



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

# Revista de la 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. 49 · Número 193 · Págs. 697-959 · Octubre - Diciembre de 2025 · Bogotá - Colombia

## Comité editorial

### Editora

Elizabeth Castañeda, Ph. D., editora jefe  
Investigadora emérita del Instituto  
Nacional de Salud, Bogotá, Colombia

### Grupo de apoyo

Marta Renza, correctora de estilo  
Johanna Morales, diagramadora  
Bibiana Dimate, Publindex  
Pablo Alexander Tenjo, asistente técnico

### Asistente editorial

Carolina Acosta

## 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
- María Mercedes Zambrano, Ph. D.  
Corpogen, Bogotá, Colombia
- Juan G McEwen, Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

### Ciencias del Comportamiento

- Guillermo Páramo, M.Sc.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia
- Ana María Groot de Mahecha, M. Sc.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

- Fernando Cárdenas, Ph. D.  
Universidad de los Andes, 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
- Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Edgar González, Ph. D.  
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- Rafael Julián González Hernández, Ph. D.  
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- Carlos Duque, Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Camilo Younes, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Manizales, Colombia

## Ciencias Naturales

- ④ José Luis Fernández Alonso, Ph. D.  
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de  
Investigaciones Científicas, Madrid, España
- ④ Jaime Cantera, Doctorat d'Etat  
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- ④ Gabriel Roldán, Dr. rer. nat.  
Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Antioquia, Colombia
- ④ Sandra Baena Garzón, Ph. D.  
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- ④ Néstor Hernando Campos Campos, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe, Colombia
- ④ Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.  
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
- ④ Jairo Castaño-Zapata, Ph. D.  
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia
- ④ Juan Manuel Díaz Merlano, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ④ Gerardo A. Aymard C, Ph. D.  
Universidad Nacional de los Llanos Ezequiel Zamora, Venezuela
- ④ Néstor Julio García, Ph. D.  
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- ④ Arturo Acero, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Santa Marta, Colombia
- ④ Elizabeth Hodson de Jaramillo, Ph. D.  
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- ④ John Donato, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ④ Martha R. Campos, M. Sc.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ④ Carolina Romero, M. Sc.  
Herbarium, Missouri Botanical Garden, Estados Unidos
- ④ Eduardo Flórez, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ④ Silvia Villabona, Ph. D.  
Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Antioquia, Colombia
- ④ Natalia Ocampo Peñuela, Ph. D.  
Universidad de California, Santa Cruz, Estados Unidos
- ④ María Eugenia-Morales, Ph. D.  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,  
Tunja, Colombia

## Ciencias Químicas

- ④ Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ④ Myriam Sánchez de Gómez, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ④ Fernando Martínez, Docteur en Chimie  
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

- ④ Luis Fernando Echeverry, Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- ④ Carmenza Duque Beltrán, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

## Ciencias de la tierra

- ④ Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.  
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
- ④ José Daniel Pabón, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ④ Alexander Correa, Ph. D.  
Instituto de Geología, Universidad Nacional  
Autónoma de México, Mexico
- ④ Camilo Montes, Ph. D.  
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- ④ Germán Bayona, Ph. D.  
Corporación Geológica Ares, Bogotá, Colombia
- ④ Hernando Dueñas Jiménez, Ph. D.  
BIOSS SAS, Antioquia, Colombia
- ④ Natalia Hoyos, Ph. D.  
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- ④ Camila Martínez, Ph. D.  
Universidad Eafit, Medellín, Colombia
- ④ Monica Carvalho, Ph. D.  
University of Michigan, Estados Unidos
- ④ Oris Rodríguez-Reyes, Ph. D.  
Universidad de Panamá
- ④ José Gregorio Portilla, Ph. D.  
Observatorio Astronómico Nacional de Colombia,  
Bogotá, Universidad Nacional, Colombia
- ④ Santiago Vargas-Dominguez, Ph. D.  
Observatorio Astronómico Nacional de Colombia,  
Bogotá, Universidad Nacional, Colombia

## Matemáticas

- Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.  
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- ④ Luis Español González, Ph. D.  
Universidad de la Rioja, España
- ④ Luis Carlos Arboleda, Doctor  
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- ④ Clara Elena Sánchez, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Fernando Zalamea Traba, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ④ Carlos Enrique Mejía, Ph. D.  
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- ④ Francisco Marcellán, Ph. D.  
Escuela Politécnica Superior, Madrid, España
- ④ Fernando León Saavedra, Ph. D.  
Universidad de Cádiz, España

## Comité científico internacional

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

## Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Dialnet	Online Computer Library Center (OCLC)	Web of Sciences (WoS)
DOAJ	Publindex, Colciencias	Zentralblatt für Mathematik
Emerging Sources Citation Index (ESCI)	SCOPUS	
Latindex	SciELO, Colombia	

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

**Periodicidad:** trimestral  
**Fecha de inicio:** 1936

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

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

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



### Nuestra portada

Se presenta una composición de imágenes con algunos de los foraminíferos representativos de los ambientes arrecifales de la isla de Providencia. La escala corresponde a 100  $\mu\text{m}$ . Algunos de estos géneros presentan algas simbiotas, los cuales vienen siendo utilizados como bioindicadores en la región Caribe. La técnica de adquisición de las microfotografías es de apilamiento focal.

Fotografías por Gustavo A. Torres.

Ver artículo: Patarroyo, G. D., Torres, G. A., M. Torres, J., Gómez, D. F., & Bortolin, R. C. (2025). Foraminíferos bentónicos como indicadores ambientales en dos entornos arrecifales de Colombia: la isla de Providencia y la bahía de Cartagena. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*. <https://doi.org/10.18257/raccefyfn.3145>



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

# Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 49 · Número 193 · Págs. 697-959 · Octubre - Diciembre de 2025 · Bogotá - Colombia

## Contenido - Contents

<b>Ciencias Biomédicas</b> Biomedical Sciences	<a href="#">Artículo original</a>
	<b>Caracterización bioinformática de modificaciones postraduccionales asociadas a la mutación con cambio de sentido T30I en la ferritina de cadena ligera y su efecto en la hiperferritinemia con cataratas</b> Bioinformatic characterization of post-translational modifications related to the T30I missense mutation in the ferritin light chain protein and its effect on hyperferritinemia with cataracts <i>Madelin Gómez-Hernández, Alejandro Soto-Ospina, Andrés Villegas- Lanau</i> ..... 703
<b>Ciencias Físicas</b> Physical Sciences	<a href="#">Original article</a>
	<b>AI-Guided Discovery of Chiral Kagome Materials: Linking Wyckoff Symmetry, Oxidation States, and Electronic Topology</b> Descubrimiento asistido por IA de materiales Kagome quirales: relación entre simetría de Wyckoff, estados de oxidación y topología electrónica <i>Aldo H. Romero</i> ..... 714
<b>Ciencias Naturales</b> Natural Sciences	<a href="#">Artículo original</a>
	<b>Foraminíferos bentónicos como indicadores ambientales en dos entornos arrecifales de Colombia: la isla de Providencia y la bahía de Cartagena</b> Benthic foraminifers as bioindicators in two Colombian reef settings: Old Providence Island and Cartagena Bay <i>German D. Patarroyo, Gustavo A. Torres, José M. Torres, Diego F. Gómez, Rafael C. Bortolin†</i> ..... 728
	<a href="#">Artículo original</a>
	<b>Utilización de subproductos lignocelulósicos para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq.) P. Kumm. y <i>P. djamor</i> (Rumph. ex Fr.) Boedijn en San Martín, Perú: una evaluación productiva y nutricional</b> Utilization of lignocellulosic by-products for the cultivation of <i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq.) P. Kumm. y <i>P. djamor</i> (Rumph. ex Fr.) Boedijn in San Martín, Perú: a productive and nutritional evaluation <i>José Jaime Cayotopa-Torres, E. Hanz Rodríguez-Cabrera, Delmar Arbey Olivera-Cayotopa, Héctor Guerra-Arévalo, Felix Andi Eugenio-Quiroz, Dennis del Castillo-Torres</i> ..... 748

**Ciencias  
Naturales**  
Natural Sciences

Artículo original

**Inmunidad innata y funciones antimicrobianas del capullo durante la estivación de los peces pulmonados**

Innate immunity and antimicrobial functions of the cocoon during estivation in lungfish

*Luis F. García* ..... 762

Artículo original

**La familia Marcgraviaceae en México**

The Marcgraviaceae family in Mexico

*Diego Giraldo-Cañas* ..... 772

Original article

**Marine diatoms from the Colombian Pacific: A list of species with some taxonomic annotations**

Diatomeas marinas del Pacífico colombiano: Una lista de especies con algunas anotaciones taxonómicas

*Humberto Luis Quintana-Manotas, Jesús Javier Hoyos-Acuña, Juan José Gallego-Zerrato, José Antolín Aké-Castillo* ..... 797

Original article

**Estimating density and occupancy of *Penelope perspicax* (Cauca Guan) and *Alouatta seniculus* (Colombian Red Howler Monkey) in the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary, Colombia**

Estimación de densidad y ocupación de *Penelope perspicax* (Pava caucana) y *Alouatta seniculus* (Mono aullador rojo colombiano) en el Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya, Colombia

*Néstor Roncancio-Duque, María Girleza Ramírez-González, Jose Manuela Vallejo-López* ..... 805

**Ciencias  
Químicas**  
Chemical Sciences

Original article

**Biogenic synthesis of silver-functionalized iron and copper oxide nanocomposites using the aqueous extract of *Psidium guajava* fruit**

Síntesis biogénica de nanocompuestos de óxidos de cobre y de hierro funcionalizados con plata utilizando el extracto acuoso del fruto de *Psidium guajava*

*Michael Castañeda-Mendoza, Gabriel Leonardo Mora-Najar, Claudia Liliana Sánchez-Sáenz, Rolando Javier Rincón-Ortiz, Cristian Camilo Ramírez-Fosca, Indry Milena Saavedra-Gaona, Daniel Llamosa-Pérez, Carlos Arturo Parra-Vargas* ..... 818

Original article

**Optimization of the methodology for the extraction of organophosphate pesticides by HS-SPME-GC-NPD**

Optimización de la metodología de extracción de plaguicidas organofosforados por HS-SPME-GC-NPD

*Jhon Alexander Fiscal-Ladino, Gonzalo Taborda-Ocampo, Juan Pablo Betancourt-Arango* ..... 833

**Matemáticas**  
Mathematics

Original article

**A survey on information geometry: statistical manifolds and statistical models**

Un estudio sobre geometría de la información: variedades estadísticas y modelos estadísticos

*Nicolás Martínez-Alba, Olga Garatejo-Escobar* ..... 844

Ensayo

**Galois, Riemann y Felisberto. Fragmentos de un arte de la ambigüedad en la narrativa temprana**

Galois, Riemann, and Felisberto. Fragments of ambiguity in the early narrative

*Fernando Zalamea* ..... 872

Ensayo/ Essay

**Premio Nobel de Física 2025: los galardonados, el motivo, el legado**

Nobel Prize in Physics 2025: the laureates, the reason, the legacy

*Maria Elena Gómez* ..... 898

<b>Premio Nobel de Fisiología o Medicina</b>	
<b>Linfocitos T reguladores: de la teoría del <i>horror autotoxicus</i> al Premio Nobel 2025</b>	
Nobel Prize in Physiology or Medicine	
Regulatory T lymphocytes: from the horror autotoxicus theory to the Nobel Prize 2025	
<i>John M. González MD, Ph.D.</i> .....	903
<b>Premio Nobel de Química a los diseñadores de estructuras metalorgánicas</b>	
Nobel Prize in Chemistry awarded to designers of metal-organic frameworks	
<i>Moisés Wasserman Ph.D.</i> .....	907
<b>El Premio Abel 2025</b>	
The Abel Prize 2025	
<i>Clara Helena Sánchez Botero</i> .....	911
<b>Opinión/ Opinion</b>	
<b>El sembrador de jardines: Enrique Pérez Arbeláez y la floración de una idea</b>	
The garden sower: Enrique Pérez Arbeláez and the flowering of an idea	
<i>Germán Darío Álvarez Lucero</i> .....	914
<b>Comentario bibliográfico/Bibliographic commentary</b>	
<b>Hitos del pensamiento ondulatorio de la luz: a veces incluso también ondula.</b>	
<i>Saltem aliquando etiam undulatum</i>	
Milestones in the wave theory of light: sometimes it even undulates.	
<i>Saltem aliquando etiam undulatum</i>	
<i>John Fredy Barrera Ramírez</i> .....	921
<b>Macroinvertebrados acuáticos de Colombia: Parte I.</b>	
Aquatic macroinvertebrates of Colombia: Part I.	
<i>Lucimar Gomes Dias</i> .....	923
<b>Club de revistas/Journal club</b>	
<b>Fenotipos circulatorios en hipertensión identificados mediante monitoreo ambulatorio de la presión arterial de 24 horas</b>	
Circulatory phenotypes in hypertension identified by 24-hour ambulatory blood pressure monitoring	
<i>Juan Guillermo McEwen O., MD, PhD</i> .....	925
<b>Vida de la Academia</b>	
<b>Medalla Humboldt-Caldas 2025</b>	
Humboldt-Caldas Medal, 2025 .....	928
<b>Premio Angela Restrepo Moreno 2025</b>	
Angela-Restrepo-Moreno Prize, 2025 .....	932
<b>Agradecimientos</b>	
Acknowledgements .....	936
<b>Índice autores</b>	
Authors Index .....	937
<b>Índice de artículos</b>	
Article Index .....	939
<b>Enfoque y alcance</b>	
Focus and Scope .....	947

Artículo original

## Caracterización bioinformática de modificaciones postraduccionales asociadas a la mutación con cambio de sentido T30I en la ferritina de cadena ligera y su efecto en la hiperferritinemia con cataratas

### Bioinformatic characterization of post-translational modifications related to the T30I missense mutation in the ferritin light chain protein and its effect on hyperferritinemia with cataracts

✉ Madelin Gómez-Hernández<sup>1,\*</sup>, ✉ Alejandro Soto-Ospina<sup>2</sup>, ✉ Andrés Villegas- Lanau<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Neurociencias de Antioquia (GNA) y Grupo de Genética Molecular (GENMOL), Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Producción, Desarrollo y Transformación Agropecuaria GIPDTA, Caldas, Antioquia, Colombia

<sup>3</sup>Grupo de Neurociencias de Antioquia (GNA), Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

## Resumen

La ferritina es una proteína altamente conservada, pero las mutaciones en su secuencia primaria pueden estar relacionadas con diversas enfermedades, entre ellas, la hiperferritinemia con cataratas asociada a la mutación con cambio de sentido T30I en la ferritina de cadena ligera. Aunque se han propuesto algunos de los mecanismos moleculares de dicha mutación, el papel de las modificaciones postraduccionales involucradas aún no se ha esclarecido completamente. Hacemos aquí una caracterización bioinformática de las modificaciones alteradas por la mutación utilizando bases de datos y programas predictivos como NetNGlyc 1.0, NetOGlyc 4.0, NETPHOS 3.1 y Reactome. Nuestros análisis apuntaron hacia la pérdida de fosforilación en la serina 33 por acción de la quinasa CKI, lo que afecta la vía de señalización Wnt/ $\beta$ -catenina. Estos resultados nos permiten proponer que la alteración en las modificaciones postraduccionales de la ferritina de cadena ligera constituiría un mecanismo molecular relacionado con el desarrollo de cataratas en la hiperferritinemia hereditaria.

