refers to the component functions but does not indicate any clear relation between the trajectories of the points in the domain and their images by the component functions.

Figure 3. Categorized results of task1.

In the analysis of their answers it was observed that they clearly visualize that circular orbits of the domain, centred at the origin, are transformed into circular orbits in the co-domain. In regard to the variation of the “periodicity” of the circular path, it was observed that only four of the seven students make records consistent with the property observed. Only the student who worked with the class professor made a generalization to the family of functions, $f(z) = z^n, n \geq 2$ and n natural number (fig. 6).

In relation to Activity 2, where the focus is on colouring domain technique and its interpretation, all the dyads observe that around the value of $0 + 0i$ the black colour remains black when that action $f(z) = z^4$ is activate. The dyads also observed the repetition, four times, of the colouring pattern around the image of $0 + 0i$.

Considering the study of the map $f(z) = z^4 - 1$ activity, all students identify the existence of four zeros by the presence of four black zones in the image. They also identified the repetition of the standard coloured pattern, four times, around the four black areas, see figure 4.

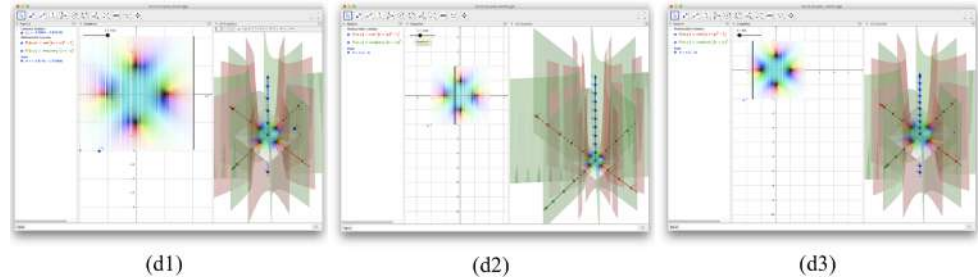


Figure 4. Images of GeoGebra applications made by dyads, in activity 2.

Despite the identifications, above mentioned, it should be noted that one dyad, two of the seven students, did not provide any justification for these facts. Only a dyad felt the need to write the algebraic representation of one of the four zeros. In relation to the repetition of the coloured pattern, five students relate this repetition to the fourth power of z , and only one dyad gave of a more elaborate explanation stating some angular relations related with the colours involved.

It should also be noted that two of the dyads refer explicitly to the colour pattern as standard or associated with the identity function. It is interesting to note that these statements only arise after the exploration of the coloured domain of a function with more than one zero.



Figure 5. Video Images: Dyad d1, activity 2; Dyads d2, activity 1.

Regarding the behaviour of the dyads, based on the visualization of the videos of two dyads, whose work was recorded, many differences were noticed. There is a direct relationship among the observed interaction of the dyads with the software, the discussion generated between them, and the quality of the answers given in writing texts.

The analysis of the videos also show perceptuomotor activity, by the two dyads, when they interact with the images generated in the GeoGebra applications. Similar results to the ones reported by (Nemirovsky & Soto-Johnson, 2013), were also detected. Students have used many gestures, producing several interactions between the elements of the dyad, which give rise to a writing activity.

In this analysis we have not taken in consideration the student who worked alone, since he was interfacing all the time with the class professor, who as a qualified mediator could have conditioned both the type and the quality of the answers given by this student.

Considering the proposed autonomous work only two female students has sent their work. These students elaborated answers indicating an adequate use of the software and also their

expected answers regarding the mathematical topics under analysis. It should be noted that the written work sent by these students were quite different though these students belong to the same dyad.

From the observations of the collected video data, we realize that dragging points, changing the expression of the functions, and the use of GeoGebra tools and commands were proficiently performed. These is quite surprising since, for all of them, this is the first time they were using GeoGebra.

The actions developed by the students triggered different interactions in the dyads, among them we mention: the use of gestures after dragging and viewing in the screen its effect, the discussion between the elements of the dyad, and the writing annotations and the driven conclusions, recorded in the tasks worksheets.

The analysis of the written productions, having in account the data collected in video; show that students were able to identify properties as a result of the process of handling the software. Besides the identification of the properties, students also described the actions they have performed to get them, using a rudimental mathematical writing. It should be noted that students tend to be very descriptive in their explanations.

The heuristics present in the students' answers led to conjectures. However their justifications are, in general, not clear. The essential points are mentioned but there is no formal justification. The fact that was not explicitly requested a proof could be the reason behind the non-existence of a formal justification.

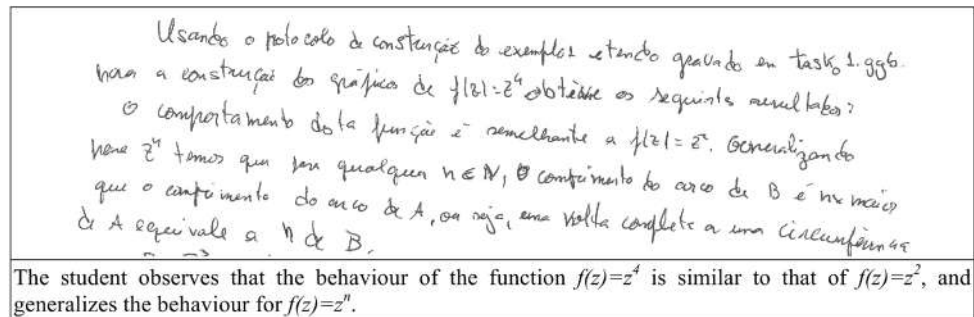


Figure 6. Transcription of answer to activity 2, student sD.

However, generalization processes appear in the students' responses due to the adequate visualization of the graphs of the complex functions. For example, the student's generalization of the coloured domain pattern associated with the codomain complex function $f(z) = z^n, n \geq 2$, see figure 6.

When analysing the IAAF applied to the seven students, before and after the experiment, significant differences were found in the responses given after the experiment, when the results were analysed by gender. The responses given by the female gender show the willingness to continue using GeoGebra, recognizing the role of using the software in the study of the topic, these those not occur with the male gender student. These differences are significant, since the written answers given by female students are much more complete than the answers given by the male gender. In addition, it was the female students who had invested in homework assignments.

From the detailed study of the case of dyad d2, who were the students most invested in the experiment, it was verified that the results obtained by them are very positive. This evaluation was also reported by them, see figure 7.

It is worthwhile to mention that: 1) no student had ever use GeoGebra; 2) it was the first

time that they have used technology for the understanding of complex analysis topics. The collected data allows us to conclude that: 1) the student learning trajectories are consistent with the proposal activities (based on the students produced texts); 2) the tasks executions are performed without great excitement (based on the video recorder); 3) the elements of one of dyads interact constantly with each other and with the software reflected in the different records and texts production; 4) the analysis of the data reinforces the adjustment of the APOS theory as framework for these experiment; 5) like other studies, the use of gestures was a form of communication of mathematical ideas between the elements of the dyads.

<p>4 Reflexão final</p> <p>Aproveite esta página para escrever as suas impressões sobre esta sessão de trabalho. Sinta-se livre para dar a sua opinião esta será importante para análise desta experiência de ensino.</p> <p>Por favor no fim, volte a preencher o formulário online http://goo.gl/forms/4aQ7BJUjsSg3B8DL2</p> <p>A sessão de trabalho foi bastante produtiva pois fiquei a conhecer e tive contacto com uma ferramenta de trabalho que nunca tinha utilizado e que se revelou muito útil.</p> <p>A utilidade desta ferramenta espelha-se, para já, na análise do comportamento das funções complexas que não é fácil de fazer manualmente.</p> <p>Dai, considero que esta ferramenta será um mais valia para a minha aprendizagem nesta Unidade Curricular em questão.</p>	<p>4 Final reflection</p> <p>Take advantage of this page to write your impressions about this work. Feel free to give your opinion, this will be important for the analysis of this teaching experiment.</p> <p>Please fill out the online form http://goo.gl/forms/4aQ7BJUjsSg3B8DL2</p> <p>The work session was very productive because I got to know and had contact with a work tool that I had never used before and that have been proved very useful.</p> <p>The utility of this tool is of great utility to analyses the behaviour of complex functions, which is not easy to do by hand.</p> <p>Hence, I consider that this tool will be an added value for my learning within the curricular unity in consideration.</p>
--	---

Figure 7. Transcription of final Reflection of the student (sMd2).

Concluding Remarks

The study revealed the potential of GeoGebra software in the understanding of the behaviour and properties of complex functions, as result of the data content analysis. GeoGebra reveal to be a powerful mean in the development of visual capabilities, in the development of inductive reasoning (conjectures), as a technological mediator in the teaching and learning processes, as shown by the video and audio recording data. The design of new tasks, taking into account the dynamic and interactive capabilities of GeoGebra and pre-established topics in complex analysis will be an added value to the teaching and learning of this curricular unity, as indicated in the answers worksheets and in the *class professor* perception. We would like to emphasise the role of GeoGebra as a mediator mean of several types of interaction among students and teachers.

The experience should be repeated and deepened to overcome some of the impasses related to the researchers' role of mediation. What we can say right now is that mediation between software and students is really effective.

We recognize the limitations of the present study given the small number of students involved and the short duration of the experience, although we consider that our methodological option was the most appropriated and should be the methodology to be used in future studies.

Acknowledgements

This research was supported through the FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., Portuguese national funding agency for science, research and technology, within: the Center for Research and Development in Mathematics and Applications (CIDMA), references UIDB/04106/2020 and UIDP/04106/2020; the Centre for Research and Innovation in Education (inED), under the scope of the project UIDB/05198/2020.

Author's contribution

Both authors contributed equally to the realization of this work, participating in the Teaching Experiment and in the analysis of the results presented in this article.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interest with respect to the content of this article.

References

- Arcavi, A.** (2003). The role of visual representations in the learning of mathematics. *Educational studies in mathematics*, 52(3), 215–241.
- Arcavi, A., & Hadas, N.** (2000). Computer mediated learning: An example of an approach. *International journal of computers for mathematical learning*, 5(1), 25–45. doi: 10.1023/A:1009841817245
- Arzarello, F., Olivero, F., Paola, D., & Robutti, O.** (2002). A cognitive analysis of dragging practises in cabri environments. *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik*, 34(3), 66–72.
- Asiala, M., Brown, A., DeVries, D. J., Dubinsky, E., Mathews, D., & Thomas, K.** (1997). A framework for research and curriculum development in undergraduate mathematics education. *Maa Notes*(), 37–54.
- Barrera-Mora, F., & Reyes-Rodríguez, A.** (2013). Cognitive processes developed by students when solving mathematical problems within technological environments. *The Mathematics Enthusiast*, 10(1), 109–136.
- Bogdan, R. C., & Biklen, S. K.** (1997). *Qualitative research for education an introduction to theories and models*. Allyn & Bacon Boston, MA.
- Breda, A., Trocado, A., & Dos Santos, J. M. D. S.** (2013). O geogebra para além da segunda dimensão. *Indagatio Didactica*, 5(1), 60–84. Retrieved from <http://revistas.ua.pt/index.php/ID/article/view/2421/2292>
- Breda, A. M. D., & Dos Santos, J. M. D. S.** (2015). The riemann sphere in geogebra. *Sensos-e*, 2(1), 2183–1432. Retrieved from <http://sensos-e.ese.ipp.pt/?p=7997>
- Breda, A. M. D., & Dos Santos, J. M. D. S.** (2016, 05). Complex functions with GeoGebra. *Teaching Mathematics and its Applications: An International Journal of the IMA*, 35(2), 102–110. Retrieved from <https://doi.org/10.1093/teamat/hrw010> doi: 10.1093/teamat/hrw010
- Bu, L., Spector, J. M., & Haciomeroglu, E. S.** (2011). Toward model-centered mathematics learning and instruction using geogebra. In L. Bu & R. Schoen (Eds.), *Model-centered learning: Pathways to mathematical understanding using geogebra* (p. 13–40). Rotterdam: SensePublishers. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-94-6091-618-2_3 doi: 10.1007/978-94-6091-618-2_3
- Clements, D. H., & Battista, M. T.** (1992). Geometry and spatial reasoning. In D. A. Grouws (Ed.), *Handbook of research on mathematics teaching and learning* (pp. 420–464). New York: Macmillan.
- Cobb, P., Confrey, J., DiSessa, A., Lehrer, R., & Schauble, L.** (2003). Design experiments in educational research. *Educational researcher*, 32(1), 9–13.
- Cole, M., & Wertsch, J. V.** (1996). Beyond the individual-social antinomy in discussions of Piaget and Vygotsky. *Human development*, 39(5), 250–256.
- Danenhower, P.** (2006). Introductory complex analysis at two British Columbia Universities: The first week-complex numbers. *CBMS Issues in Mathematics Education*, 13(), 139–170.

- Dos Santos, J. M. D. S., & Peres, M. J.** (2012). Atitudes dos alunos face ao geogebra – construção e validação de um inventário. *Revista do Instituto GeoGebra Internacional de São Paulo*, *1*(1), .
- Dubinsky, E.** (1984). *A Constructivist theory of learning in undergraduate mathematics education research*. ICMI.
- Dubinsky, E.** (1991). Reflective abstraction in advanced mathematical thinking. In D. Tall (Ed.), *Advanced mathematical thinking* (Vol. 11, pp. 95–126). Netherlands: Springer.
- Dubinsky, E., Czarnocha, B., Prabhu, V., & Vidakovic, D.** (1999). One theoretical perspective in undergraduate mathematics education research. In O. Zaslavsky & I. G. for the Psychology of Mathematics Education (Eds.), *Proceedings of the 23rd conference of the international group for the psychology of mathematics education, [haifa, israel, july 25-30]* (Vol. 4, pp. 65–73). Retrieved from <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED436403.pdf>
- Dubinsky, E., & Mcdonald, M. A.** (2002). Apos: A constructivist theory of learning in undergraduate mathematics education research. In D. Holton, M. Artigue, U. Kirchgräber, J. Hillel, M. Niss, & A. Schoenfeld (Eds.), *The teaching and learning of mathematics at university level: An icmi study* (pp. 275–282). Dordrecht: Springer Netherlands. Retrieved from https://doi.org/10.1007/0-306-47231-7_25 doi: 10.1007/0-306-47231-7_25
- Dubinsky, E., & Wilson, R. T.** (2013). High school students' understanding of the function concept. *The Journal of Mathematical Behavior*, *32*(1), 83–101.
- Farris, F. A.** (1997). Visualizing complex-valued functions in the plane. *AMC*, *10*(12.), .
- Flashman, M.** (2016). *Making sense of calculus with mapping diagrams*. MAA.
- Guba, E. G., Guba, Y. A. L., & Lincoln, Y. S.** (1994). Competing paradigms in qualitative research. *Handbook of qualitative research*(,). doi: <http://www.uncg.edu/hdf/facultystaff/Tudge/Guba%20&%20Lincoln%201994.pdf>
- Gutiérrez, R. A.** (1996). Visualization in 3-dimensional geometry: In search of a framework. In *18 pme conference* (pp. 3–19).
- Harel, G.** (2013). Dnr-based curricula: The case of complex numbers. *Humanistic Mathematics*, *3*(2), 2–61.
- Heid, M. K., & Blume, G. W.** (2008). Algebra and function development. *Research on technology and the teaching and learning of mathematics*, *1*(), 55–108.
- Hohenwarter, M., Hohenwarter, J., Kreis, Y., & Lavicza, Z.** (2008). Teaching and calculus with free dynamic mathematics software geogebra. In *11th international congress on mathematical education*. ICME.
- Hollebrands, K. F.** (2007). The role of a dynamic software program for geometry in the strategies high school mathematics students employ. *Journal for research in mathematics education*(,), 164–192.
- Jones, K.** (2000). Providing a foundation for deductive reasoning: students' interpretations when using dynamic geometry software and their evolving mathematical explanations. *Educational Studies in Mathematics*(,), 55–85.
- Kreis, Y.** (2004). *Mathé-mat-TIC: Intégration de l'outil informatique dans le cours de mathématiques de la classe de 4e (Travail de candidature)*. Luxembourg: Ministère de l'Éducation Nationale et de la Formation Professionnelle.
- Lavicza, Z.** (2010). Integrating technology into mathematics teaching at the university level. *ZDM*(,), 105–119. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/1188K58KH5562T32.pdf> doi: 10.1007/s11858-009-0225-1
- Liste, R. L.** (2014). El color dinámico de geogebra. *Gaceta De La Real Sociedad Matematica Española*, *17*(3), 525–547.
- Mascarello, M., & Winkelmann, B.** (1986). Calculus and the computer. the interplay of discrete numerical methods and calculus in the education of users of mathematics: considerations and experiences. In *The influence of computers and informatics on mathematics and its teaching: Proceedings from a symposium. strasbourg, france:*