**Palabras clave:** Ferritina; Cataratas por hiperferritinemia hereditaria-HHCS; Vía Wnt/ $\beta$ -catenina; Cataratas.

## Abstract

Ferritin is a highly conserved protein; however, mutations in its primary sequence may be associated with various diseases. Among them is hyperferritinemia with cataracts, related to the T30I missense mutation in the ferritin light chain, for which some molecular mechanisms have been proposed, but the role of the post-translational modifications involved has not yet been fully elucidated. Here, we performed a bioinformatic characterization of the post-translational modifications altered by this mutation using database searches and predictive tools such as NetNGlyc 1.0, NetOGlyc 4.0, NetPhos 3.1, and Reactome. The analyses suggest a loss of phosphorylation at serine 33 by the CKI kinase, which affects the Wnt/ $\beta$ -catenin signaling pathway. These results support the hypothesis that alterations in the post-translational modifications of the ferritin light chain may constitute a potential molecular mechanism related to cataract development in hereditary hyperferritinemia.

**Keywords:** Ferritin; Hyperferritinemia with cataracts-HHCS; Wnt/ $\beta$ -catenin pathway; Cataracts.

**Citación:** Gómez-Hernández M, *et al.* Caracterización bioinformática de modificaciones postraduccionales asociadas a la mutación con cambio de sentido T30I en la ferritina de cadena ligera y su efecto en la hiperferritinemia con cataratas. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):703-713, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3228>

**Editor:** Luis Fernando García

**\*Correspondencia:**

Madelin Gómez Hernández;  
[madelin.gomezgh@gmail.com](mailto:madelin.gomezgh@gmail.com)

**Recibido:** 27 de mayo de 2025

**Aceptado:** 1 de octubre de 2025

**Publicado en línea:** 15 de octubre de 2025

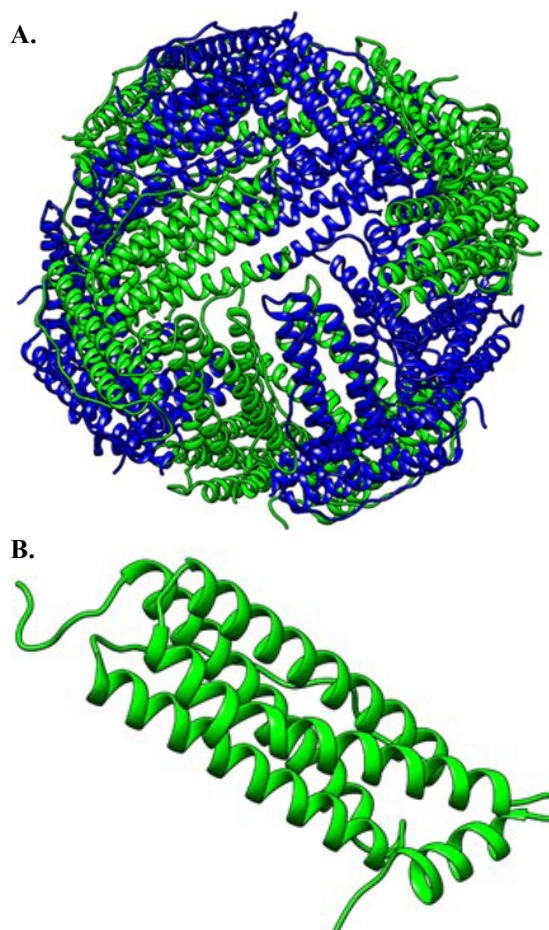


Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Introducción

La ferritina es una proteína intracelular altamente conservada desde los procariotas hasta los eucariotas cuya función principal es almacenar aproximadamente 4.500 átomos de  $\text{Fe}^{3+}_{(ac)}$ ; está compuesta por 24 subunidades que se autoensamblan para formar una nanojaula de forma esférica (**Figura 1A**) con 14 canales: seis hidrofílicos con simetría triple, que permiten la entrada del hierro, y ocho hidrofóbicos con simetría cuádruple, los cuales proporcionan una vía de salida del hierro almacenado dentro de la proteína (**Iqbal *et al.*, 2021**).

Las subunidades de la ferritina están constituidas por un 10 a 20 % de cadenas pesadas (FTH1) y un 80 a 90 % de cadenas ligeras (FTL), en las que la transcripción de los genes FTL y FTH1, que codifican las subunidades L y H de la proteína, está modulada por citocinas proinflamatorias y factores de crecimiento a través de mecanismos de regulación transcripcional (**Torti & Torti, 2002**). Por otro lado, la cadena ligera de la ferritina, o FTL (**Figura 1B**), está compuesta por 175 aminoácidos y posee variantes con cambio de sentido asociadas a ciertas enfermedades. Tal es el caso de la mutación A96T, hallada en pacientes con neuroferritinopatía (**Gómez *et al.*, 2024**), y la mutación T30I, presente en pacientes aquejados por hiperferritinemia con cataratas (**Carrillo *et al.*, 2015**).



**Figura 1.** Modelo tridimensional de la proteína ferritina en formato de cintas: **A.** Estructura esférica de la proteína ferritina, conformada por 24 subunidades: en azul se representan las cadenas pesadas (FTH1) y en verde, las cadenas ligeras (FTL). **B.** Subunidad individual de la ferritina de cadena ligera (FTL); se resaltan los extremos N-terminal y C-terminal, que corresponden a regiones claves en la estructura y función de la proteína.

La hiperferritinemia con cataratas, también conocida como síndrome de cataratas por hiperferritinemia hereditaria (*Hyperferritinemia-cataract syndrome*, HHCS, *Online Mendelian Inheritance in Man*®, OMIM #600886), es una rara enfermedad genética autosómica dominante, con una prevalencia estimada de 1/200.000 (Eris *et al.*, 2023), que se caracteriza por la presencia de cataratas de inicio tardío y un aumento de la concentración de L-ferritina (Lachlan *et al.*, 2004). En otras palabras, el síndrome de hiperferritinemia con cataratas es un trastorno caracterizado por un exceso de ferritina en la sangre y los tejidos del cuerpo (Yang *et al.*, 2021).

El HHCS fue descrito por primera vez por Beaumont *et al.* (1995) y Girelli *et al.* (1995) a partir de investigaciones en varias familias. Bonneau *et al.* describieron tres generaciones de una familia en Francia cuyos miembros presentaban deterioro de la agudeza visual desde temprana edad, con depósitos en todas las capas de ambos cristales, un nivel elevado de ferritina circulante y ausencia de otras anomalías hematológicas o bioquímicas. Por su parte, Girelli *et al.* (1995) describieron dos familias del norte de Italia, una de ellas con evidencia de cataratas nucleares congénitas y otra, de cataratas bilaterales de progresión lenta con aumento en los niveles de ferritina sérica; sus análisis de hierro y los parámetros hematológicos eran normales (Craig *et al.*, 2003a; Nos *et al.*, 2021). Sin embargo, la información detallada sobre el fenotipo y las características de esta enfermedad apareció después, a partir del 2001 (Kaarniranta *et al.*, 2023).

El HHCS está asociado con mutaciones en los elementos sensibles al hierro (IRE), estructuras conservadas en forma de tallo-bucle localizadas en las regiones no traducidas (UTR) 5' o 3' de los ARNm de los genes regulados por hierro, como el gen FTL (Neves *et al.*, 2019). Estos elementos controlan la regulación postranscripcional del equilibrio u homeostasis intracelular del hierro (Khan *et al.*, 2023). Hasta la fecha se han descrito al menos 36 mutaciones puntuales, nueve deleciones y dos inserciones en esta región (Nos *et al.*, 2021). La mayoría de estas variantes suele ser heterocigota, lo que se explica por ser el HHCS una enfermedad de herencia autosómica dominante. Por otra parte, Kannengiesser *et al.* (2009) reportaron una mutación con cambio de sentido en pacientes heterocigotos en la posición c.89C>T (NM\_000146.3) del gen FTL, la cual resulta en el cambio de aminoácido p. Thr30Ile (Kannengiesser *et al.*, 2009) y explica la aparición de la enfermedad por la presencia de mutaciones puntuales en el IRE de la ferritina de cadena ligera, con la consecuente acumulación anormal de ferritina en la tejidos y suero sin sobrecarga de hierro (Kannengiesser *et al.*, 2009).

Como ya se mencionó, entre las manifestaciones clínicas más destacadas del HHCS se encuentra la ferritina sérica elevada, mayor a 300 ng/mL en hombres y 200 ng/mL en mujeres (Elsayed *et al.*, 2016), sin sobrecarga de hierro, así como la formación de cataratas en niños. Estas tienen diferentes fenotipos, siendo el más común la catarata bilateral con manchas blancas axiales y periféricas con agregados cristalinos (Chang-Godinich *et al.*, 2001). Generalmente, la aparición de cataratas y síntomas ocurre en la infancia o la adolescencia, con curso progresivo, aunque en ocasiones se detectan accidentalmente en los exámenes oculares de rutina (Craig *et al.*, 2003b). También se han descrito casos en los que los primeros síntomas se evidencian en la adultez (Kaarniranta *et al.*, 2023).

Aunque la hiperferritinemia en este trastorno no suele causar ningún problema de salud aparte de las cataratas, los niveles elevados de ferritina en la sangre pueden confundirse con otras condiciones, como la enfermedad hepática aguda o crónica, el consumo de alcohol, las afecciones inflamatorias sistémicas, las lesiones y las neoplasias malignas (Sandnes *et al.*, 2021). Dado que la HHCS es una enfermedad rara, suele diagnosticarse erróneamente como hemocromatosis hereditaria (HH) debido a la detección de hiperferritinemia, un signo bioquímico común de ambas enfermedades. Esto puede llevar a la administración de tratamientos equivocados, como las venoclisis o las flebotomías, que pueden ser potencialmente perjudiciales para los pacientes con HHCS, ya que terminan provocando anemia ferropénica (Giansily *et al.*, 2013). En este contexto, el objetivo de nuestro estudio fue describir los mecanismos que pueden generar cataratas a partir de modificaciones postraduccionales de la proteína ferritina de cadena ligera.

## Materiales y métodos

### *Modelo de caracterización en bases de datos*

Se usaron las bases de datos del National Center for Biotechnology Information (NCBI) utilizando el código NP\_000137.2, la Uniprot con el código P02792, el OMIM con el # 600886 y la Orphanet con el 163, para caracterizar la proteína ferritina de cadena ligera de tipo salvaje (FTL-wt) en *Homo sapiens* y la mutación con cambio de sentido T30I y recoger la información de base sobre esta mutación, incluida la definición de la enfermedad, el año en la que fue descrita por primera vez, su epidemiología y etiología, etc., lo que permitió una orientación clave sobre la variante.

### *Análisis bioinformático de las variantes proteicas*

Se evaluaron diferentes características de la proteína de tipo salvaje (*Wild Type*) y la variante T30I, incluyendo el análisis de glicosilación, en el programa NetNGlyc 1.0 en el que, a partir de redes neuronales, se predicen los sitios de N-glicosilación. A partir de las secuencias primarias de aminoácidos de cualquier proteína, el *software* NetNGlyc 1.0 permite evaluar la adición de un carbohidrato a la cadena lateral de un residuo de asparagina (Asn). Esta modificación puede afectar el funcionamiento de la proteína, influyendo así en la resistencia a la proteólisis, la estabilidad de la estructura, su vida útil en la circulación y su inmunogenicidad (Gupta & Brunak, 2002).

El programa NetOGlyc 4.0 se utilizó para el análisis de la O-glicosilación a partir de las predicciones de redes neuronales de los sitios de O-glicosilación de la GalNAc de tipo mucina en proteínas de mamíferos ligada a residuos de serina y treonina. En este programa los sitios con puntuaciones > 0,5 se predicen como glicosilados y se catalogan como positivos (Steentoft *et al.*, 2013).

### *Predicción de la fosforilación y activación de las rutas bioquímicas*

El servidor NETPHOS 3.1 se usó para predecir sitios de fosforilación en residuos de serina (S), treonina (T) o tirosinas (Y) susceptibles de fosforilación por diversas quinasas, como la PKC, la PKA, la DNA-PK, la cdc2 y la CKI, entre otras. Cuando el *software* identifica un potencial sitio de fosforilación, pero no logra vincularlo con seguridad a una quinasa específica de su base de datos, etiqueta ese sitio como “unsp”, indicando que se trata de una predicción no específica (Blom *et al.*, 1999). La puntuación de predicción posee un rango entre 0 y 1, en el que las puntuaciones mayores a 0,500 indican predicciones positivas para sitios de fosforilación (Blom *et al.*, 1999, 2004).

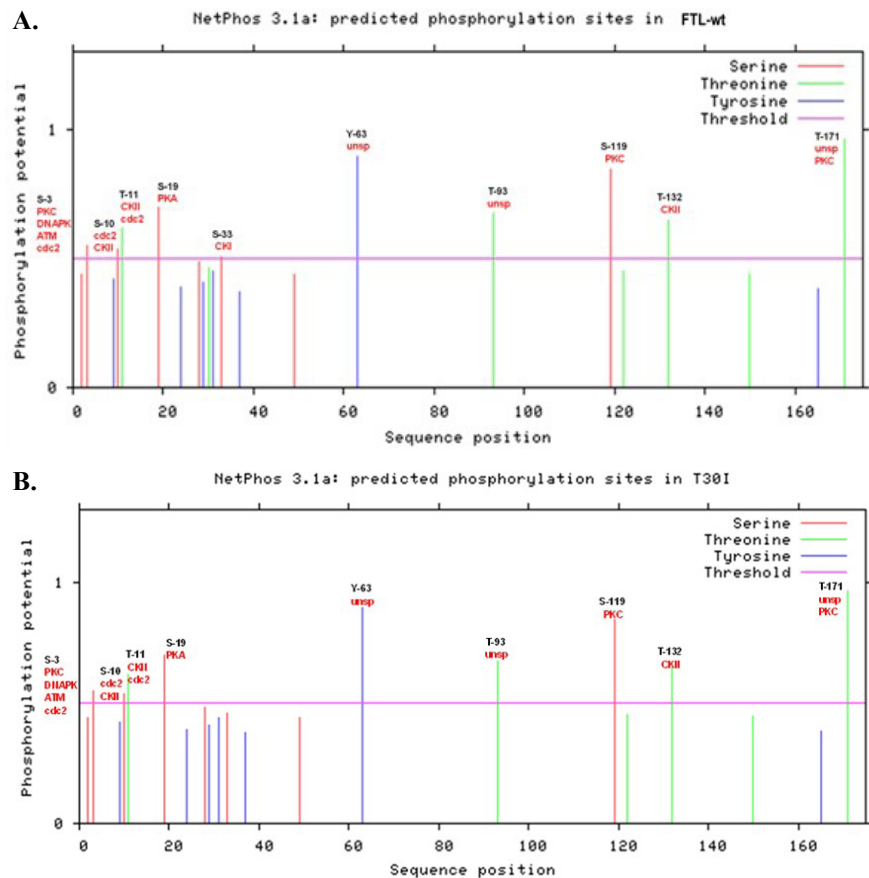
Con base en los resultados obtenidos, se observó un cambio significativo en la ruta metabólica mediada por la quinasa CKI en comparación con la proteína FTL-wt. Por ello, se procedió a analizar esta ruta mediante el programa Reactome Pathway Database, una base de datos biológicos de la infraestructura Elixir y GCBR, la cual proporciona información molecular seleccionada manualmente sobre una amplia gama de procesos biológicos normales y otros relacionados con enfermedades (Fabregat *et al.*, 2018; Milacic *et al.*, 2024).