- International commission on mathematical instruction* (Vol. 1, p. 120).
- Meng, P.-C., Jiang, Z.-X., Shi, S.-Z., & Liang, S.-M.** (2014). Study of a combination of complex function learning with mathematical modeling. In *2014 international conference on management science and management innovation (msmi 2014)* (pp. 357–360).
- ming Zhang, Y., & Wang, D.** (2013). Teaching reform on the course of complex analysis. In *Proceedings of the 2013 conference on education technology and management science (icetms 2013)* (p. 587-589). Atlantis Press. Retrieved from <https://doi.org/10.2991/icetms.2013.161> doi: <https://doi.org/10.2991/icetms.2013.161>
- Navetta, A.** (2016). Visualizing functions of complex numbers using geogebra. *North American GeoGebra Journal*, 5(2), .
- Needham, T.** (1998). *Visual complex analysis*. Oxford University Press.
- Nemirovsky, R., & Soto-Johnson, H.** (2013). On the emergence of mathematical objects: The case of eaz. In *Proceedings of the 16th annual conference on research in undergraduate mathematics education* (p. 219-226).
- Nordlander, M. C., & Nordlander, E.** (2012). On the concept image of complex numbers. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 43(5), 627-641. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/0020739X.2011.633629> doi: 10.1080/0020739X.2011.633629
- Olive, J.** (2000). Implications of using dynamic geometry technology for teaching and learning. In *Conference on teaching and learning problems in geometry*.
- Panaoura, A., Elia, I., Gagatsis, A., & Giatilis, G. P.** (2006). Geometric and algebraic approaches in the concept of complex numbers. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 37(6), 681–706. doi: 10.1080/00207390600712281
- Poelke, K., & Polthier, K.** (2009). Lifted domain coloring. *Computer Graphics Forum*, 28(3), 735-742. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8659.2009.01479.x> doi: 10.1111/j.1467-8659.2009.01479.x
- Ponte, J. P.** (2005). Gestão curricular em matemática. *O professor e o desenvolvimento curricular*(,).
- Presmeg, N. C.** (1997). Generalization using imagery in mathematics. In L. D. English (Ed.), *Mathematical reasoning: Analogies, metaphors, and images* (pp. 299–312). Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers.
- Roth, W.-M.** (2003). Toward an anthropology of graphing. In *Toward an anthropology of graphing: Semiotic and activity-theoretic perspectives* (pp. 1–21). Dordrecht: Springer Netherlands. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-94-010-0223-3_1 doi: 10.1007/978-94-010-0223-3_1
- Salomon, G.** (1990). Cognitive effects with and of computer technology. *Communication Research*, 17(1), 26–44. doi: 10.1177/009365090017001002
- Sfard, A.** (1991). On the dual nature of mathematical conceptions: Reflections on processes and objects as different sides of the same coin. *Educational Studies in Mathematics*, 22(1), 1–36. doi: 10.1007/BF00302715
- Sfard, A.** (1994). Reification as the birth of metaphor. *For the Learning of Mathematics*, 14(1), 44–55. doi: 10.1371/journal.pone.0016782
- Soto-Johnson, H., & Troup, J.** (2014). Reasoning on the complex plane via inscriptions and gesture. *Journal of Mathematical Behavior*, 36(), 109–125. doi: 10.1016/j.jmathb.2014.09.004
- Tabaghi, S. G., & Sinclair, N.** (2013). Using dynamic geometry software to explore eigenvectors: The emergence of dynamic-synthetic-geometric thinking. *Technology, Knowledge and Learning*, 18(3), 149–164. doi: 10.1007/s10758-013-9206-0
- Takači, D., Stankov, G., & Milanovic, I.** (2015). Efficiency of learning environment using geogebra when calculus contents are learned in collaborative groups. *Computers and Education*, 82(), 421–431. doi: 10.1016/j.compedu.2014.12.002

-
- Vitale, J. M., Black, J. B., & Swart, M. I.** (2014). Applying grounded coordination challenges to concrete learning materials: A study of number line estimation. *Journal of Educational Psychology*,(), . doi: 10.1037/a0034098
- Vygotsky, L.** (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*.
- Wegert, E.** (2012). *Visual complex functions: An introduction with phase portraits*. Springer Basel. doi: 10.1007/978-3-0348-0180-5_1
- Wegert, E., & Semmler, G.** (2010). Phase plots of complex functions: a journey in illustration. *Notices AMS*, **58**(), 768–780.
- Wright, D.** (2005). Graphical calculators' in teaching secondary mathematics with ict. In S. Johnston-Wilder & D. Pimm (Eds.), *Ict and the mathematics classroom-part b* (p. 145-158). New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Comentario bibliográfico

Reseña del artículo:

Luque, J., Xing, L., Briggs, D.E.G., Clark, E.G., Duque, A., Hui, J., Mai, H., McKellar, R.C. (2021) Crab in amber reveals an early colonization of non-marine environments during the Cretaceous. *Sciences Advances*. 7: eabj5689

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abj5689>

Parque crustáceo: fósiles en ámbar y la salida de los cangrejos desde el mar durante el Cretácico

Crustacic Park: Fossils in amber and the march out of the ocean by crabs during the Cretaceous



Imagen de *Cretapsara athanata*, el cangrejo fósil más completo descubierto hasta el momento. Vista ventral del holotipo preservado en ámbar burmés de hace aproximadamente 100 millones de años. Foto: Lida Xing (China University of Geosciences, Beijing)

Quizá una de las imágenes más icónicas del cine moderno es la del mosquito en ámbar del bastón del Dr. John Hammond, del cual se extrajo parte del ADN que dio vida a los dinosaurios en la película ‘Parque Jurásico’ (Jurassic Park). Por más emocionante que suene la idea, la extracción de material genético viable en fósiles para clonación entraña enormes retos. Una vez muere un organismo, el ADN comienza a deteriorarse rápidamente debido a la acción de las enzimas de bacterias y de células del cuerpo, y por efectos del ambiente como la radiación ultravioleta, la temperatura, la exposición al oxígeno y el agua, etc., factores que contribuyen a la ruptura de las cadenas de ADN en fracciones más pequeñas y degradadas. Es como arrancar hojas enteras o parte de las páginas de un libro y tratar de reconstruirlo con los pocos fragmentos restantes.

Aún con la tecnología y el conocimiento actuales, no hemos podido clonar animales tan recientes como los de la era de hielo, que habitaron el planeta hace tan solo unos miles de años, ahora imaginemos haciéndolo con organismos de más de 100 millones de años que han sufrido muchos más procesos fisicoquímicos de degradación de sus tejidos y ADN. Así que, por ahora, solo escucharemos sobre la clonación de animales prehistóricos en la ciencia ficción. A pesar de ello, el ámbar representa, quizás, el más prístino y completo de los registros fósiles. La gran diversidad de organismos atrapados en ámbar, y su exquisita preservación en tres dimensiones, proveen información acerca de su anatomía, su biología y su ecología que, de otra forma, sería inaccesible.

¿Qué es el ámbar? El ámbar es el producto de resinas de árboles que se han consolidado, polimerizado y fosilizado a lo largo de miles y millones de años. Es frecuente encontrar en el ámbar inclusiones de organismos terrestres que vivían en bosques, principalmente insectos y, en menor proporción, animales como ácaros, arañas, escorpiones, ranas, lagartijas, serpientes e, incluso, restos de aves, entre otros. En contraste, la preservación de

organismos acuáticos en esta sustancia es extremadamente rara. Entonces, ¿cómo un animal presuntamente acuático como el cangrejo logró preservarse en ámbar? Este es el caso de *Cretapsara athanata*, un cangrejo verdadero, o eubraquiuro, encontrado en ámbar burmés, que data de casi 100 millones de años. Su nombre significa “el eterno espíritu Cretácico de las nubes y las aguas”, y fusiona la referencia al Cretácico, el periodo geológico en el que habitó, a *Apsara*, espíritu del bosque y las aguas en el folclor del sudeste asiático, y *athanatos*, palabra griega que traduce “inmortal, eterno” y alude a su inmaculada preservación en ámbar, como si estuviera ‘congelado’ en el tiempo por toda la eternidad.

A menudo, los paleontólogos cuentan con restos escasos y fragmentarios para reconstruir la anatomía de los organismos del pasado, especialmente cuando estos eran animales de cuerpo blando, poco biomineralizado, o estaban constituidos por múltiples elementos, como los endoesqueletos de los vertebrados y los exoesqueletos de los artrópodos. En el caso de *C. athanata*, su preservación tridimensional en ámbar permite reconstruirlo en detalle y compararlo con sus parientes extintos y vivos para estimar su posición en el árbol genealógico de los cangrejos. Hasta la fecha, este es el cangrejo fósil más completo y de apariencia ‘moderna’ más antiguo que se conoce. Su edad y detallada preservación dan pistas sobre el origen de los eubraquiuros, el más diverso grupo de cangrejos en términos de especies y formas, el cual incluye animales como las jaibas, los cangrejos violinistas y fantasmas, los cangrejos de manglar, y los cangrejos de agua dulce, entre muchos otros.

A pesar de su diminuto tamaño (~5 mm), el escaneo de *C. athanata* mediante microtomografía computarizada ha revelado en detalle restos tan delicados como las pequeñas antenas, los ojos compuestos, las piezas bucales e, incluso, las finas setas o ‘pelos’ de apenas unas micras que recubren su boca, sus pinzas y sus patas. Es de resaltar el inusual descubrimiento de tejidos internos blandos o ligeramente mineralizados, como las branquias o las agallas reveladas digitalmente durante el escaneo del ejemplar, lo que ha permitido el estudio de aspectos relacionados con la respiración y su comparación con cangrejos actuales que habitan en ambientes acuáticos (mar, estuarios, ríos y lagos), o terrestres.

Los cangrejos son uno de los grupos más icónicos de invertebrados y ocupan un papel integral en sus hábitats, en la cadena trófica y el reciclaje de nutrientes. Son sustento de comunidades locales y de interés para la industria pesquera, y son celebrados en los carnavales y fiestas de diferentes culturas, así como en la ciencia popular y en las redes sociales mediante memes. Incluso tienen su propia constelación y signo del zodiaco. Desde su aparición en el registro fósil a comienzos del Jurásico, hace 200 millones de años, los cangrejos han sido un grupo principalmente marino, aunque hoy en día cerca del 25 % de las especies habita en ambientes no marinos (estuarios, agua dulce, cuevas y tierra firme).



Reconstrucción en 3D a partir de la microtomografía computarizada de *Cretapsara athanata*. Reconstrucción e imagen: Elizabeth Clark (UC Berkeley) y Alex Duque (Lynn University)



Reconstrucción artística de *Cretapsara athanata*, el “eterno espíritu Cretácico de las nubes y las aguas”. Imagen: Franz Anthony

Infelizmente, poco se sabe sobre el momento en que se originaron los cangrejos no marinos y el número de veces que han incursionado en estos ambientes. Los estudios moleculares han establecido que la separación de los cangrejos no marinos de sus parientes marinos más cercanos ocurrió hace más de 130 millones de años, durante el Cretácico Temprano. Por otro lado, el registro fósil más antiguo conocido de cangrejos no marinos data de finales del Cretácico Superior y el comienzo del Cenozoico, 75 a 50 millones de años atrás, y corresponde a unos pocos fragmentos de caparazones y pinzas. *C. athanata*, con cerca de 100 millones de años y un grado de preservación sin precedentes en fósiles de decápodos (grupo que incluye a camarones, langostas, y cangrejos), llena ese hiato entre el registro molecular y el registro fósil y empuja el origen de los cangrejos no marinos a fechas próximas a la edad de divergencia molecular predicha.

Curiosamente, la transición del mar a los ambientes no marinos es un evento infrecuente en la mayoría de los grupos de animales, dados los diferentes requerimientos y retos que impone la vida fuera del agua, o en agua dulce, en cuanto a la respiración, la visión, la desecación, y la osmorregulación, entre otras. A esto se suma la competencia por los recursos con animales ya establecidos en el hábitat y la exposición a nuevos predadores. A pesar de esto, los cangrejos eubraquiuros, incluido el grupo al que pertenece *C. athanata*, han conquistado la tierra firme y los ambientes dulceacuícolas por lo menos en doce ocasiones en los últimos 100 millones de años. La información disponible sobre su anatomía, tafonomía, estadio de desarrollo y paleoecología, sugiere que el ejemplar quedó atrapado en vida en la resina de árboles en un ambiente de agua dulce o salobre cerca de un bosque costero o estuarino.

Los datos morfológicos y de los rangos estratigráficos de las principales ramas en el árbol de la vida de los cangrejos revelan que, aunque aparecen durante el Jurásico, es durante el Cretácico que experimentan un evento mayor de diversificación y radiación adaptativa, la denominada ‘revolución Cretácica de los cangrejos’ (*Cretaceous crab revolution*), que dio lugar a varias ramas que solo vivieron en ese periodo geológico, así como a los ancestros de varios de los grupos modernos de los cuales se derivan las especies hoy vivientes. *El presente es la clave del pasado, y viceversa, ...y la extinción es para siempre.*

Javier Luque^{1,2}

¹Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University, Cambridge, MA, USA;

²Institute of Environment and Department of Biological Sciences, Florida International University, North Miami, FL, USA

jluque@fas.harvard.edu

Agradecimientos - Acknowledgements

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 45, números 174, 175, 176 y 177.

El comité editorial de la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales expresa sincero agradecimiento a los revisores que han participado durante el año 2021, en la valoración crítica de los artículos presentados a la revista, por su valiosa contribución, esfuerzo y tiempo dedicado.

Alan Giraldo	Gabriel Roldán	María Isabel Ríos
Alejandro Mira	Gerardo Martínez Jardines	Marianne Cardale
Alejandro Oyono Ondo Méndez	Germán Antonio Gutiérrez	Marina Sánchez De Prager
Alexander Caneva	Germán Arenas Sicard	Mario Alberto Quijano
Ana María Groot	German Chicangana	Mario Armando Higuera Garzón
Anderson Guarnizo Franco	Gladys Reinoso	Mateo López Victoria
Anderson Muñoz Quintero	Guillermo Páramo	Mauricio Andrés Osorio Lema
Ángela María Amaya Villarreal	Gustavo Adolfo Vallejo	Myriam Sánchez de Gómez
Ángela Stella Camacho Beltrán	Gustavo Giraldo Quintero	Nancy Arciniegas
Ángela Zapata Anzola	Héctor Ramírez Chávez	Nancy Liliana Villegas Bolaños
Brightdoom Josefina Márquez-Rojas	Helber Enrique Balaguera	Nelcy Rodríguez Malagón
Buenaventura Monje Andrade	Henry Reyes Pineda	Nelson Aranguren
Carlos Alberto Parra Osorio	Hernán González Osorio	Nelsy Loango Chamorro
Carlos Enrique Mejía Salazar	Hernando Campos	Olga Lucia Montenegro
Carlos Enrique Ruiz	Hernando Dueñas Jiménez	Orlando Acevedo-Charry
Carlos Felipe Barrera Sánchez	Hernando Vergara	Orlando Rivera Díaz
Carlos Molineri	Hoover Albeiro Valencia Sánchez	Oscar Johnson
Carlos L. Viviescas	Inés Gonçalves	Patricia Escobar
Carolina Castellanos Castro	Ivón Andrea Dorado Corre	Paula Andrea Garcés Constaín
Daniel Rafael Miranda	Jaime Uribe	Paula Andrea Sepúlveda Cano
Danilo Zambrano	Jairo Castaño Zapata	Rafael José Vivero
Dario Valencia Restrepo	Javier Colmenares	Reiner Palomino Lemus
David Neill	Jesús Orlando Rangel	Rémi Poncet
Diana Carolina Hoyos Jaramillo	Jorge Mario Sánchez	Ricaurte Rodríguez
Diana Chávez	Jorge Zavala Hidalgo	Robert Lücking
Diana Marcela Sánchez Lobo	José Gregorio Portilla Barbosa	Rocío Alexandra Ortíz Paz
Diego Luis Gil	José María Rincón	Román Eduardo Castañeda
Diego Mauricio Cabrera Amaya	Juan Clímaco Hio	Sepúlveda
Diego Roselli	Juan Daniel Vásquez-Restrepo	Rubén Palacio
Edmundo Rosique-Gil	Juan Felipe Lazarus	Sandra Uribe Soto
Eduard Alexis Larrañaga	Juan Pablo Gómez	Santiago Vargas Domínguez
Eduardo Dominguez	Juan Pablo Ramírez	Sergio Solari
Eduino Carbonó DelaHoz	Leonardo Castañeda Colorado	Tatiana Sanjuan
Élder Jesús Villamizar Roa	Leonardo Jaimés Martínez	Tito Bacca
Elkin Salcedo Hurtado	Lucimar Días	Víctor Huérfano
Ernesto José González Rivas	Lucy Mora	Víctor Hugo Serrano Cardozo
Eyder Daniel Gómez López	Luis Caraballo	Víctor Manuel Nieto
Fabián Michelangeli	Luis Carlos Arboleda Aparicio	Wilmer De Jesús Saldarriaga
Farid Chejne	Luis Fernando Echeverri	Agudelo
Federico Mosquera Guerra	Luis Germán Naranjo Henao	Yeinzon Rodríguez García
Fernando Martínez	Luis Norberto Granda	Yobani Mejía
Fidson Juarismy Vesga Pérez	Magaly Rueda Muñoz	Zbigniew Jaroszewicz
Francisco Antonio Villa	María del Carmen Zúñiga	