## Resultados

### *Caracterización bioinformática de la proteína FTL-wt y la mutación con cambio de sentido T30I*

La proteína FTL-wt está compuesta por 175 aminoácidos en su secuencia primaria, y por diez sitios de fosforilación. Entre ellos se destaca la serina 33 (S-33), el cual es reconocido por la quinasa CKI (Figura 2A). En contraste, la mutación con cambio de sentido T30I posee la misma cantidad de aminoácidos, pero solo tiene nueve sitios de fosforilación debido a la ausencia del sitio S-33 fosforilado por la quinasa CKI (Figura 2B).

El análisis de fosforilación consideró la participación de 17 quinasas y se centró en las fosforilaciones plausibles para los residuos de treonina, serina y tirosina, dada la presencia en sus cadenas laterales del grupo funcional hidroxilo, que favorece la fosforilación y regula la activación de rutas de señalización. Este hallazgo indicó que la variante elimina un punto crítico de regulación postraduccional de la proteína.



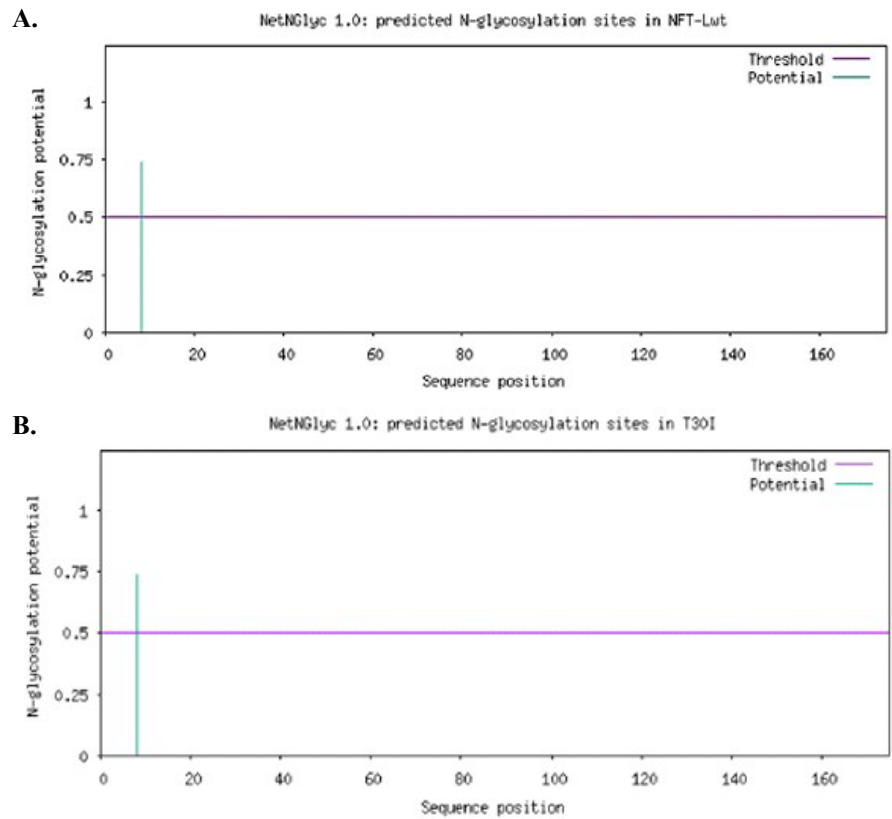
**Figura 2.** Caracterización bioinformática de los sitios de fosforilación hallados mediante el servidor NETPHOS 3.1. Los residuos de serina se muestran en rojo, los de treonina en verde y los de tirosina en azul; la línea horizontal fucsia corresponde al umbral de predicción (*threshold*). El eje “x” representa la posición de los aminoácidos en la secuencia y el eje “y” indica el potencial de fosforilación (0 a 1). **A.** Predicción de sitios de fosforilación para la proteína FTL-wt, donde se destaca el residuo de serina 33 (S-33) como sitio de fosforilación reconocido por la quinasa CKI. **B.** Predicción de sitios de fosforilación para la mutación con cambio de sentido T30I, en la que se observa ausencia del sitio de fosforilación S-33 por la quinasa CKI.

En cuanto al análisis de las N-glicosilaciones, se observó que ambas proteínas presentan resultados similares en la posición 8, una región polar de la secuencia de aminoácidos correspondiente al sitio de glicosilación (NYST). La probabilidad de modificación de la FTL-wt es del 0,7381 (**Figura 3A**), mientras que en la mutación T30I este valor aumenta levemente a 0,7382 (**Figura 3B**), lo que no representa un cambio significativo a nivel bioinformático. Tampoco se identificaron sitios de O-glicosilación en ninguna de las dos proteínas, resultados que se evidencian en la **Tabla 1**.

#### **Activación de rutas bioquímicas**

El análisis de la mutación T30I mostró la pérdida de señal de fosforilación mediada por la quinasa CKI en comparación con la proteína FTL-wt. Este resultado motivó la evaluación de las posibles consecuencias a nivel de rutas de señalización en *Homo sapiens* haciendo uso de la base de datos Reactome (**Figura 4A**). El análisis bioinformático permitió detectar la alteración de algunas vías, entre ellas la vía de señalización por WNT (**Figura 4B**).

En condiciones normales, la quinasa CKI participa en la fosforilación de la  $\beta$ -catenina, proteína que forma parte de un complejo de degradación, lo que conduce a su fosforilación y su posterior degradación controlada. Sin embargo, la ausencia del sitio de fosforilación



**Figura 3.** Caracterización bioinformática de los sitios de N-glicosilación mediante el servidor NetNGlyc 1.0. La línea horizontal púrpura corresponde al umbral de predicción (*threshold*). El eje “x” representa la posición de los aminoácidos en la secuencia y el eje “y” indica el potencial de N-glicosilación. **A.** Modificación postraduccional de N-glicosilación de la proteína FTL-wt. **B.** Mutación postraduccional de N-glicosilación de la mutación T30I.

en la mutación con cambio de sentido T30I afecta este proceso. Como consecuencia, la cascada de señalización Wnt/ $\beta$ -catenina se puede activar de una manera errónea, favoreciendo la acumulación de  $\beta$ -catenina y afectando la homeostasis celular.

En resumen, estos hallazgos sugieren que en la mutación T30I no solo se modifica un sitio puntual de fosforilación, sino que también se afecta de una manera significativa la regulación de la vía Wnt/ $\beta$ -catenina, lo que podría constituir un mecanismo molecular asociado con la aparición de cataratas en la hiperferritinemia hereditaria.

## Discusión

Los niveles elevados de ferritina sérica se presentan en diversas afecciones clínicas; sin embargo, en ausencia de sobrecarga de hierro o inflamación, muchos casos quedan sin explicación (Kannengiesser *et al.*, 2009). En este sentido, se han planteado varias hipótesis que relacionan la hiperferritinemia hereditaria con la presencia de cataratas. Entre ellas se encuentra la propuesta por Brooks *et al.* (2002), quienes plantean que la ferritina se encuentra en el cristalino, cuya función principal, al igual que en otros tejidos, es mantener la homeostasis del hierro. No obstante, se ha postulado que la sobreproducción de L-ferritina podría aumentar el hierro libre y, en consecuencia, las especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que ocasiona daño oxidativo en el cristalino y, por ende, pérdida de transparencia (Brooks *et al.*, 2002). Según Nos *et al.* (2021), sin embargo, esta hipótesis resulta poco convincente dado que la L-ferritina no se une directamente al hierro y, además, el cristalino es pobre en este metal (Nos *et al.*, 2021). La hipótesis más acertada hasta el

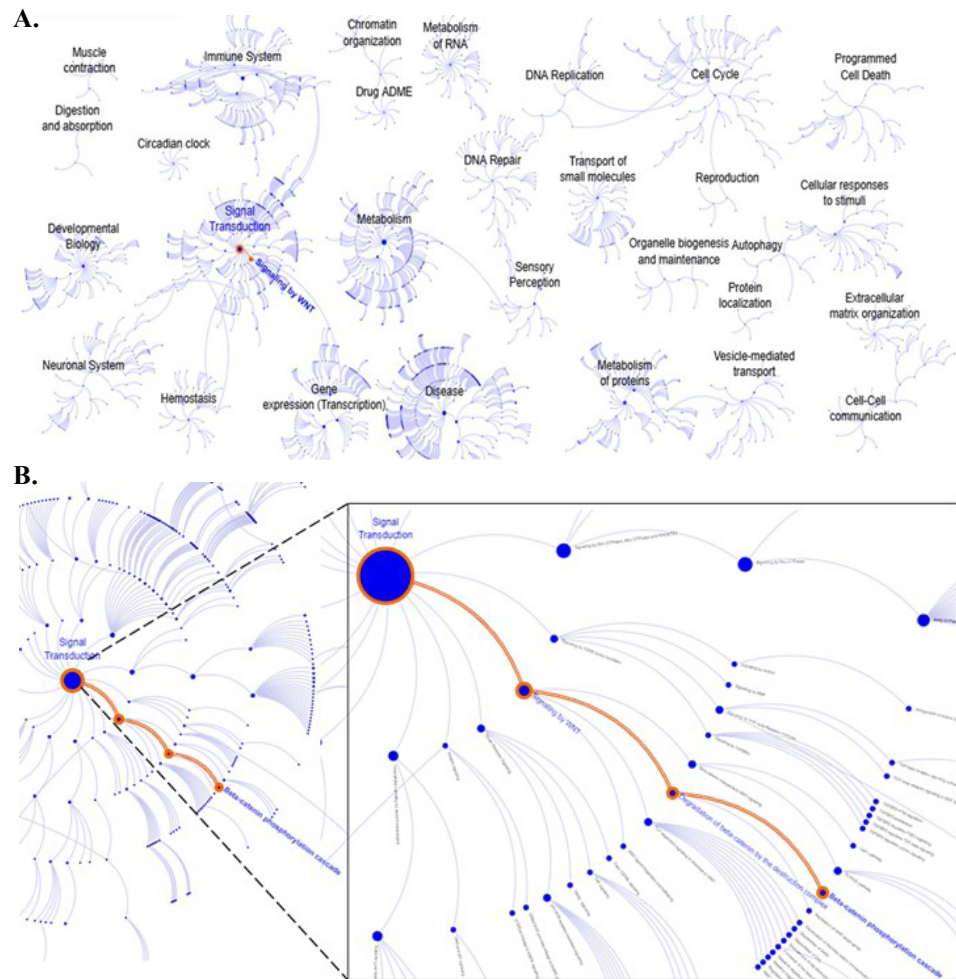
momento sostiene que la acumulación de L-ferritina agregada y pobre en hierro en la corteza del cristalino origina depósitos opacos que difractan la luz y provocan cataratas bilaterales, es decir, cuando el exceso de ferritina se precipita en la corteza del cristalino forma abundantes opacidades puntiformes de color blanco, provocando la difracción de la luz e impidiendo el enfoque correcto, lo que causa cataratas bilaterales que pueden requerir la cirugía como tratamiento principal (Moravikova *et al.*, 2020; Nos *et al.*, 2021).

Si bien se han reportado cambios en la glicosilación de la proteína FTL asociados con la mutación T30I, incluido el sitio de glicosilación en la posición 8 (secuencia NYST) de la cadena polipeptídica, que se caracteriza por la presencia polar de la asparagina (Kannengiesser *et al.*, 2009), en nuestro análisis bioinformático, dichos cambios no fueron significativos (Tabla 1). Este hallazgo contrasta con publicaciones previas, por lo

**Tabla 1.** Comparación de los sitios de fosforilación y glicosilación de la proteína FTL-wt y la mutación con cambio de sentido T30I

Mutación	Número de sitios de fosforilación	Sitios de fosforilación y quinasas	Puntaje de fosforilación	Sitio de N-glicosilación	Sitio de O-glicosilación
Ferritina tipo salvaje	10 sitios de fosforilación	S-3 PKC	0,546	8 NYST 0,7381	No posee sitios de O-glicosilación
		S-3 DNAPK	0,544		
		S-3 ATM	0,540		
		S-3 cdc2	0,520		
		S-10 cdc2	0,537		
		S-10 CKII	0,527		
		T-11 CKII	0,618		
		T-11 cdc2	0,535		
		S-19 PKA	0,694		
		<b>* S-33 CKI</b>	<b>0,504</b>		
		Y-63 unsp	0,893		
		T-93 unsp	0,669		
		S-119 PKC	0,843		
		T-132 CKII	0,646		
		T-171 unsp	0,958		
T-171 PKC	0,601				
T30I	9 sitios de fosforilación	S-3 PKC	0,546	8 NYST <b>0,7382</b>	Sin cambios con el tipo salvaje
		S-3 DNAPK	0,544		
		S-3 ATM	0,540		
		S-3 cdc2	0,520		
		S-10 cdc2	0,537		
		S-10 CKII	0,527		
		T-11 CKII	0,618		
		T-11 cdc2	0,535		
		S-19 PKA	0,694		
		Y-63 unsp	0,893		
		T-93 unsp	0,669		
		S-119 PKC	0,843		
		T-132 CKII	0,646		
		T-171 unsp	0,958		
		T-171 PKC	0,601		

\*: Los cambios en los sitios, las quinasas responsables de la fosforilación y su consiguiente puntuación están resaltados en negrita



**Figura 4.** Caracterización de las rutas metabólicas con la herramienta Reactome utilizando el diagrama de descripción general de la ruta. **A.** Vías metabólicas almacenadas para *Homo sapiens*. **B.** Vía de transducción por fosforilación de la CKI, donde se observa la transducción de señales, la señalización por WNT, la degradación de la beta-catenina por el complejo de destrucción y, ya al finalizar, la cascada de fosforilación de beta-catenina.

que se sugiere que la glicosilación no constituye el eje central de la patogenia en nuestro modelo. En este sentido, la principal contribución de nuestro estudio radica en el análisis de modificaciones postraduccionales alternativas, particularmente la fosforilación.