Índice de autores - Index of Authors

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 45, números 174, 175, 176 y 177.

- Adriana R. Laurent-Rios, 795
Alba Marina Torres-González, 190
Alberto Gómez-Gutiérrez, 387, 1192
Alejandro Castaño-Naranjo, 415
Alejandro Correa-Lozano, 850
Alejandro Henao-Castro, 747
Alexander Caneva, 313
Alexandra Cardona-Giraldo, 462
Alisson Valeska Caja-Molina, 777
Allan Henry Smith-Pardo, 516
Alonso Barrios-Trilleras, 449
Álvaro Duarte-Ruiz, 272
Ana A. Huamantínco-Araujo, 795
Ana M. Pereira-Ramírez, 462
Ana María D'Azevedo Breda, 1262
Ana María Rey, 666
Ana Milena López-Aguirre, 449
Ana Sofía Moreno, 366
Anamaria Navarro, 52
André Aptroot, 415
Andrea Bustca, 508
Andrés C. García, 1232
Andrés Fonseca-Cortés, 489
Ángela Espejo, 366
Ángela María Mogollón-Ortiz, 250
Ángela María Orjuela-García, 864
Balkys Quevedo-Hidalgo, 850
Betsy Paola Barrios-Galván, 817
Bibiana Moncada, 147
Brayan Coral-Jaramillo, 229
Brayan David Aroca-González, 260
Brayan Peñate-Carranza, 208
Camila Andrea Báez-Aparicio, 449
Carlos A. Parra-Vargas, 83
Carlos A. Saavedra-Rodríguez, 555
Carlos A. Vargas, 313
Carlos Andrés Londoño-Carvajal, 516
Carlos Carrasco-Badajoz, 1097
Carlos Granados, 1011
Carlos Quimbay, 1039
Carmen Giovana Granados-Ramírez, 721
Carmen Tatiana Cuadrado-Silva, 582
Carolina Rayme-Chalco, 1097
Carolina Zea-Fernández, 500
Catalina García-Castillo, 850
César A. Valenzuela-Toledo, 67
Cesar Augusto Ossa-Jaramillo, 286
Cesar Camilo Canaria-Camargo, 83
Cesar Castellanos, 527
Cesar E. Tamaris-Turizo, 208, 546
Clara Eugenia Roa-García, 190
Clara Morales-Rozo, 1205
Claudia Patricia Mejía-Villagrán, 570
Coralia Osorio, 582
Cristian Hakspiel-Segura, 817
Daniel Álvarez-Tolentino, 1097
Daniel J. Serna-Macias, 546
Daniela Bedoya-Giraldo, 806
Daniela Martínez-Medina, 1071
Darwin M. Morales-Martínez, 474
Dary Mendoza, 366
David Díaz, 122
David Ocampo, 229
Dennis Castillo-Figueroa, 1071, 1219
Diana María Jiménez-González, 432
Diego Mauricio Cabrera-Amaya, 761
Diego Rocha-López, 229
Diego Simijaca, 147
Edier Alberto Soto-Medina, 415
Edier Soto Medina, 122, 147
Eduardo Egea, 366
Eduino Carbonó-DelaHoz, 95
Edwin Orlando López-D, 1137
Elkin de J. Salcedo-Hurtado, 591
Enrique Forero, 527
Erhard Wielandt, 313
Ernesto W. Alvarado-García, 795
Esperanza Galarza, 1224
Fabio D. Lora-Clavijo, 52
Fanor Mondragón, 833
Felipe Cárdenas-Arroyo, 10
Fernando Cárdenas P., 651
Fernando de la Hoz-Restrepo, 8
Flor Ángela Peña-Alzate, 229
Francisco Antonio Villa-Navarro, 806
Frank A. Audemard, 591
Franco Alirio Vallejo Cabrera, 136
Frank Vargas, 527
Gabriel Pinilla-Agudelo, 817
Gabriel R. Navas-S, 747
Gerhard Fischer, 109
German Forero-Medina, 555
Gladys Reinoso-Flórez, 421
Gloria Garavito, 366
Gonzalo Taborda-Ocampo, 286
Harrie J. M. Sipman, 147
Héctor E. Ramírez-Chaves, 462
Héctor Fabio Arias-Monsalve, 462
Héctor Fabio Cortes-Hernández, 300
Hector García-Q., 95
Hector Osvaldo Castañeda-Fernández, 989
Helena Carranza-Castillo, 421
Hemant Kumar, 901
Heriberto David, 1154
Hernán Aristizábal-García, 1219
Hernando Efraín Caicedo-Ortiz, 989
Hilda Palacio-Betancur, 217
Horacio Torres-Sánchez, 405
Humberto Mendoza-Ciuentes, 1154
Ibon Tobes, 1097
Inge Armbrrecht, 1084
Ivonne Gutiérrez-Rojas, 850
J. Alejandro Daza, 697
J. E. Rodríguez-Páez, 1053
Jacob B. Socolar, 229
Jairo Roa-Rojas, 83
Javier Álvarez-Herrera, 109
Javier Enrique Vélez, 109
Javier Montaña, 122
Javier Orlando Orduz-Rodríguez, 250
Javier Zavaleta-Flores, 1128
Jerry Arana-Maestre, 1097
Jessica Nathalia Sánchez-Guzmán, 1113
Jesús Manuel Vásquez-Ramos, 1175
Jhon Jairo Olaya-Florez, 570
John Bayron Orjuela-Quintana, 67
Jonathan Gerardo Gordillo-Guerra, 421
Jonathan Granobles, 415
Jonhy Roberto Rodríguez-Pérez, 300
Jorge A. Luna-Fontalvo, 208
Jorge A. Quirós-Rodríguez, 709
Jorge D. Oliveros-Villanueva, 546
Jorge Eliecer Mariño-Martínez, 864
José Albino-Aguilar, 83
José Gregorio Portilla, 387, 697
José Iannacone, 777
Jose J. Henao-Osorio, 462
José Manuel Dos Santos Dos Santos, 1262
José Rancés Caicedo-Portilla, 462
José Riofrío-Quijandría, 1128
Juan Armando Sánchez, 634
Juan C. Bueno-Sánchez, 67
Juan Camilo Váquiro-García, 1113
Juan D. Villada, 272
Juan David Suaza-Vasco, 638
Juan J. Vanegas-Giraldo, 971
Juan Manuel Hoyos-Abad, 731