A partir de nuestros resultados, se constató la pérdida del sitio de fosforilación S-33 en la variante T30I, el cual es reconocido por la quinasa CKI. Este hallazgo es relevante porque la CKI, en conjunto con la GSK-3 (glucógeno sintasa quinasa-3) y el complejo multiproteico integrado por el APC (gen de la poliposis adenomatosa coli supresor de tumores) y la axina, fosforilan cuatro residuos críticos de la  $\beta$ -catenina de serina y treonina (S-33, S-37, T-41 y S-45) de la región amino-terminal de la  $\beta$ -catenina, promoviendo su degradación proteosomal. La pérdida de fosforilación en S-33 puede favorecer la acumulación desregulada de  $\beta$ -catenina, activando de manera aberrante la vía Wnt/ $\beta$ -catenina, la cual desempeña un papel esencial en procesos de desarrollo a través del complejo de transcripción  $\beta$ -catenina–TCF/LEF, tales como la homeostasis, la formación de tejido ocular o el desarrollo de la organogénesis ocular (Amit *et al.*, 2002; Fujimura, 2016). Además, esta desregulación se ha asociado con el cáncer colorrectal, con otras neoplasias malignas e, incluso, con las cataratas (Liu *et al.*, 2002; Fujimura, 2016).

Se propone, entonces, que, más allá de la glicosilación, la alteración en la fosforilación mediada por la quinasa CKI constituye un mecanismo molecular alternativo y potencialmente central en la fisiopatología de la mutación con cambio de sentido T30I. Aunque nuestros resultados se basan en análisis bioinformáticos, ofrecen un marco novedoso que amplía la comprensión de los mecanismos postraduccionales involucrados y sugiere nuevas direcciones experimentales para validar la contribución de la vía de señalización Wnt/ $\beta$ -catenina en la aparición de cataratas en la hiperferritinemia hereditaria.

## Conclusión

La hiperferritinemia con cataratas es una rara enfermedad autosómica dominante a la que se han asociado alrededor de 48 mutaciones. Entre ellas se destaca la mutación con cambio de sentido T30I en la ferritina de cadena ligera. Los estudios computacionales realizados sobre los sitios de O-glicosilación, N-glicosilación y fosforilación revelaron la ausencia de fosforilación en la serina 33 (S-33), un residuo clave en la regulación de la señalización Wnt/ $\beta$ -catenina, proceso fundamental durante el desarrollo ocular. La pérdida de esta fosforilación afecta la estabilidad y estructura de la FTL-wt, favoreciendo la agregación y formación de opacidades en el cristalino, dando lugar a diferentes malformaciones oculares. En particular, dicha pérdida podría explicar la aparición de las cataratas bilaterales en pacientes portadores de esta mutación. En este contexto, la fosforilación de residuos críticos como la S-33 resulta esencial para mantener la función normal de la proteína y prevenir la formación de agregados proteicos anormales. Este estudio representa una aproximación preliminar para comprender, desde una perspectiva bioquímica y bioinformática, el efecto de variantes genéticas como la T30I en la fisiopatología de la hiperferritinemia con cataratas.

## Agradecimientos

A la Universidad de Antioquia y su grupo de Genética Molecular (GenMol), al grupo de Neurociencias de Antioquia (GNA) y al Grupo de Investigación en Producción, Desarrollo y Transformación Agropecuaria GIPDTA de la Corporación Universitaria Lasallista.

## Contribuciones de los autores

**M.G.H, A.S-O y A.V.L.:** contribución a la modelación y simulación de datos y su análisis e interpretación. **M.G.H:** redacción del manuscrito. **A.S-O y A.V.L.:** contribución a la orientación del estudio. **A.S.-O. y A.V.L.:** revisión crítica del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores no declaran ningún conflicto de intereses.

## Consideraciones éticas

Este trabajo no involucró a sujetos humanos ni animales en su desarrollo.

## Financiación

Grupo de Genética Molecular (GenMol), Grupo de Neurociencia de Antioquia (GNA) y Grupo de Ingeniería de Alimentos - Grial de la Corporación Universitaria Lasallista.

## Referencias

- Amit, S., Hatzubai, A., Birman, Y., Andersen, J. S., Ben-Shushan, E., Mann, M., Ben-Neriah, Y., Alkalay, I.** (2002). Axin-mediated CKI phosphorylation of  $\beta$ -catenin at Ser 45: a molecular switch for the Wnt pathway. *Genes & Development*, 16(9), 1066-1076. <https://doi.org/10.1101/GAD.230302>
- Beaumont, C., Leneuve, P., Devaux, I., Scoazec, J. Y., Berthier, M., Loiseau, M. N., Grandchamp, B., Bonneau, D.** (1995). Mutation in the iron responsive element of the L ferritin mRNA in a family with dominant hyperferritinaemia and cataract. *Nature Genetics*, 11(4), 444-446. <https://doi.org/10.1038/NG1295-444;KWRD>

- Blom, N., Gammeltoft, S., Brunak, S.** (1999). Sequence- and structure-based prediction of eukaryotic protein phosphorylation sites. *Journal of Molecular Biology*, 294(5), 1351-1362.
- Blom, N., Sicheritz-Ponten, T., Gupta, R., Gammeltoft, S., Brunak, S.** (2004). Prediction of post-translational glycosylation and phosphorylation of proteins from the amino acid sequence. *Proteomics*, 4(6), 1633-1649.
- Brooks, D., Todorova, K., Farmer, J., Lobmayr, L., Wilson, R., Eagle, R.** (2002). Ferritin Crystal Cataracts in Hereditary Hyperferritinemia Cataract Syndrome. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 43(4), 1121-1126. <https://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2200177>
- Carrillo-Esper, R., Peña-Pérez, C., Zepeda-Mendoza, A. D., Meza-Márquez, J. M., Neri-Maldonado, R., Meza-Ayala, C. M., Carrillo-Córdova, D. M., Carrillo-Córdova, C. A.** (2015). Ferritina y síndrome hiperferritinémico. Su impacto en el enfermo grave; conceptos actuales. *Revista de La Asociación Mexicana de Medicina Critica y Terapia Intensiva*, 29(3), 157-166. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rammcti/v29n3/v29n3a6.pdf>
- Chang-Godinich, A., Ades, S., Schenkein, D., Brooks, D., Stambolian, D., Raizman, M. B.** (2001). Lens changes in hereditary hyperferritinemia-cataract syndrome. *American Journal of Ophthalmology*, 132(5), 786-788. [https://doi.org/10.1016/S0002-9394\(01\)01106-0](https://doi.org/10.1016/S0002-9394(01)01106-0)
- Craig, J., Clark, B., McLeod, J., Kirkland, M., Grant, G., Elder, J., Toohey, M., Kowal, L., Savoia, H., Chen, C., Roberts, S., Wirth, G., Mackey, D.** (2003a). Hereditary Hyperferritinemia-Cataract Syndrome: Prevalence, Lens Morphology, Spectrum of Mutations, and Clinical Presentations. *Archives of Ophthalmology*, 121(12), 1753-1761. <https://doi.org/10.1001/ARCHOPHT.121.12.1753>
- Craig, J., Clark, J. B., McLeod, J., Kirkland, M., Grant, G., Elder, J., Toohey, M., Kowal, L., Savoia, H., Chen, C., Roberts, S., Wirth, M. G., Mackey, D.** (2003b). Hereditary Hyperferritinemia-Cataract Syndrome: Prevalence, Lens Morphology, Spectrum of Mutations, and Clinical Presentations. *Archives of Ophthalmology*, 121(12), 1753-1761. <https://doi.org/10.1001/ARCHOPHT.121.12.1753>
- Elsayed, M. E., Sharif, M. U., Stack, A. G.** (2016). Transferrin Saturation: A Body Iron Biomarker. *Advances in Clinical Chemistry*, 75, 71-97. <https://doi.org/10.1016/BS.ACC.2016.03.002>
- Eris, T., Yanik, A. M., Demirtas, D., Yilmaz, A. F., Toptas, T.** (2023). Hereditary Hyperferritinemia-Cataract Syndrome in a Family With HFE-H63D Mutation. *Cureus*, 15(3), e36253. <https://doi.org/10.7759/CUREUS.36253>
- Fabregat, A., Korninger, F., Viteri, G., Sidiropoulos, K., Marin-Garcia, P., Ping, P., Wu, G., Stein, L., D'Eustachio, P., Hermjakob, H.** (2018). Reactome graph database: Efficient access to complex pathway data. *PLoS Computational Biology*, 14(1), e1005968. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PCBI.1005968>
- Fujimura, N.** (2016). WNT/ $\beta$ -catenin signaling in vertebrate eye development. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 4(NOV), 221674. <https://doi.org/10.3389/FCELL.2016.00138/BIBTEX>
- Giansily-Blaizot, M., Cunat, S., Moulis, G., Schved, J. F., Aguilar-Martínez, P.** (2013). Homozygous mutation of the 5'UTR region of the L-Ferritin gene in the hereditary hyperferritinemia cataract syndrome and its impact on the phenotype. *Haematologica*, 98(4), e43. <https://doi.org/10.3324/HAEMATOL.2012.077198>
- Girelli, D., Ouvieri, O., Franceschi, L. De, Corrocher, R., Bergamaschi, G., Cazzola, M.** (1995). A linkage between hereditary hyperferritinaemia not related to iron overload and autosomal dominant congenital cataract. *British Journal of Haematology*, 90(4), 931-934. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2141.1995.TB05218.X>
- Gómez-Hernández, M., Soto-Ospina, A., Osorio, C. A., Villegas-Lanau, A.** (2024). Structural Analysis of Variants of the Ferritin Light Chain Protein and Its Relationship with Neuroferritinopathy. *ACS Chemical Neuroscience*, 15(24), 4402-4417. <https://doi.org/10.1021/ACSCHENNEURO.4C00400>
- Gupta, R. & Brunak, S.** (2002). Prediction of glycosylation across the human proteome and the correlation to protein function. *Pacific Symposium on Biocomputing*, 2002, 310-322.
- Iqbal, H., Yang, T., Li, T., Zhanga, M., Ke, H., Ding, D., Deng, Y., Chen, H.** (2021). Serum protein-based nanoparticles for cancer diagnosis and treatment. *Journal of Controlled Release*, 329, 997-1022. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.030>
- Kaarniranta, K., Zin, O. A., Neves, L. M., Cunha, D. P., Motta, F. L., Agonigi, B. N. S., Horovitz, D. D. G., Almeida, D. C., Malacarne, J., Paula, A., Rodrigues, S., Carvalho, A. B., Rivello, C. A., Espariz, R., Zin, A. A., Sallum, J. M. F., Vasconcelos, Z. F. M., Br**

- A. Z.** (2023). Genotypic-Phenotypic Correlations of Hereditary Hyperferritinemia-Cataract Syndrome: Case Series of Three Brazilian Families. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15). <https://doi.org/10.3390/ijms241511876>
- Kannengiesser, C., Jouanolle, A. M., Hetet, G., Mosser, A., Muzeau, F., Henry, D., Bardou-Jacquet, E., Mornet, M., Brissot, P., Deugnier, Y., Grandchamp, B., Beaumont, C.** (2009). A new missense mutation in the L ferritin coding sequence associated with elevated levels of glycosylated ferritin in serum and absence of iron overload. *Haematologica*, 94(3), 335-339. <https://doi.org/10.3324/HAEMATOL.2008.000125>
- Khan, M. A., Mohammad, T., Malik, A., Hassan, M. I., Domashevskiy, A. V.** (2023). Iron response elements (IREs)-mRNA of Alzheimer's amyloid precursor protein binding to iron regulatory protein (IRP1): a combined molecular docking and spectroscopic approach. *Scientific Reports*, 13(1), 1-17. <https://doi.org/10.1038/S41598-023-32073-X;SUBJMETA>
- Lachlan, K. L., Temple, I. K., Mumford, A. D.** (2004). Clinical features and molecular analysis of seven British kindreds with hereditary hyperferritinaemia cataract syndrome. *European Journal of Human Genetics* 2004 12:10, 12(10), 790-796. <https://doi.org/10.1038/sj.ejhg.5201252>
- Liu, C., Li, Y., Semenov, M., Han, C., Baeg, G. H., Tan, Y., Zhang, Z., Lin, X., He, X.** (2002). Control of  $\beta$ -catenin phosphorylation/degradation by a dual-kinase mechanism. *Cell*, 108(6), 837-847. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(02\)00685-2](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(02)00685-2)
- Milacic, M., Beavers, D., Conley, P., Gong, C., Gillespie, M., Griss, J., Haw, R., Jassal, B., Matthews, L., May, B., Petryszak, R., Ragueneau, E., Rothfels, K., Sevilla, C., Shamovsky, V., Stephan, R., Tiwari, K., Varusai, T., Weiser, J., ... D'Eustachio, P.** (2024). The Reactome Pathway Knowledgebase 2024. *Nucleic Acids Research*, 52(D1), D672-D678. <https://doi.org/10.1093/NAR/GKAD1025>
- Moravikova, J., Honzik, T., Jadvidzakova, E., Zdrahalova, K., Kremlíkova Pourova, R., Korbasova, M., Liskova, P., Dudakova, L.** (2020). Hereditary hyperferritinemia-cataract syndrome in three Czech families: molecular genetic testing and clinical implications. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 24(6), 352.e1-352.e5. <https://doi.org/10.1016/J.JAAPOS.2020.07.014>
- Neves, J., Haider, T., Gassmann, M., Muckenthaler, M. U.** (2019). Iron Homeostasis in the Lungs—A Balance between Health and Disease. *Pharmaceuticals*, 12(1), 5. <https://doi.org/10.3390/PH12010005>
- Nos, F., Hernández, G., Ferrer, X., Hernandez, I., Navarro, B., Fuster, J. L., Cortés, M. B., Pérez, S., Tornador, C., Sánchez, M.** (2021). Hereditary hyperferritinemia cataract syndrome: Ferritin I gene and physiopathology behind the disease—report of new cases. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 5451. <https://doi.org/10.3390/IJMS22115451/S1>
- Sandnes, M., Ulvik, R. J., Vorland, M., Reikvam, H.** (2021). Hyperferritinemia—A Clinical Overview. *Journal of Clinical Medicine*, 10(9), 2008. <https://doi.org/10.3390/JCM10092008>
- Stentoft, C., Vakhrushev, S., Joshi, H., Kong, Y., Vester-Christensen, M., Schjoldager, K., Lavrsen, K., Dabelsteen, S., Pedersen, N., Gupta, R., Bennett, E., Mandel, U., Brunak, S., Wandall, H., Levery, S., Clausen, H.** (2013). Precision mapping of the human O-GalNAc glycoproteome through SimpleCell technology. *EMBO J*, 32(10), 1478-1488.
- Torti, F. M. & Torti, S. V.** (2002). Regulation of ferritin genes and protein. *Blood*, 99(10), 3505-3516. <https://doi.org/10.1182/BLOOD.V99.10.3505>
- Yang, Y., Lin, T., Kuang, P., Chen, X.** (2021). Ferritin L-subunit gene mutation and hereditary hyperferritinaemia cataract syndrome (HHCS): a case report and literature review. *Hematology (United Kingdom)*, 26(1), 896-903. <https://doi.org/10.1080/16078454.2021.1995111>

Original article

## AI-Guided Discovery of Chiral Kagome Materials: Linking Wyckoff Symmetry, Oxidation States, and Electronic Topology

### Descubrimiento asistido por IA de materiales Kagome quirales: relación entre simetría de Wyckoff, estados de oxidación y topología electrónica

 Aldo H. Romero

Department of Physics and Astronomy, West Virginia University, Morgantown, USA

Inaugural article as correspondent member of the Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

#### Abstract

We present a systematic screening of binary compounds crystallizing in chiral space group  $P6_22$ , targeting candidate chiral Kagome metals. By combining Wyckoff-resolved site analysis with Shannon ionic radii and oxidation states, we link atomic size/valence to preferred Wyckoff positions—especially the  $3d$  site that forms Kagome planes. Across  $>300$  structures, smaller cations favor the  $3d$  site, while larger ions occupy peripheral sites ( $3c$ ,  $6j$ ). Contrasting Ca- vs. Ir-based prototypes reveal divergent magnetic ground states and distinct spin-orbit responses despite identical symmetry, underscoring how local coordination governs electronic topology. These results provide design rules for engineering new chiral Kagome materials that rival canonical systems such as  $Fe_3Sn_2$  and  $CoSn$ .

**Keywords:** Kagome, chirality, Wyckoff positions, topological materials, machine learning.

#### Resumen

En este paper presentamos una búsqueda sistemática de compuestos binarios que cristalizan en el grupo espacial quiral  $P6_22$  con el objetivo de identificar nuevos metales Kagome quirales. Mediante la combinación de un análisis de posiciones de Wyckoff con radios iónicos de Shannon y estados de oxidación, establecemos correlaciones entre el tamaño atómico, la valencia y la ocupación preferencial de sitios cristalográficos, particularmente del sitio  $3d$  que forma las redes Kagome. El análisis de más de 300 estructuras revela que los cationes de menor tamaño tienden a ocupar preferentemente las posiciones  $3d$ , mientras que los iones de mayor tamaño se ubican en sitios periféricos ( $3c$ ,  $6j$ ). Los prototipos basados en calcio e iridio exhiben estados magnéticos diferenciados y respuestas contrastantes al acoplamiento espín-órbita, a pesar de compartir la misma simetría cristalina, lo cual evidencia el papel determinante de la coordinación local en la topología electrónica resultante. Estos hallazgos proporcionan principios de diseño fundamentales para la síntesis dirigida de nuevos materiales Kagome quirales con propiedades comparables a las de  $Fe_3Sn_2$  y  $CoSn$ .

**Palabras clave:** Kagome, quiralidad, posiciones de Wyckoff, materiales topológicos, aprendizaje automático.

#### Introduction

Advances in quantum computing, neuromorphic logic, and low-loss photonics all hinge on discovering crystals whose electronic or magnetic ground states are finely tuned by symmetry (Newham, 2004; Powell & Powell, 2010; Prakash & Wei, 2014). In theory, that structural search for three dimensional materials reduces to a combinatorial exercise: populate the Wyckoff positions of the 230 space groups with atomic species, generate a metrically valid lattice, then ask whether the resulting structure is both chemically

**Citation:** Romero AH. AI-Guided Discovery of Chiral Kagome Materials: Linking Wyckoff Symmetry, Oxidation States, and Electronic Topology. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):714-727, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3256>

**Editor:** Jairo Roa Rojas

**Corresponding autor:**  
Aldo Humberto Romero Castro;  
[correo@correo.edu.co](mailto:correo@correo.edu.co)

**Received:** July 16, 2025

**Accepted:** August 14, 2025

**Published on line:** October 14, 2025



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

sensible and energetically competitive. Classical enumerators such as PyXtal already automate the first step (Fredericks *et al.*, 2021), inserting sites one Wyckoff position at a time and rejecting duplicates by group–subgroup checks (Ivantchev *et al.*, 2000). Recent generators—including WyFormer (Kazeev *et al.*, 2025) and WyCryst—package (Zhu *et al.*, 2024) the same symmetry rules inside artificial intelligence (AI) deep generative models, compressing a unit cell into a few dozen discrete tokens and ensuring that every candidate obeys its parent space-group operations by construction.

The bottleneck is no longer the enumeration itself, but the rate at which those candidates can be triaged once cell sizes climb to 40–60 atoms. A brute-force density-functional-theory (DFT) relaxation of that many heavy cells would stall even on a national supercomputer. Two large-scale efforts have shown how machine learning removes the choke-point. DeepMind’s GNoME couples graph-neural-network (GNN) surrogates to on-the-fly DFT (Merchant *et al.*, 2023); the surrogate filters roughly twenty million symmetry-compliant inputs per day and schedules only the top fraction for ab-initio confirmation, ultimately identifying 381,000 new hull-stable compounds. At the same time, major initiatives like the ALEXANDRIA project, led by M.A.L. Marques at Ruhr-Universität Bochum, are using artificial intelligence to accelerate materials discovery. ALEXANDRIA has performed over five million full quantum mechanical simulations using density functional theory (DFT), a standard method for calculating the energy and atomic structure of materials (Schmidt *et al.*, 2024). To identify promising new materials, the project uses a specialized machine learning model called a crystal-graph attention network, which predicts whether a structure is likely to be stable by comparing its energy to that of the most stable known phases—a reference known as the convex hull. Remarkably, this method maintains an energy accuracy within 0.1 eV per atom of the convex hull, even for large and complex structures containing up to fifty atoms (Schmidt *et al.*, 2024).

Independent benchmarks, such as the NIST JARVIS-Leaderboard, confirm the accuracy of related models like ALIGNN (Atomistic Line Graph Neural Networks), which are trained on the same data infrastructure. These models now predict formation energies with mean absolute errors below 20 meV per atom and can be executed in milliseconds from within a standard Python notebook (Choudhary *et al.*, 2020, 2024; M. Liu & Meng, 2024). While ALEXANDRIA is among the largest efforts of its kind, many other groups are developing similar AI-driven tools for materials design.

In the methodology reported here, we merge those ingredients—explicit Wyckoff enumeration, lattice feasibility checks, and a light-weight GNN surrogate—into a workflow that can vet roughly thousands of 40–60-atom prototypes each day on a single eight-GPU node. First, space-group templates are drawn from the International Tables and populated stochastically; steric filters as implemented in PyXtal eliminate (Fredericks *et al.*, 2021).

Next, a transfer-learned ALIGNN model scores the raw structures for enthalpy and electronic gap; only the top decile proceeds to full relaxation. Finally, a small self-consistent DFT loop, parallelised over CPUs, validates the survivors and feeds new data back into the training pool, an approach analogous to the active-learning schemes reviewed for universal machine-learning interatomic potentials (uMLIPs), we have used the M3Gnet model (C. Chen & Ong, 2022).

The message from this paper is straightforward: crystallographic symmetry collapses an astronomically large search space into a tractable library of Wyckoff graphs; modern graph networks supply the speed to explore that library at industrial scale. By leveraging both, our pipeline delivers chemically diverse, symmetry-correct crystal candidates at a rate that aligns with daily HPC allocations. To demonstrate the workflow, we decided to search over a small binary family over the so-called Kagome lattices.

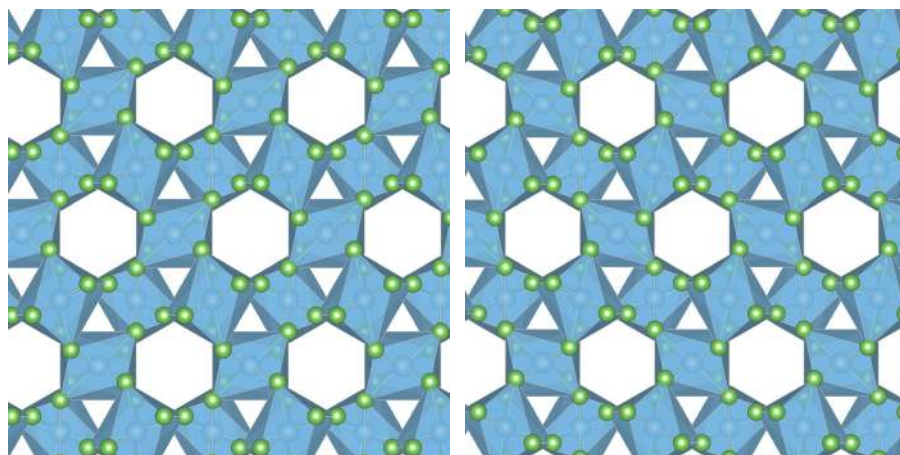
A Kagome lattice is a two-dimensional web of corner-sharing triangles. Despite its simplicity, this structure is a hotbed of complexity: it frustrates magnetic order, supports flat electronic bands, and gives rise to quantum phenomena such as Dirac and Weyl fermions, correlated magnetism, and unconventional superconductivity (Wang *et al.*, 2024; Yin *et al.*, 2022). As researchers increasingly combine artificial intelligence with quantum

physics, the Kagome lattice stands out as a powerful testbed. This lattice—named after the traditional Japanese basket-weaving pattern meaning “basket-eye” (kago = basket, me = eye)—has a rich history rooted in both mathematics and physics. The term was coined by Kōji Husimi in the early 1950s (Mekata, 2003), inspired by the trihexagonal tiling seen in Japanese baskets. Its structure—a 2D network of corner-sharing triangles and hexagons—had been known since at least Kepler (1619), who described it as part of uniform plane tilings (a network with the  $(3.6)^2$  Archimedes tiling). In the 1950s and 1970s, the Kagome lattice became a key model for geometrical frustration in magnetic systems, revealing a wealth of potential ground states. It was first studied as an idealized platform to understand frustrated magnetism and nontrivial spin arrangements, with foundational models explored by A. Yoshimori, Kaplan, Elliott, Wannier, and Toulouse (Elliott, 1961; Kaplan, 1961; Toulouse, 2008; Wannier, 1950; Yoshimori, 1959).

In 2D materials, this lattice geometry has garnered considerable attention for its ability to host exotic quantum phenomena such as flat bands, Dirac cones, and topological edge states. Prototypical examples include  $\text{Fe}_3\text{Sn}_2$ , which exhibits anomalous Hall effects and massive Dirac fermions (Ye *et al.*, 2018), and  $\text{CoSn}$ , where Dirac-like dispersions and nodal lines emerge due to the symmetry of the Kagome net (Z. Liu *et al.*, 2020). These 2D systems are often treated as layered structures with quasi-2D electron transport, limiting their tunability along the out-of-plane direction. In contrast, three-dimensional (3D) Kagome lattices extend this geometry into a fully interconnected network across all three spatial dimensions, offering a much richer playground for emergent quantum states. 3D Kagome structures can preserve the essential features of their 2D counterparts—such as geometric frustration and Dirac-like crossings—while enabling enhanced structural flexibility, anisotropic bonding, and the possibility of non-symmorphic symmetry elements, such as screw axes and glide planes, that are absent in 2D layers. These features can stabilize a broader array of magnetic orders, topological semimetals, and chiral spin textures. Notably, compounds like  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  (hexagonal, noncollinear antiferromagnet) and  $\text{AV}_3\text{Sb}_5$  (where A = K, Rb, Cs) (Nakatsuji *et al.*, 2015; Ortiz *et al.*, 2020) exhibit charge density waves, unconventional superconductivity, and intertwined orders arising from 3D Kagome connectivity. The enhanced chemical and crystallographic flexibility of 3D Kagome frameworks also makes them ideal for exploring structure-property relationships, especially in chiral space groups such as  $\text{P6}_22$ , where symmetry-enforced constraints can be exploited for band engineering, topological design, and spin-orbit-driven phenomena. This motivates the search for new 3D Kagome compounds using data-driven and symmetry-aware approaches, such as the one proposed in this study.

On the other hand, some crystal materials are “handed” in the same way a left hand differs from a right. When their atoms line up in a pattern called a chiral lattice (one example is labeled  $\text{P6}_22$  in crystal symmetry notation), the arrangement cannot be flipped or mirrored to look the same—there is no built-in plane of symmetry (see, for example, an enantiomeric crystal pair in Figure 1). That subtle lack of mirror-image symmetry can have outsized consequences: it lets the material twist light, host exotic electronic states, and even mimic the way biological molecules distinguish left from right (Bousquet *et al.*, 2024). Because such chiral fabrics are rare in nature, uncovering new ones is a high-value goal for materials discovery. Introducing chirality—an intrinsic sense of “handedness” in a crystal—unlocks a class of remarkable quantum behaviors that aren’t possible in ordinary, symmetric materials. First, it can stabilize Weyl fermions, emergent particles that act like massless electrons with a built-in directionality. These exotic excitations behave like tiny sources and sinks of a field known as Berry curvature, which captures how an electron’s wavefunction twists through the material’s structure (Zhang *et al.*, 2021). This built-in “twistiness” leads to topological surface states—unique electronic pathways known as Fermi arcs—that appear only on the material’s surfaces and can channel electrons in ways that are highly resistant to scattering (Hasan *et al.*, 2017). Such effects do not occur in conventional (non-chiral) systems. In simpler terms, chirality in

### Enantiomeric Crystal pair



**Figure 1.** Enantiomeric pair of TiAs structures crystallizing in chiral space groups: left, space group 180; right, space group 181. Both structures share the same stoichiometry and atomic configuration—blue spheres represent Ti atoms, and green spheres represent As atoms—but differ in their crystallographic handedness. The mirror asymmetry between the two structures arises from the opposite screw axes defining each space group, highlighting the emergence of structural chirality even in achiral compositions.

a crystal lattice is like giving it a built-in bias or fingerprint that forces electrons to act differently. The result is emergent quantum behaviors—Weyl particles, hidden “twisted” fields, and special surface highways—that could lead to new low-loss electronics, unusual magnetic or optical effects, and components that behave differently for left- or right-handed crystals (important for sensing or information processing) (Hasan *et al.*, 2021; You *et al.*, 2023). Now, our application for the workflow presented here is to apply it to a family where there is a small number of materials reported, those which are chiral but also can host Kagome lattices in the atomic motif. Chirality itself also extends to lattice dynamics. Non-centrosymmetric structures support chiral phonon modes that carry angular momentum, which can couple to spin degrees of freedom and give rise to phonon-driven spin transport or magneto-phononic phenomena (H. Chen *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022). Moreover, structural enantiomorphs in  $P6_222$  vs.  $P6_422$  offer a natural platform to explore chiral-selective effects such as circular dichroism and magnetochiral anisotropy—critical in nonlinear optics and spintronics (Bousquet *et al.*, 2024).

Among chiral space groups,  $P6_222$  (No. 180) is particularly versatile due to its rich set of symmetry-defined atomic sites known as Wyckoff positions Tasci *et al.*, 2012. Of the eleven available, four positions—3a, 3b, 3c, and 3d—each form a triangular arrangement that individually supports the geometry of a Kagome lattice. In other words, placing atoms in any one of these positions is enough to generate the Kagome pattern, making this space group especially valuable for designing such lattices in chiral materials. This structural flexibility allows researchers to finely control a material’s composition and internal order. By assigning different atomic species to two or three positions, one can tune the stoichiometry, tailor bonding environments, and engineer functional networks—such as magnetic or conductive pathways. Compared to other chiral groups,  $P6_222$  offers a significantly broader design space (Bousquet *et al.*, 2024). Its multiple interchangeable sites enable the creation of materials with customizable electronic, magnetic, and topological properties, making it a fertile ground for discovering new functional crystals.