- Juan Mauricio Posada-Herrera, 1154
Juan Pablo Betancourt-Arango, 286
Juan Sebastián Ospina-O, 806
Julián A. Rojas-Morales, 462
Julián Clavijo-Bustos, 738
Juliana Zuluaga-Carrero, 1205
Julio Araujo-Flores, 1097
Jurgen Beckers, 229
Karen Nataly Díaz, 582
Kathiana Murillo-García, 432
Laura Contreras-Vega, 747
Laura Daniela Devia-Grimaldo, 1137
Laura Gomez-Sánchez, 850
Laura Jimena Marín-Eslava, 541
Laura L. Garzón-Salamanca, 1219
Leonor Valenzuela, 555
Leydi Julieta-Cardenas Flechas, 570
Lilia Carolina Rojas-Pérez, 850
Lilia Salazar-Ramírez, 1128
Lina Marcela Cadavid-Ramírez, 377
Lina Marcela González-Nieves, 260
Lorena Cortés-Ballén, 1205
Lorena Fernández Álvarez, 363
Lucimar Gomes-Dias, 541
Luis A. Barrera, 366
Luis Ernesto Contreras-Rodríguez, 721
M. A. Pathan, 901
M. Gonzalo Andrade-C., 1175
Manuel N. Chaur, 272
- Marcela Bernal-Ruiz, 850
María Camila Gutiérrez-Castaño, 500
María del Carmen Zúñiga, 541
María Giralza Ramírez-González, 731
María Helena Ramírez-Hernández, 721
María Isabel Ríos-Pulgarín, 432
María S. Millán, 1022
María X. Arias-Barahona, 971
Maryeimy Varón-López, 1137
Mateo Arias Vélez, 377
Mauricio Salazar-Yepes, 500
Miguel E. Rodríguez-Posada, 1071
Miryam Rincon-Joya, 570
Mónica Cabezas, 229
Nahury Yamile Castellanos-Blanco, 300
Nathali López-Cardona, 250
Nathalie García-Millán, 591
Nelson A. Canal, 738
Néstor H. Campos-Campos, 709
Néstor Roncancio-Duque, 731
Nicole Vargas-García, 1084
Orlando Acevedo-Charry, 229
Ottavio Janni, 229
Paola Díaz-Urbina, 1175
Paula C. Wandurraga, 52
Paulo César Narváez-Rincón, 850
Pedro J. Eslava-Ejaiek, 546
Rafael Miranda, 1097
Robbert Gradstein, 260
- Robert Lücking, 147
Roberto Esguerra Gutiérrez, 968
Rodolfo Mauricio Castillo-Velásquez, 795
Rodrigo Abonia, 1232
Rodrigo Castillo, 875
Royerin Ruidíaz-Ruidíaz, 709
Rubén Ardila, 361, 980
Rubén Darío Chanci-Bedoya, 864
Sandra Inés Uribe-Soto, 516
Sandra Marcela Gómez-González, 300
Sandra Milena Peñuela-Gomez, 229
Sandra Uribe-Soto,
Sandy Pestaña, 731
Sergio Losada-Prado, 1113
Sergio Manuel Cubides Pérez, 30
Siavosh Sadeghian, 1246
Silvia Lucía Villabona-González, 217
Stephanie Saavedra, 366
Stive Flores-Gómez, 1128
Tito Bacca, 738
Urley Adrián Pérez-Moncada, 1137
Vanessa Catalina Díaz-Poveda, 1246
Whady Felipe Flórez-Escobar, 916
William Guerrero-Salazar, 527
Willinton Barranco-Pérez, 95
Wilmar Torres, 1084
Yeinzon Rodríguez García, 30
Yesica Velásquez-Duque, 217
Zuania Colón-Piñeiro, 229

Índice de artículos - Index of Articles

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 45, números 174, 175, 176 y 177.

Editorial	COVID-19 y salud pública: visión de un epidemiólogo	
	Covid-19 and Public Health: an epidemiologist's perspective	8
	COVID-19 y ética: visión de un psicólogo	
	COVID-19 and ethics: a psychologist's vision	361
	Las mujeres en la pandemia y la ciencia	
	<i>Estamos en la misma tormenta, pero no en el mismo barco</i>	
Women in the pandemic and science		
<i>We are in the same storm, but not in the same boat</i>	363	
Influencia de los cambios ambientales en el riesgo y el aumento de nuevas pandemias		
Influence of environmental changes on the risk and frequency of new pandemics	634	
Dilemas éticos en la pandemia		
Ethical dilemma in the pandemic	968	
	Original article	
	Immunological detection in indoor environments of house dust mite allergens using avian antibodies - IgY: An innovative tool	
	Detección inmunológica de alérgenos de ácaros del polvo doméstico en ambientes interiores utilizando anticuerpos aviares - IgY: una herramienta innovadora	366
	Artículo original	
	El género neotropical <i>Trichoprosopon</i> Theobald 1901 (Diptera: Culicidae) en Colombia: registros de distribución e importancia médica	
	The neotropical genus <i>Trichoprosopon</i> Theobald 1901 (Diptera: Culicidae) in Colombia: records of distribution and medical importance	638
	Artículo original	
	Comparación de la distribución de probabilidad en pacientes fallecidos por COVID-19 en tres picos de la pandemia en Colombia	
	Comparison of the probability distributions in Covid-19 deaths in three peaks of the pandemic in Colombia	971
	Artículo original	
	Análisis de algunas fechas radiocarbónicas de momias arqueológicas colombianas	
	Analysis of some radiocarbon dates of archaeological mummies from Colombia	10
	Artículo original	
	La inconmensurabilidad kuhniana y las generalizaciones simbólicas: un análisis a partir de la comparación de dos paradigmas teóricos de la física	
	Kuhnian incommensurability and symbolic generalizations: A comparative analysis of the two theoretical paradigms of physics	377

**Ciencias del
Comportamiento**
Behavioral Sciences

Ensayo

Francisco José de Caldas: ¿avatar de Humboldt? Reflexiones en torno a cinco cartas anónimas publicadas en el *Diario Político de Santafé de Bogotá* en 1810

Francisco José de Caldas: Humboldt's avatar? Reflections on five anonymous letters published in the *Diario Político de Santafé de Bogotá* in 1810 387

Artículo original

Psicología en el siglo XXI

Psychology in the 21st century 651

Artículo original

Psicología evolucionista. Tomando en serio a Darwin

Evolutionary psychology. Taking Darwin seriously 980

Artículo original

Soluciones exactas de agujeros negros en la teoría generalizada de Proca

Exact black hole solutions in the generalized Proca theory 30

Artículo original

Propagación de Ondas de Alfvén Torsionales en una Atmósfera Solar Estratificada

Torsional Alfvén Waves Propagation in a Stratified Solar Atmosphere 52

Original article

On the coupling of vector fields to the Gauss-Bonnet invariant

Sobre el acople de campos vectoriales al invariante de Gauss-Bonnet 67

Review article

Structural analysis of the RE₃Ba₅Cu₈O₁₈ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) superconductor system

Análisis estructural del sistema superconductor RE₃Ba₅Cu₈O₁₈ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) 83

Ensayo

La verdad es hija del tiempo

Truth is the daughter of time 405

Original article

Ultra-cold bosonic atoms in optical lattices: An Overview

Átomos bosónicos ultrafríos en redes ópticas: una descripción general 666

Original article

Physical conditions of the coronal line region in Seyfert 2 galaxies

Condiciones físicas de la región de líneas coronales en las galaxias Seyfert 2 697

Artículo original

Densidad electrónica en regiones H II gigantes

Electron density in giant H II regions 989

Artículo original

Convergencia estadística en medida para sucesiones triples de funciones con valores difusos

Statistical convergence in measure for triple sequences of fuzzy-valued functions 1011