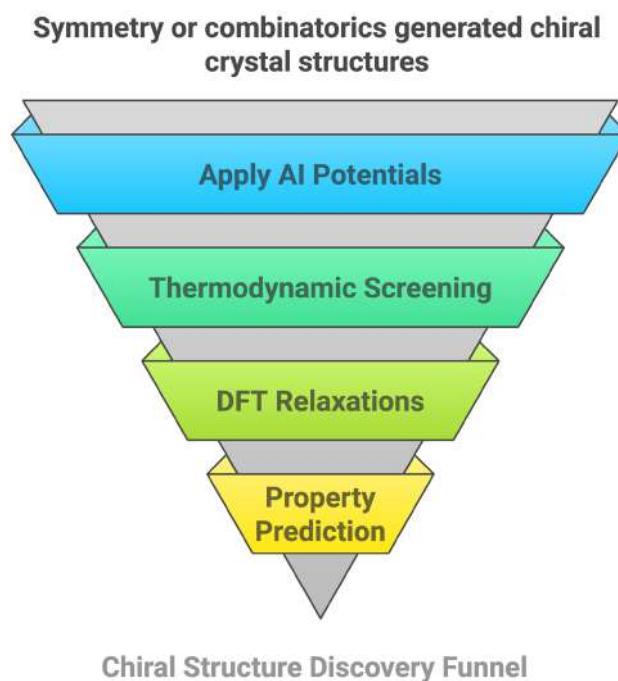
A key challenge in designing chiral Kagome materials is choosing the right chemical building blocks. In this study, we restrict our search to binary compounds made from elements up to bismuth (Bi) in the periodic table, focusing specifically on structures

where the 3d Wyckoff position in space group  $P6_322$  is occupied—sufficient on its own to generate the Kagome lattice motif. Future work will expand this approach to explore other Wyckoff positions and more complex ternary compositions. An additional critical factor is the oxidation state, which governs charge balance and electron filling. Stable Kagome structures often depend on precise electron counts; imbalances can disrupt the lattice or suppress quantum effects (Saini, 2023; Zhou *et al.*, 2024). For this purpose, we considered all reported oxidation states available from the **Los Alamos database Laboratory**, 2025. Notably, early transition metals bring partially filled d-orbitals, which are crucial for magnetism and correlation-driven topological phases (Negi *et al.*, 2025; Yin *et al.*, 2022).

Our goal is to open a pathway toward the discovery of new materials that merge geometric frustration, chirality, and topological order—a combination at the core of next-generation quantum materials for applications in spintronics, low-power electronics, and quantum information science.

## Methodology

The methodology used in this work for the high-throughput discovery of topological quantum materials can be broadly divided into three main phases: (1) structure generation and enumeration, (2) AI-assisted structural relaxation and energy prediction, and (3) property evaluation and final validation, as summarized in **figure 2**. In the first phase, we target a specific crystallographic space group—space group 180 ( $P6_322$ )—which is chiral and features multiple unique Wyckoff positions (notably 3a–3d), making it ideal for constructing structurally diverse Kagome-like lattices. For each selected combination of atomic species, we go through all possible stoichiometries and ways the atoms could be placed on Wyckoff positions. We use two main rules: (1) no two species can be placed on the same Wyckoff position, and (2) a species can be placed on more than one Wyckoff



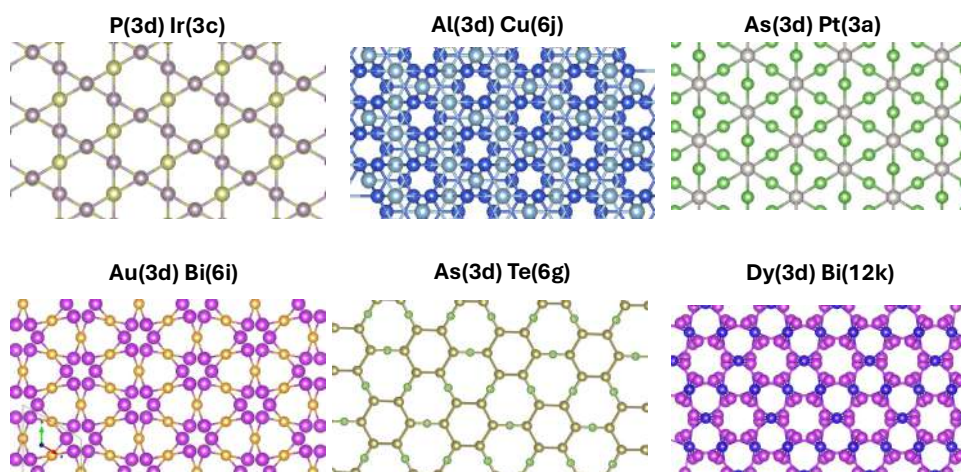
**Figure 2.** Chiral structure discovery funnel used in this study. The process begins with chiral crystal structures generated through symmetry analysis or combinatorial enumeration. These candidate structures are first filtered using fast surrogate models based on AI interatomic potentials. Surviving structures undergo thermodynamic screening to assess their proximity to the convex hull. Promising candidates are then subject to full DFT relaxations for

position. While doing this, we also check for basic chemical rules, like making sure the oxidation states are balanced and the ionic sizes make sense together. These checks help us avoid unrealistic structures. In future work, we plan to relax these two rules to explore a wider range of possible structures.

To ensure the presence of a Kagome lattice, we explicitly place at least one atomic species on the 3d Wyckoff position in each selected chiral space group. The remaining atoms are distributed across other symmetry-allowed Wyckoff sites in the same space group, respecting site multiplicities and chemical valence considerations. Each assignment is treated combinatorially, producing a broad set of candidate prototype structures. For Wyckoff sites with free positional parameters, coordinates are sampled randomly within physically plausible bounds. To prevent unphysical structures, we enforce interatomic distance constraints, requiring all atom pairs to fall within  $0.8 \times$  to  $2 \times$  the sum of their van der Waals radii. This constraint avoids both steric clashes and unrealistically sparse packing. Through this procedure, we generate a diverse set of candidate chiral Kagome materials that preserve symmetry, maintain chemical plausibility, and span a broad range of structural motifs.

**Figure 3** presents a small set of these symmetry-limited prototypes, showcasing six chiral structures generated within space group 180, each featuring the Kagome arrangement. The illustration emphasizes the variety in Wyckoff positions present in this space group and chemical compositions that arise from the automated enumeration method, highlighting how minor changes in site designation, chemical species or ionic radius can produce unique Kagome structures. The visualized prototypes illustrate the structural landscape sampled during our AI-assisted screening and confirm that the pipeline reliably maintains chirality and Kagome connectivity across various chemistries, where the three fold coordination is maintained by the selected species.

In the second phase, artificial intelligence is used to dramatically reduce computational costs during geometry optimization. Instead of relying entirely on density functional theory (DFT)—which is highly accurate but computationally expensive—we follow the approach of our previous publications, where we apply the universal neural network interatomic potentials M3GNet to relax initial structures. This machine-learned potential is trained on large databases of materials and can predict interatomic forces with good accuracy. Once applied, the crystal structures move closer to their energetic minima. The structures that are predicted to be unstable or far from equilibrium are discarded early, allowing resources to be concentrated on promising candidates.



**Figure 3.** Chiral structure with space group number 180 in a Kagome configuration. These six structures are over the convex hull, atomic compositions and Wyckoff positions are included per each structure.

Once the initial atomic relaxation of a structure is done, we apply a second stage of AI tools to assess how stable each material is. Specifically, we estimate the formation energy, which tells us how likely it is for a material to form from its constituent elements, and we calculate its distance to the convex hull—a widely used thermodynamic metric that indicates whether a material is more or less stable than any possible combination of other known compounds (Jain *et al.*, 2020). If a structure lies on or near this convex hull, it means it is unlikely to break apart into simpler phases and is therefore a strong candidate for experimental synthesis. To make these predictions efficiently, we use machine learning models such as CGCNN (Crystal Graph Convolutional Neural Networks) and similar graph-based algorithms Xie and Grossman, 2018. These models treat each material as a network of atoms and bonds, allowing them to learn complex relationships between structure and stability. By relying on these AI-driven surrogate models instead of more computationally intensive quantum mechanical calculations like DFT (Density Functional Theory), we can evaluate millions of hypothetical materials in a matter of weeks rather than several months or years. At this stage, we can also use AI models trained on large materials databases to predict important electronic properties—such as whether the material is metallic or insulating (band gap), whether it might exhibit topological behavior, or whether it could be magnetic. This allows us to rapidly identify the most promising candidates for further, more detailed study.

Finally, only the most promising candidate structures—typically those with formation energies on or within 10 meV/atom of the convex hull—are selected for full DFT relaxation and detailed characterization. For this step, we employed the VASP electronic structure package Kresse and Furthmüller, 1996; Kresse and Hafner, 1993. Electrons were treated using ultrasoft pseudopotentials (Kresse & Hafner, 1994; Kresse & Joubert, 1999), and for each structure, we performed energy cutoff and k-point mesh convergence to ensure numerical accuracy within  $5 \times 10^{-5}$  eV for the total energy and  $5 \times 10^{-3}$  eV/Å for the forces. These calculations serve to validate the structural, electronic, and topological predictions made in earlier AI-driven screening steps. The fully relaxed crystal structures were visualized using VESTA (Momma & Izumi, 2011), and band structure analyses were carried out using PyProcar (Herath *et al.*, 2020; Lang *et al.*, 2024).

## Results

Among the structures we identified with stable energy ( $<0.01$  eV/atom), the Wyckoff 3d position is notably diverse in occupied species. Rather than listing all 60+ elements appearing at 3d, it is more insightful to group them by chemical families and focus on those most frequent. Key observations include:

- Main-group elements (from p-block): Phosphorus (P) leads with 54 occurrences, followed by Be<sup>+2</sup> (42), As (42), Si (33), In (21), Sn (18), Ge (9), Al, Sb, I, and Cl (6–12 each).
- Alkaline earth and alkali metals: Be and Mg (27), Ca, Sr (6–12).
- Transition metals: Ti (27), Zr (15), V, Hf, Fe, Rh, Ni, Ru, Au, Pd, Pt (3–15 each).
- Rare earths and lanthanides: Gd, Nd, Eu, Ce, Tb, Dy, Ho, Er, Y, Lu, Sm, Tm (3–24 each).
- Halogens & chalcogens: Cl, Br, I, S (6–12 occurrences).

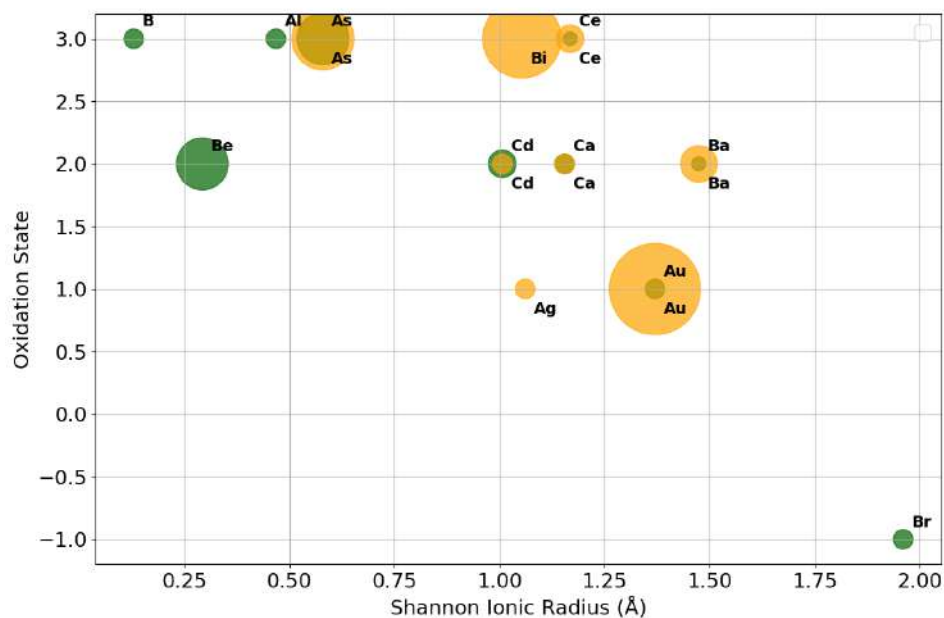
This highlights that P, Be, As, Si, Ti, and Mg—elements not seen in existing databases' 3d site entries—are among the most frequent. In comparison, repositories like Material Project (Jain *et al.*, 2013, 2020), AFLOW (Curtarolo *et al.*, 2012), and COD have recorded only 15 binaries with 3d atoms—limited to 10 species (Ce, Cr, Hf, Mo, Nb, Ni, Sc, Ta, V, and W). Our high-throughput search nearly doubles that diversity, uncovering new chemistries in overlooked chemical families.

The reason lies in chemical compatibility with site symmetry. The 3d position imposes threefold planar coordination, which requires atoms whose oxidation state and bonding fit a triangular environment. In that case, P and As (group 15) often adopt oxidation states

around +3, forming planar trigonal coordination. Be, Mg, Ca, Sr (group 2) readily form +2 ions, fitting well into the coordination shell. Transition metals (Ti, V, Zr) offer partially filled d-orbitals that underpin magnetic or electronic behavior. Rare-earth elements (Gd, Nd, etc.) bring +3 oxidation states and stable ionic sizes conducive to symmetry. Halogens and chalcogens like S, Cl, I, Br appear in unexpected but structurally favorable reduced forms (e.g., -1 or 0).

Previous experimental literature on binary Kagome compounds primarily emphasizes late transition metals (Fe, Co, V) and ternary systems ( $\text{Fe}_3\text{Sn}_2$ ,  $\text{CoSn}$ ,  $\text{V}_3\text{Sb}_5$ ), with few binaries featuring lighter or rarer species. Our work uncovers a much richer palette—demonstrating that elements across six chemical groups can stably occupy the 3d position when oxidation state and symmetry conditions align. This opens an expanded chemical landscape for chiral Kagome materials, pointing to promising new candidates well beyond those captured in classical databases or reported in existing Kagome studies.

Out of the 11 symmetry-distinct Wyckoff positions available in space group 180, our search yielded stable compounds—those on the convex hull—in 9 of them, with only 3d and 6h remaining unoccupied in this dataset. This broad coverage highlights the structural versatility of the space group. Among the occupied sites, the most frequently occurring elements were platinum (Pt) with 25 occurrences, followed closely by gold (Au) with 23, and bismuth (Bi) and titanium (Ti), each appearing 15 times. These trends suggest a preference for late transition metals and heavier main-group elements in energetically favorable configurations within this chiral space group. Our analysis reveals that lighter cations— $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ —alongside mid-sized  $\text{As}^{3+}$ , dominate the 3d Wyckoff site in  $\text{P6}_22$  structures, appearing hundreds of times within our dataset (see **Figure 4**). These ionic radii (0.13–0.58 Å) are significantly smaller than those typically found in classical transition-metal Kagome systems, suggesting an unexplored region of low-mass, stiff Kagome frameworks. This contrast is instructive: conventional Kagome lattices such as  $\text{KV}_3\text{Sb}_5$  ( $\text{Sb}^{3-}$  radius 1.05 Å) and  $\text{Fe}_3\text{Sn}_2$  involve heavier atoms and partially filled d-orbitals that support correlated magnetism and flat-band electronic



**Figure 4.** Oxidation state vs. Shannon ionic radius for cations occupying the 3d Wyckoff position (dark green) and other positions (orange) in space group 180 chiral Kagome structures. Marker size scales with the number of occurrences of each element–oxidation state combination across the zero convex hull dataset

states. In stark contrast, the prevalence of compact cations in 3d motifs hints at novel structural motifs dominated by strong phonon coupling and less by d-electron physics. This can lead to superconductivity, as our analysis of the electron density of states points out that many bands cross the Fermi surface, providing the basic ingredient for electron-phonon coupling. This opens intriguing possibilities for high-frequency lattice dynamics and phonon-mediated topological interactions—an area so far unexplored in Kagome compounds (Fu *et al.*, 2025; Hu *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024).