Artículo de revisión

El reto de reemplazar el cristalino

The challenge of replacing the crystalline lens 1022

**Ciencias
Físicas**
Physical Sciences

<p>Ciencias Físicas Physical Sciences</p>	<p>Original article Complex system properties in the spreading of COVID-19 pandemic Propiedades de sistema complejo en la propagación de la pandemia del COVID-19 1039</p>
	<p>Artículo de revisión Nano-biointerface entre semiconductor y membrana celular: fenómenos fisicoquímicos implicados en la nanotoxicidad y la capacidad antifúngica de las nanopartículas de óxido de cinc The semiconductor-cell membrane nano-biointerface: Physicochemical phenomena to consider in explaining the nanotoxicity and antifungal capacity of zinc oxide nanoparticles 1053</p>
	<p>Artículo original Diversidad beta del bosque seco tropical en el norte del Caribe colombiano Beta-diversity of the tropical dry forest in the northern Colombian Caribbean 95</p>
	<p>Artículo original Análisis de la producción de uchuva (<i>Physalis peruviana</i> L.) durante el ciclo de cosechas en invernadero con diferentes láminas de riego Analysis of the production of Cape gooseberry (<i>Physalis peruviana</i> L.) in the greenhouse with different irrigation levels during the harvest cycle 109</p>
	<p>Artículo original Biogeografía y riqueza de los líquenes de Colombia Biogeography and richness of lichens in Colombia 122</p>
	<p>Artículo original Avances en la producción de líneas de tomate <i>Solanum lycopersicum</i> Mill. con resistencia genética al perforador del fruto <i>Neoleucinodes elegantalis</i> (Guenée 1854) (<i>Lepidoptera: Crambidae</i>) Advances in the production of <i>Solanum lycopersicum</i> Mill. tomato lines with genetic resistance to the fruit borer <i>Neoleucinodes elegantalis</i> (Guenée 1854) (<i>Lepidoptera: Crambidae</i>) 136</p>
	<p>Artículo original Actualización nomenclatural y taxonómica del <i>Catálogo de Líquenes de Colombia</i> Nomenclatural and taxonomic update to the <i>Catálogo de Líquenes de Colombia</i> 147</p>
	<p>Artículo original Caracterización florística y estructural como línea de base para la restauración ecológica de bosques en la microcuenca del río Barbas, Colombia Floristic and structural characterization as a baseline for ecological restoration processes in the Río Barbas watershed, Colombia 190</p>
	<p>Artículo original Hongos ingoldianos de la parte media del río Gaira, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia Ingoldian fungi of the middle section of the Gaira River, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia 208</p>
	<p>Artículo original Influencia de palizadas en la estructura del zooplancton en un embalse tropical Influence of logjams in the structure of zooplankton in a tropical dam 217</p>
<p>Artículo original Avifauna del interfluvio de la cuenca media Caquetá-Putumayo (Japurá-Içá), al sur de la Amazonia colombiana y su respuesta a la huella humana Avifauna of the Caquetá-Putumayo (Japura-Içá) middle interfluvial region in the southern Colombian Amazon and its response to the human footprint 229</p>	

Artículo original

Efecto de las variables meteorológicas sobre la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) de la lima ácida Tahití en el piedemonte llanero, Colombia

Effect of weather variables on the anthracnose (*Colletotrichum acutatum*) affecting Tahiti lime in the Colombian eastern foothill piedmont 250

Artículo original

¿En peligro o no? Distribución potencial de la hepática *Pleurozia paradoxa* en Colombia

Endangered or not? Potential distribution of the liverwort *Pleurozia paradoxa* in Colombia 260

Artículo original

Una nueva especie y nuevos registros de líquenes en Colombia y Suramérica en el bosque seco tropical de la cuenca media del río Cauca

A new species and new records of lichens for South America and Colombia from the tropical dry forest in the middle basin of the Cauca River 415

Artículo original

Rotíferos, copépodos y branquiópodos presentes en un humedal del departamento del Tolima, Colombia

Rotifers, copepods, and branchiopods present in a wetland of the Department of Tolima, Colombia 421

Artículo original

Caracterización físicoquímica e hidrobiológica de tres ecosistemas kársticos de la cuenca del río Magdalena (Antioquia, Colombia) durante el ciclo hidrológico 2016-2017

Physical, chemical, and hydrobiological characterization of three karstic ecosystems of the Magdalena River Basin (Antioquia, Colombia) in the 2016 – 2017 hydrological cycle 432

Original article

Early silvicultural performance of eucalypt species grown in environmental conditions of the tropical dry forest of Colombia

Desempeño silvicultural temprano de especies de eucalipto en las condiciones ambientales del bosque seco tropical de Colombia 449

Original article

On the distribution of three exotic geckos of genus *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae), and an unusual record of the native lizard *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) outside its elevational range in Colombia

Sobre la distribución de tres geckos exóticos del género *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae) y un registro inusual del lagarto nativo *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) fuera de su intervalo altitudinal en Colombia 462

Artículo original

Mamíferos (Mammalia) de la Amazonía colombiana

Mammals (Mammalia) of the Colombian Amazon 474

Artículo original

Dos nuevas especies de *Macropsychanthus* (Leguminosae, Papilionoideae) de Colombia

Two new species of *Macropsychanthus* (Leguminosae, Papilionoideae) from Colombia 489

Artículo original

Nuevos registros de Pucciniaceae (Pucciniales, Fungi) para Colombia

New Records of Pucciniaceae (Pucciniales, Fungi) for Colombia 500

Artículo original

Presencia de la especie invasora *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera: Drosophilidae) en Medellín, Colombia

Presence of the invasive species *Zaprionus indianus* Gupta, 1970 (Diptera: Drosophilidae) in Medellín, Colombia 508

Original article

Notes on the genus *Eufriesea* in Colombia: Description of the female of *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977) and extension of the distribution range of four species of the genus

Notas sobre el género *Eufriesea* en Colombia: descripción de la hembra de *Eufriesea dressleri* (Kimsey, 1977) y extensión del rango de distribución de cuatro especies del género 516

Artículo original

Tipos de leguminosas colombianas I. (Leguminosae: subfamilia Cercidoideae), con notas sobre el género *Schnella* en Colombia

Types of Colombian legumes I. (Leguminosae: Subfamily Cercidoideae) with notes on the genus *Schnella* in Colombia 527

Artículo original

Primer registro de *Campylocia araca* Gonçalves & Salles (Ephemeroptera: Euthyplociidae) en Colombia

First record of *Campylocia araca* Gonçalves & Salles (Ephemeroptera: Euthyplociidae) for Colombia 541

Artículo original

Primer registro del camarón hada *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982 (Anostraca, Thamnocephalidae) en Colombia con observaciones morfológicas adicionales

First record of the fairy shrimp *Thamnocephalus venezuelensis* Belk & Pereira, 1982 (Anostraca, Thamnocephalidae) in Colombia with additional morphological observations 546

Artículo de revisión

Las especies paisaje como estrategia de conservación de la biodiversidad: evaluación cuantitativa de su efectividad

Landscape species approach for biodiversity conservation: a quantitative assessment of effectiveness 555

Artículo original

Caracterización estructural de las formaciones coralinas en la región de San Antero, Córdoba, Caribe colombiano

Structural characterization of the coral formations in the San Antero region, Córdoba, Colombian Caribbean 709

Artículo original

Optimización del ensayo de inhibición de la nicotinamida/nicotinato mononucleótido adenililtransferasa de *Leishmania braziliensis*

Optimization of the nicotinamide/nicotinate mononucleotide adenylyltransferase inhibition assay from *Leishmania braziliensis* 721

Artículo original

Densidad poblacional del toro de monte (*Pyroderus scutatus*) en el Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya, Colombia

Population density of the red-ruffed fruitcrow (*Pyroderus scutatus*) in the Otún Quimbaya Wildlife Sanctuary, Colombia 731

Artículo original	
Nuevos registros de Aphodiinae (Coleoptera, Scarabaeidae) en Colombia	
New records of Aphodiinae (Coleoptera, Scarabaeidae) from Colombia	738
Original article	
Composition of the zooplankton community associated with mesophotic corals in “Corales de Profundidad” National Natural Park, Colombian Caribbean	
Composición de la comunidad zooplanctónica asociada a arrecifes de corales mesofóticos en el Parque Nacional Natural Corales de Profundidad, Caribe colombiano	747
Artículo original	
Riqueza, composición florística y estructura de la vegetación silvestre en la zona rural de las cuencas de las quebradas Yomasa y Fucha, Bogotá, Colombia	
Richness, floristic composition, and structure of wild vegetation in rural areas of the Yomasa and Fucha stream watersheds (Bogotá, Colombia)	761
Artículo original	
Evaluación del riesgo ambiental por petróleo crudo en las especies acuáticas <i>Lemna minor</i>, <i>Daphnia magna</i> y <i>Danio rerio</i>	
Environmental risk assessment of crude oil in <i>Lemna minor</i> , <i>Daphnia magna</i> , and <i>Danio rerio</i>	777
Artículo original	
Dípteros acuáticos de dos humedales de la costa central de Perú y obtención de adultos a partir de pupas en el laboratorio	
Aquatic Diptera from two wetlands of the central coast of Perú and obtention of adults from pupae in the laboratory	795
Artículo original	
Diversidad y estructura de los ensamblajes ícticos en los humedales, caños y esteros de la sabana inundable del río Ariporo, Casanare, Colombia	
Diversity and structure of fish assemblages in the wetland, <i>caños</i> and <i>esteros</i> of the Ariporo River floodplain, Casanare, Colombia	806
Original article	
Phytoplankton functional groups as environmental indicators at a high neotropical mountain reservoir in Colombia	
Grupos funcionales del fitoplancton como indicadores de las condiciones ambientales de un embalse de alta montaña neotropical en Colombia	817
Original article	
Activity patterns of medium and large mammals in two savanna ecosystems in the Colombian Llanos	
Patrones de actividad de mamíferos medianos y grandes en dos ecosistemas de sabana de los Llanos colombianos	1071
Artículo original	
¿Es el guamo (<i>Inga densiflora</i> Benth.) un árbol benéfico como acompañante de plántulas de café con diferentes tipos de fertilización?	
Is guamo (<i>Inga densiflora</i> Benth.) a beneficial tree as a companion of coffee seedlings under differential fertilization?	1084
Artículo original	
Distribución altitudinal de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables ambientales en un sistema fluvial amazónico (Perú)	
Altitudinal distribution of aquatic macroinvertebrates and its relation to environmental variables in an Amazon river system (Perú)	1097

Artículo original

Caracterización espacio-temporal de la avifauna del cañón de Las Hermosas, Chaparral, Tolima, Colombia

Space-time characterization of the avifauna in Las Hermosas Canyon, Chaparral, Tolima, Colombia 1113

Artículo original

Estructura de tallas, crecimiento y tasa de explotación de *Potamorhina altamazonica* (Characiformes: Curimatidae) en el río Ucayali (Perú)

Length structure, growth, and mortality of *Potamorhina altamazonica* (Characiformes: Curimatidae) in Ucayali River (Perú) 1128

Artículo original

Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en bosques secos tropicales (BST) afectados por fuego y depósitos fluviovolcánicos en el departamento del Tolima, Colombia

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in the tropical dry forest affected by fire and fluviovolcanic deposits in the department of Tolima, Colombia 1137

Artículo original

Nuevas propuestas nomenclaturales en Melastomataceae y adiciones de la familia al Catálogo de la Flora de Colombia

New nomenclatural proposals in Melastomataceae and additions to the family in the Catalog of the Flora of Colombia 1154

Artículo original

Diversidad de mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) en dos zonas del departamento del Vaupés, Colombia

Diversity of butterflies (Lepidoptera: Hesperioidea-Papilionoidea) in two areas of the department of Vaupés, Colombia 1175

Ensayo

Consideraciones en torno al primer artículo impreso sobre la geografía de las plantas de Alexander von Humboldt, publicado en La Habana en mayo de 1804

Considerations on the first printed article on the geography of plants by Alexander von Humboldt, published in Havana in May 1804 1192

Artículo original

Propuesta metodológica para abordar la restauración ecológica participativa en humedales de Bogotá D.C., Colombia

Methodological proposal to address participatory ecological restoration in wetlands of Bogotá DC (Colombia) 1205

Brief communication

Confirmation of *Homoeoneuria* Eaton, 1881 (Ephemeroptera: Oligoneuriidae) record in Colombia

Confirmacion del registro de *Homoeoneuria* Eaton, 1881 (Ephemeroptera: Oligoneuriidae) en Colombia 1219

Original article

Regiospecific synthesis and electrochemical study of two water-soluble C₆₀ carboxylic derivatives

Síntesis regiospecífica y estudio electroquímico de dos derivados carboxílicos C₆₀ solubles en agua 272

**Ciencias
Químicas**
Chemical Sciences

Artículo original

Extracción de plaguicidas en el aguacate Hass (*Persea americana* Mill. cv.) mediante el uso de C₁₈ y arcillas funcionales como fase adsorbente en la metodología QuEChERS

Extraction of pesticides in Hass avocado (*Persea americana* Mill. cv.) using C₁₈ and functional clays as adsorbent phases in the QuEChERS methodology 286

Artículo original

Fotocatálisis heterogénea para la degradación de la orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina

Heterogeneous photocatalysis for ortho- and meta-nitroaniline degradation 300

Original article

Synthesis of nanostructured (Ti-Zr-Si)₄N coatings deposited on Ti6Al4V alloy

Síntesis de recubrimientos nanoestructurados de (Ti-Zr-Si)₄N depositados sobre aleación de Ti6Al4V 570

Artículo de revisión

Estudio químico del aroma y bioactividad de la fruta del pepino dulce (*Solanum muricatum*)

Flavor chemistry and bioactivity studies on sweet cucumber (*Solanum muricatum*) pulp fruit 582

Artículo original

Ciclos del dióxido de carbono en la formación y utilización de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático

Carbon dioxide cycles in the formation and use of fossil fuels and their effect on climate change 833

Original article

Brewer's spent grain as substrate for enzyme and reducing sugar production using *Penicillium* sp. HC1

Cascarilla de cebada como sustrato para la producción de enzimas y azúcares reductores usando *Penicillium* sp. HC1 850

Artículo original

Estudios electrónicos y electroquímicos del 2,2-bis[5'-(2'-carbonilfuranil)]propano

Electronic and electrochemical studies of 2,2-bis[5'-(2'-carbonylfuranyl)]propane 1224

Original article

Using a warm dioxane/MeOH/NaBH₄ mixture as convenient medium for the selective chemical reduction of the C=C double bond in α,β -unsaturated systems

Uso de una mezcla dioxane/MeOH/NaBH₄ en caliente como un medio conveniente para la reducción química selectiva del doble enlace C=C en sistemas α,β -insaturados 1232

Artículo de revisión

Desarrollo de los instrumentos de detección y de registro de señales sísmicas. Metadatos de las redes sismológicas de la región de Latinoamérica y el Caribe

Development of instruments for the detection and recording of seismic signals. Metadata of the seismological networks of the Latin American and Caribbean region..... 313

Artículo original

Parámetros focales del terremoto del 28 de abril de 1894 en los Andes venezolanos usando datos macrosísmicos

Focal parameters of the April 28, 1894 earthquake in the Venezuelan Andes using macrosismic data 591

Artículo original

Emisiones de metano asociadas a la minería subterránea del carbón en el altiplano cundiboyacense (Colombia)

Methane emissions from underground coal mining in the Altiplano Cundiboyacense (Colombia) 864

**Ciencias
de la Tierra**
Earth Sciences

<p>Ciencias de la Tierra Earth Sciences</p>	<p>Artículo original</p> <p>La oscilación antártica: su influencia en la variabilidad interanual de la precipitación en Costa Rica</p> <p>The Antarctic oscillation: its influence on interannual variability of rainfall in Costa Rica 875</p>
	<p>Artículo original</p> <p>Evaluación de un método rápido para determinar los requerimientos de cal en suelos de la zona cafetera colombiana</p> <p>Evaluation of a rapid method to determine lime requirements in acid soils of the Colombian coffee zone 1246</p>
<p>Matemáticas Mathematics</p>	<p>Original article</p> <p>On A Logarithmic Mittag-Leffler Function, its Properties and Applications</p> <p>Sobre una función logarítmica de Mittag-Leffler, sus propiedades y aplicaciones 901</p>
	<p>Artículo original</p> <p>Colocación con funciones de base radial para la solución de modelos matemáticos en fenómenos de transporte</p> <p>Collocation with radial basis functions for the solution of mathematical models in transport phenomena 916</p>
	<p>Original article</p> <p>Learning complex functions with GeoGebra</p> <p>Aprendiendo funciones complejas con GeoGebra 1262</p>
	<p>In Memoriam</p> <p>Germán Domingo Amat García 607</p> <p>Regino Enrique Martínez-Chavanz 609</p>
	<p>Cartas al editor</p> <p>Letters to the editor 940</p>
	<p>Comentario bibliográfico</p> <p>Bibliographic commentary 333</p>
	<p>Comentario bibliográfico</p> <p>Bibliographic commentary 611</p>
	<p>Comentario bibliográfico</p> <p>Bibliographic commentary 938</p>
	<p>Comentario bibliográfico</p> <p>Bibliographic commentary 1277</p>

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.