Now, in relation to chirality and Kagome lattices, recent studies—such as those on  $R\text{Pt}_2\text{B}$  ( $R = \text{La}, \text{Nd}$ )—demonstrate that the 3D Kagome network in such chiral structures fosters magnetic frustration and Kramers-Weyl nodes, with persistent topological features under broken T- and P-symmetries Ardila-Gutiérrez *et al.*, 2025. Our findings, which uncover a diverse array of ionic species in the 3d Kagome lattice of SG 180 compounds, raise the possibility that structural chirality might play a key role in stabilizing enantiomorphous Kagome frameworks with unique electronic and phononic signatures. Moreover, chiral systems in Sohncke groups are rare in inorganic solids (< 5% of ICSD entries), but they have proven essential for discovering fascinating phenomena such as chiral phonons and optical activity (Bousquet *et al.*, 2024). Therefore, the unexplored space of light-cation Kagome systems in SG 180 may offer fertile ground for discovering novel chiral quantum phases, especially if we pursue both enantiomers experimentally.

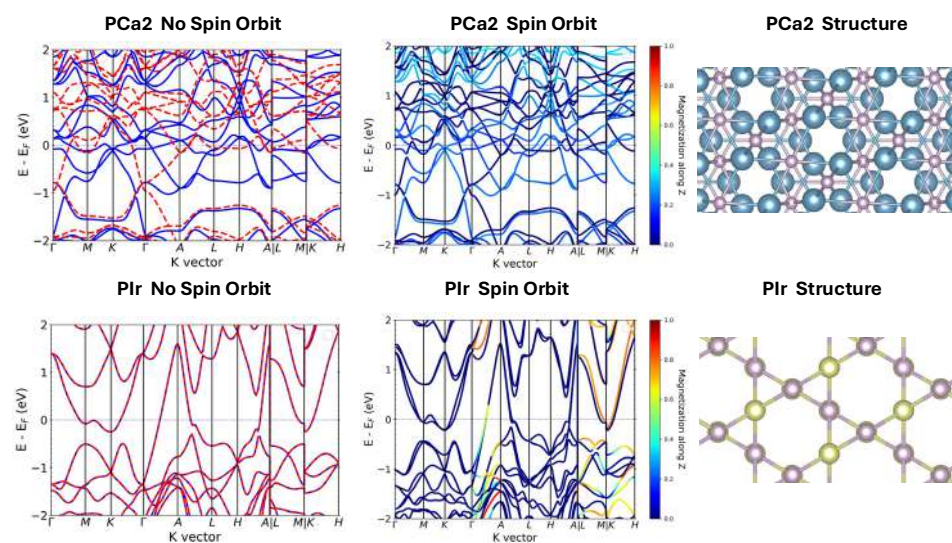
To assess the chemical and structural diversity of the generated Kagome dataset, we analyzed the stoichiometry types of all candidate compounds and identified the most prevalent elemental constituents within each group. The most frequent stoichiometry was  $\text{AB}_2$ , comprising 139 compounds, followed by AB with 67 structures and  $\text{AB}_4$  with 9 examples. Notably, the  $\text{AB}_2$  compounds were dominated by heavy elements such as gold (Au), platinum (Pt), and arsenic (As), which together suggest a propensity for forming layered or spatially anisotropic structures that support the Kagome motif. The AB stoichiometry also exhibited a rich elemental variety, including platinum, gadolinium (Gd), phosphorus (P), and iridium (Ir), reflecting a mix of transition metals and rare-earth elements potentially conducive to exotic magnetic or electronic behavior. In the smaller  $\text{AB}_4$  category, elements such as bismuth (Bi), cesium (Cs), and titanium (Ti) were observed, indicating a limited but chemically distinct subset. Overall, these results confirm that the dataset spans a chemically diverse range of compositions, while subtly favoring late transition metals and heavy p-block elements often associated with strong spin-orbit coupling—features known to stabilize topological and magnetic phases in Kagome frameworks.

It is important to note that the current dataset focuses exclusively on configurations where the Kagome network is stabilized by placing atoms on the 3d Wyckoff position of space group 180, one of four (3a, 3b, 3c, 3d) symmetry-distinct sites capable of supporting this geometry. While this choice introduces a degree of structural bias, it was made to ensure strict geometric preservation of the Kagome motif. Ongoing efforts are expanding this framework to include additional Wyckoff configurations and alternative binary decorations that preserve Kagome topology, which is expected to enhance both the chemical richness and structural diversity of the library. Overall, the current set already spans a broad range of compositions, with a bias toward late transition metals and heavy p-block elements often associated with spin-orbit-driven topological features in chiral Kagome materials.

As a last example of the potential of Chiral Kagome structures, we make a comparison of the electronic properties of  $\text{PCa}_2$  and  $\text{PIr}$ , binaries on the convex hull. In both structures, phosphorus (P) occupies the 3d Wyckoff position, playing a central role in forming the Kagome-like network. The difference lies in the metallic partner, Ca in  $\text{PCa}_2$  occupies the 6j site, and Ir in  $\text{PIr}$  occupies the 3c site. This difference is crucial because the site symmetry and atomic number (Z) of Ca and Ir differ significantly, which has direct consequences on the band dispersion, degeneracy, and spin orbit coupling (SOC) response. Without SOC, the band structure of  $\text{PCa}_2$  displays several nearly flat bands

near the Fermi level, a hallmark of Kagome physics—potentially linked to localized electronic states or destructive interference from the lattice geometry. In this case, the introduction of SOC does not significantly lift the degeneracies or strongly modify the band topology. This is expected since Ca is a light element (low atomic number) and SOC is weak. The general shape and dispersion remain largely preserved, though small splittings may appear. On the other hand, in the case of PIr, without SOC, the band structure exhibits similar Kagome features (e.g., flat bands, Dirac-like crossings), but the bands are more dispersive than in  $\text{PCa}_2$ , indicating stronger hybridization or overlap between orbitals, likely due to Ir's more extended 5d orbitals. When SOC is added, there is a clear lifting of degeneracies and visible band splittings, especially near the Fermi level. These effects stem from the strong SOC in Ir, which is a heavy element. **Figure 5** presents the electronic Figure 5 illustrates the electronic consequences of these structural differences, demonstrating the band dispersions of  $\text{PCa}_2$  and PIr. This is noted by looking into the band dispersions of  $\text{PCa}_2$  and PIr, highlighting the differing effects of spin-orbit coupling. In  $\text{PCa}_2$ , the almost degenerate flat bands (strong electron localization) shows the small relativistic nature of Ca and the continuation of the Kagome lattice. Conversely, in PIr, the significant SOC effects of Ir generate splitting of several degeneracies, leading to asymmetric gaps along high-symmetry paths. Therefore, chiral symmetry is able to incorporate the physics of both light and heavy elements, providing a flexible pathway from nearly perfect Kagome flat-band characteristics to spin-orbit-induced topological band splitting. The splitting may open small gaps at symmetry-protected points, which could have implications for topological states (e.g., quantum spin Hall effect or chiral edge states in layered structures).

A central observation from our analysis is the role of atomic size and charge in dictating Wyckoff site occupation, particularly in the context of the 3d site responsible for forming Kagome planes. We find that small, moderately charged cations—those with



**Figure 5.** Electronic band structures of two representative compounds identified in our structural search. The top row corresponds to  $\text{PCa}_2$  and the bottom row to PIr. In both cases, phosphorus occupies the 3d Wyckoff position, forming the Kagome network. However, Ca resides in the 6j site in  $\text{PCa}_2$ , while Ir occupies the 3c site in PIr, leading to distinct coordination environments. These differences are further amplified by the oxidation states and spin-orbit coupling (SOC) effects. As expected, SOC has minimal impact in the Ca-based compound, while in PIr, SOC induces significant band splitting and lifts degeneracies along multiple high-symmetry directions. Despite these contrasts, both systems preserve the hallmark hexagonal dispersion associated with P at the 3d site, underscoring the structural role of phosphorus in stabilizing the Kagome lattice.

Shannon radii typically below 0.6 Å and oxidation states of +2 or +3—are far more likely to occupy the 3d site. This is not surprising when considering the geometric constraints of the Kagome motif, which requires near-planarity and tight angular coordination. What stands out, however, is the consistency of this trend across diverse chemistries: elements like  $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$ , and  $\text{Cd}^{2+}$  dominate 3d site occupations, while the same species are rarely found at sites like 3c or 6j unless steric balance demands it. These preferences likely reflect a balance between crystal field stability and efficient packing, a hypothesis supported by formation energy data in the Materials Project and ICSD entries. In this way, the dataset provides empirical support for the idea that chiral Kagome materials enforce both spatial and electrostatic selectivity in their site chemistry.

The comparison of band structures between Ca- and Ir-containing compounds further reveals how these local structural environments shape magnetic order. Both systems were initialized with a ferromagnetic configuration, yet they relaxed to different magnetic ground states. The Ca-based compound (P3d.Ca6j) retained a net ferromagnetic signature, evident in the clean, asymmetric splitting of the spin bands and the absence of band folding. The Ir-based system (P3d.Ir3c), however, showed clear evidence of symmetry breaking: the bands split in a staggered fashion with doubling along key symmetry lines, consistent with an antiferromagnetic or ferrimagnetic solution. These divergences, despite similar symmetry and stoichiometry, highlight a delicate competition between exchange interactions, local coordination geometry, and perhaps even subtle differences in orbital overlap. Importantly, the preservation of enantiomorphic symmetry in both cases (space group 180) suggests that these materials could still host topologically nontrivial states—particularly if spin-orbit coupling or external perturbations are introduced. These results underscore how even minor changes in site occupancy and elemental identity can lead to qualitatively different electronic and magnetic behavior within the same structural framework.

## Conclusions

We have developed a framework for identifying and analyzing chiral Kagome materials in space group 180 using a combination of Shannon radii, oxidation states, and Wyckoff position analysis. Our data reveal clear trends linking cation size and charge to the structural role within the Kagome motif, with elements like  $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$ , and  $\text{Cd}^{2+}$  dominating the high-symmetry 3d site. Comparative electronic structure analysis of P3d.Ca6j and P3d.Ir3c compounds reveals sensitivity to magnetic ordering despite identical symmetry and stoichiometry, indicating complex interdependencies between the local atomic environment and emergent quantum states.

These insights offer concrete design guidelines for the discovery of next-generation Kagome systems with topological and magnetic functionalities. Beyond providing structural descriptors, our results suggest that magnetic ground states and band topology can be finely tuned by targeted control of atomic size, charge, and coordination environment. This approach paves the way for the rational design of new materials that may rival or exceed the electronic richness of canonical Kagome metals such as  $\text{Fe}_3\text{Sn}_2$  and  $\text{CoSn}$ .

## Acknowledgments

Computational resources have been provided by the Pittsburgh Supercomputer Center (Bridges2) and San Diego Supercomputer Center (Expanse) through allocation DMR140031 from the Advanced Cyberinfrastructure Coordination Ecosystem: Services & Support (ACCESS) program, which is supported by National Science Foundation grants #2138259, #2138286, #2138307, #2137603, and #2138296. We acknowledge the computational resources provided by WVU Research Computing's Dolly Sods HPC cluster, partially supported by NSF grant OAC-2117575. Additionally, we are grateful for funding from the West Virginia Higher Education Policy Commission under the Research Challenge Grant Program 2022 (Award RCG 23-007) and the NASA EPSCoR Program (Award 80NSSC22M0173).

## References

- Ardila-Gutiérrez, C., Torres-Amaris, D., González-Hernández, R., Romero, A.H., & Garcia-Castro, A. (2025). Chiral symmetry and magnetism in a 3d kagome lattice: RPt<sub>2</sub>B (r=1a and nd) prototype crystals. *Physical Review B* 112, 035109 (2025)
- Bousquet, E., Fava, M., Romestan, Z., Gómez-Ortiz, F., McCabe, E. E., & Romero, A. H. (2024). Structural chirality and related properties in the periodic inorganic solids: Review and perspectives. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 37(16), 163004.
- Chen, C., & Ong, S. P. (2022). A universal graph deep learning interatomic potential for the periodic table. *Nature Computational Science*, 2(11), 718-728.
- Chen, H., Wu, W., Yang, S. A., Li, X., & Zhang, L. (2019). Chiral phonons in kagome lattices. *Physical Review B*, 100(9), 094303.
- Choudhary, K., Garrity, K. F., Reid, A. C., DeCost, B., Biacchi, A. J., Hight Walker, A. R., Trautt, Z., Hattrick-Simpers, J., Kusne, A., Centrone, A., Davydov, A., Jiang, J., Pachter, R., Cheon, G., Reed, E., Agrawal, A., Qian, X., Sharma, V., ..., Rabe, K., & Tavazza, F. (2020). The joint automated repository for various integrated simulations (jarvis) for data-driven materials design. *npj computational materials*, 6(1), 173.
- Choudhary, K., Wines, D., Li, K., Garrity, K. F., Gupta, V., Romero, A. H., Krogel, J. T., Saritas, K., Fuhr, A., Ganesh, P., Kent, P. R. C., Yan, K., Lin, Y., Ji, S., Blaiszik, B., Reiser, P., Friedrich, P., Agrawal, A., Tiwary, P., ..., Biacchi, A. J., & Tavazza, F. (2024). Jarvis-leaderboard: A large scale benchmark of materials design methods. *npj Computational Materials*, 10(1), 93.
- Curtarolo, S., Setyawan, W., Hart, G. L., Jahnatek, M., Chepulskii, R. V., Taylor, R. H., Wang, S., Xue, J., Yang, K., Levy, O., Mehl, M.J., Stokes, H.T., Demchenko, D.O., & Morgan, D. (2012). Aflo: An automatic framework for high-throughput materials discovery. *Computational Materials Science*, 58, 218-226.
- Elliott, R. J. (1961). Phenomenological discussion of magnetic ordering in the heavy rare-earth metals. *Physical Review*, 124(2), 346.
- Fredericks, S., Parrish, K., Sayre, D., & Zhu, Q. (2021). Pyxtal: A python library for crystal structure generation and symmetry analysis. *Computer Physics Communications*, 261, 107810.
- Fu, J., Han, Y., Wang, Y., Wu, H., Yang, Y., Du, R., Zhao, J., Zhang, H., Yu, J., Wang, Z., & Hu, J. (2025). Ultrafast coherent phonon dynamics in the kagome magnet GdV<sub>6</sub>Sn<sub>6</sub>. *Physical Review B*, 111(5), 054308.
- Hasan, M. Z., Chang, G., Belopolski, I., Bian, G., Xu, S.-Y., & Yin, J.-X. (2021). Weyl, dirac and high-fold chiral fermions in topological quantum matter. *Nature Reviews Materials*, 6(9), 784-803.
- Hasan, M. Z., Xu, S.-Y., Belopolski, I., & Huang, S.-M. (2017). Discovery of weyl fermion semimetals and topological fermi arc states. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 8(1), 289-309.
- Herath, U., Tavadze, P., He, X., Bousquet, E., Singh, S., Muñoz, F., & Romero, A. H. (2020). Pyprocar: A python library for electronic structure pre/post-processing. *Computer Physics Communications*, 251, 107080.
- Hu, Y., Ma, J., Li, Y., Jiang, Y., Gawryluk, D. J., Hu, T., Teyssier, J., Multian, V., Yin, Z., Xu, S., Shin, S., Plokhikh, I., Han, X., Plumb, N.C., Liu, Y., Yin, J.-X., Guguchia, Z., Zhao, Y., Schnyder, A.P., ..., Wang, N., & Shi, M. (2024). Phonon promoted charge density wave in topological kagome metal ScV<sub>6</sub>Sn<sub>6</sub>. *Nature communications*, 15(1), 1658.
- Ivantchev, S., Kroumova, E., Madariaga, G., Pérez-Mato, J., & Aroyo, M. (2000). Subgroupgraph: A computer program for analysis of group-subgroup relations between space groups. *Applied Crystallography*, 33(4), 1190-1191.
- Jain, A., Montoya, J., Dwaraknath, S., Zimmermann, N. E., Dagdelen, J., Horton, M., Huck, P., Winston, D., Cholia, S., Ong, S. P. & Persson, K. (2020). The materials project: Accelerating materials design through theory-driven data and tools. *Handbook of Materials Modeling: Methods: Theory and Modeling*, 1751-1784.
- Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Dacek, S., Cholia, S., Gunter, D., Skinner, D., Ceder, G. & Persson, K. (2013). Commentary: The materialsproject: A materials genome approach to accelerating materials innovation. *APL materials*, 1(1).
- Kaplan, T. (1961). Some effects of anisotropy on spiral spin-configurations with application to rare-earth metals. *Physical Review*, 124(2), 329.

- Kazeev, N., Nong, W., Romanov, I., Zhu, R., Ustyuzhanin, A., Yamazaki, S., & Hippalgaonkar, K. (2025). Wyckoff transformer: Generation of symmetric crystals. *arXiv preprint arXiv:2503.02407*.
- Kresse, G., & Furthmüller, J. (1996). Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set. *Computational materials science*, 6(1), 15-50.
- Kresse, G., & Hafner, J. (1993). Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Physical review B*, 47(1), 558.
- Kresse, G., & Hafner, J. (1994). Norm-conserving and ultrasoft pseudopotentials for first-row and transition elements. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 6(40), 8245.
- Kresse, G., & Joubert, D. (1999). From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Physical review b*, 59(3), 1758.
- Laboratory, L. A. N. (2025). Periodic table of elements: Lanl [Accessed: 2025-07-10]. Lang, L., Tavazde, P., Tellez, A., Bousquet, E., Xu, H., Muñoz, F., Vasquez, N.,
- Lang, L, Tavazde, P., Tellez, A., Bousquet, E., Xu, H., Muñoz, F., Vasquez, N., Herath, U., & Romero, A.H. (2024). Expanding pyprocar for new features, maintainability, and reliability. *Computer Physics Communications*, 297, 109063.
- Li, J., Yao, Q., Wu, L., Hu, Z., Gao, B., Wan, X., & Liu, Q. (2022). Designing light-element materials with large effective spin-orbit coupling. *Nature Communications*, 13(1), 919.
- Liu, M., & Meng, S. (2024). Recent breakthrough in ai-driven materials science: Tech giants introduce groundbreaking models. *arXiv preprint arXiv:2402.05799*.
- Liu, Z., Li, M., Wang, Q., Wang, G., Wen, C., Jiang, K., Lu, X., Yan, S., Huang, Y., Shen, D., Yin, J.X., Wang, Z., Yin, Z., Lei, H., & Wang, S. (2020). Orbital-selective dirac fermions and extremely flat bands in frustrated kagome-lattice metal CoSn. *Nature communications*, 11(1), 4002.
- Mekata, M. (2003). Kagome: The story of the basketweave lattice. *Physics Today*, 56(2), 12-13.
- Merchant, A., Batzner, S., Schoenholz, S. S., Aykol, M., Cheon, G., & Cubuk, E. D. (2023). Scaling deep learning for materials discovery. *Nature*, 624(7990), 80-85.
- Momma, K., & Izumi, F. (2011). Vesta 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Applied Crystallography*, 44(6), 1272-1276.
- Nakatsuji, S., Kiyohara, N., & Higo, T. (2015). Large anomalous hall effect in a non-collinear antiferromagnet at room temperature. *Nature*, 527(7577), 212-215.
- Negi, P., Medhi, K., Pancholi, A., & Roychowdhury, S. (2025). Magnetic kagome materials: Bridging fundamental properties and topological quantum applications. *Materials Horizons*.
- Newnham, R. E. (2004). *Properties of materials: Anisotropy, symmetry, structure*. OUP Oxford.
- Ortiz, B. R., Teicher, S. M., Hu, Y., Zuo, J. L., Sarte, P. M., Schueller, E. C., Abeykoon, A. M., Krogstad, M. J., Rosenkranz, S., Osborn, R., Seshadri, R., Balents, L., He, J., & Wilson, S.D. (2020).  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$ : A  $\mathbb{Z}_2$  topological kagome metal with a superconducting ground state. *Physical Review Letters*, 125(24), 247002.
- Powell, R. C., & Powell, R. C. (2010). Tensor properties of crystals. *Symmetry, Group Theory, and the Physical Properties of Crystals*, 55-78.
- Prakash, A., & Wei, T.-C. (2014). Ground states of 1d symmetry-protected topological phases and their utility as resource states for quantum computation. *arXiv preprint arXiv:1410.0974*.
- Saini, H. (2023). *Development of ab initio characterization tool for weyl semimetals and thermodynamic stability of kagome weyl semimetals*. [Doctoral dissertation].
- Schmidt, J., Cerqueira, T. F., Romero, A. H., Loew, A., Jäger, F., Wang, H.-C., Botti, S., & Marques, M. A. (2024). Improving machine-learning models in materials science through large datasets. *Materials Today Physics*, 48, 101560.
- Tasci, E., de la Flor, G., Orobengoa, D., Capillas, C., Perez-Mato, J., & Aroyo, M. (2012). An introduction to the tools hosted in the bilbao crystallographic server. *EPJ Web of Conferences*, 22, 00009.
- Toulouse, G. (2008). The frustration model. In *Modern trends in the theory of condensed matter: Proceedings of the xvi karpacz winter school of theoretical physics, february 19–march 3, 1979 karpacz, poland* (pp. 195-203). Springer.
- Wang, Q., Lei, H., Qi, Y., & Felser, C. (2024). Topological quantum materials with kagome lattice. *Accounts of Materials Research*, 5(7), 786-796.
- Wannier, G. (1950). Antiferromagnetism. the triangular ising net. *Physical Review*, 79(2), 357.
- Xie, T., & Grossman, J. C. (2018). Crystal graph convolutional neural networks for an accurate and interpretable prediction of material properties. *Physical review letters*, 120(14), 145301.

- Ye, L., Kang, M., Liu, J., Von Cube, F., Wicker, C. R., Suzuki, T., Jozwiak, C., Bostwick, A., Rotenberg, E., Bell, D. C., Fu, L., Comin, R., & Checkelsky, J.G.** (2018). Massive dirac fermions in a ferromagnetic kagome metal. *Nature*, 555 (7698), 638-642.
- Yin, J.-X., Lian, B., & Hasan, M. Z.** (2022). Topological kagome magnets and superconductors. *Nature*, 612(7941), 647-657.
- Yoshimori, A.** (1959). A new type of antiferromagnetic structure in the rutile type crystal. *Journal of the Physical Society of Japan*, 14(6), 807-821.
- You, J.-Y., Zhou, X., Hou, T., Yahyavi, M., Jin, Y., Hung, Y.-C., Singh, B., Zhang, C., Yin, J.-X., Bansil, A. & Chang, G.** (2023). Topological chiral kagome lattice. *arXiv preprint arXiv:2309.00217*.
- Zhang, C.-L., Liang, T., Bahramy, M., Ogawa, N., Kocsis, V., Ueda, K., Kaneko, Y., Kriener, M., & Tokura, Y.** (2021). Berry curvature generation detected by nernst responses in ferroelectric weyl semimetal. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(44), e2111855118.
- Zhou, L., Yang, F., Zhang, S., & Zhang, T.** (2024). Chemical rules for stacked kagome and honeycomb topological semimetals. *Advanced Materials*, 36(15), 2309803.
- Zhu, R., Nong, W., Yamazaki, S., & Hippalgaonkar, K.** (2024). Wycryst: Wyckoff inorganic crystal generator framework. *Matter*, 7(10), 3469-3488.

Artículo original

## Foraminíferos bentónicos como indicadores ambientales en dos entornos arrecifales de Colombia: la isla de Providencia y la bahía de Cartagena

### Benthic foraminifers as bioindicators in two Colombian reef settings: Old Providence Island and Cartagena Bay

German D. Patarroyo<sup>1,2,\*</sup>, Gustavo A. Torres<sup>1</sup>, José M. Torres<sup>1</sup>, Diego F. Gómez<sup>1</sup>, Rafael C. Bortolin<sup>3†</sup>

<sup>1</sup> Stratos Consultoría Geológica, Bucaramanga, Colombia

<sup>2</sup> Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

<sup>3</sup> Departamento de Civil y Ambiental, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia

## Resumen

Los ambientes arrecifales cumplen funciones ecosistémicas que son vitales en la región Caribe, pero el manejo inadecuado de sus recursos naturales y otros impactos de origen antrópico amenazan su preservación. Se evalúa aquí el uso de las asociaciones de foraminíferos como bioindicadores en dos localidades del Caribe colombiano con distintos grados de deterioro ambiental. El material analizado, perteneciente a las zonas arrecifales de la isla de Providencia (archipiélago de San Andrés) y de Varadero (bahía de Cartagena), presentó asociaciones típicas de un entorno de laguna arrecifal. Los taxones dominantes correspondieron a los géneros de algas simbiotes *Archaias*, *Asterigerina*, *Amphistegina* y *Heterostegina*, las formas porcelanáceas *Quinqueloculina*, *Triloculina* y *Spiroloculina*, y a los rotálidos *Rotorbinella*, *Cymbaloporetta* y *Eponides*. En proporciones variables, también se identificaron algunos géneros indicativos de estrés ambiental como *Ammonia*, *Clavulina* y *Cribrorhaphidium*. El análisis detallado de la composición faunística en Providencia y Varadero evidenció diferencias significativas en la abundancia de algunos taxones, probablemente como reflejo de los distintos grados de impacto ambiental al que están expuestas ambas localidades. Dicho impacto fue particularmente notorio en el arrecife de Varadero, donde las estimaciones del índice FORAM (*Foraminifers in Reef Assessment and Monitoring*, IF) sugieren un estrés ambiental de moderado a alto, confirmando la persistencia de condiciones probablemente influenciadas por el alto impacto antrópico ya identificadas en estudios anteriores en la bahía de Cartagena. En contraste, las asociaciones de foraminíferos y los valores de IF en el material de Providencia sugieren condiciones de estrés moderadas a bajas, similares a las estimadas en otros cuerpos insulares del archipiélago.

**Palabras clave:** Ambientes arrecifales; Bioindicadores; Índice FORAM (IF); Tanatocenosis.

## Abstract

Reef settings play key ecosystemic functions in the Caribbean realm, but the unrestrained exploitation of their natural resources and other anthropogenic effects threaten their preservation. Here, we explore the use of the foraminiferal assemblages as bioindicators in two Colombian Caribbean localities with different levels of environmental stress. The material studied was collected from the reef zones in Old Providence Island (San Andrés Archipelago) and Varadero (Cartagena Bay), where typical reef lagoon foraminiferal assemblages are found. The main taxa comprised the symbiont-bearing genera *Archaias*, *Asterigerina*, *Amphistegina*, and *Heterostegina*, the porcelaneous forms *Quinqueloculina*, *Triloculina*, and *Spiroloculina*, and the rotaliids *Rotorbinella*, *Cymbaloporetta*, and *Eponides*. The stress-tolerant taxa *Ammonia*, *Clavulina*, and *Cribrorhaphidium* were also identified in variable abundances. The detailed analysis of the faunistic composition in Old Providence and Varadero indicated significant differences in the abundances of some taxa, likely related to specific stress conditions in both localities. These stress conditions were particularly evident in Varadero, where

**Citación:** Patarroyo GD, et al. Foraminíferos bentónicos como indicadores ambientales en dos entornos arrecifales de Colombia: la isla de Providencia y la bahía de Cartagena. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):728-747, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3145>

**Editor:** Camilo Montes

**\*Correspondencia:**

German D. Patarroyo;  
[paleo.patarroyo@gmail.com](mailto:paleo.patarroyo@gmail.com)

**Recibido:** 18 de marzo de 2025

**Aceptado:** 15 de agosto de 2025

**Publicado en línea:** 7 de octubre de 2025



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

the FORAM (Foraminifers in Reef Assessment and Monitoring) index (FI) estimations suggest moderate to highly stressed reef settings, similar to those found in preliminary surveys in this area and probably influenced by the higher anthropogenic impact at the Cartagena Bay. In contrast, the foraminiferal assemblages and the FI estimations of Old Providence suggest low to moderate stress conditions, as previously reported in other insular bodies of the archipelago.

**Keywords:** Benthic foraminifera; Bioindicadores; FORAM Index (FI); Thanatocoenosis.

## Introducción

Los foraminíferos (Infrarreino Rhizaria, filo Foraminifera) son un grupo de organismos unicelulares con una amplia distribución en los océanos (zonas intermareales a abisales). Constituyen un importante elemento en el plancton y en las comunidades meiobentónicas y macrobentónicas (Murray, 1991, 2006; Sen Gupta, 1999). Una de sus particularidades es el desarrollo de conchillas con un gran potencial de preservación en el registro geológico, por lo cual se usan como herramienta bioestratigráfica y en la elaboración de reconstrucciones paleoambientales. Además de su relevancia ecológica actual, los foraminíferos también poseen características que los hacen valiosos en el estudio del pasado geológico. En el Caribe colombiano los foraminíferos vienen utilizándose ampliamente en el estudio de las sucesiones sedimentarias del Cenozoico (Petters & Sarmiento, 1956; Duque-Caro *et al.*, 1975, 1990; Fiorini & Jaramillo, 2007; Rincón-Martínez *et al.*, 2007; Molineros *et al.*, 2012; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020; Barragán-Montilla & Sánchez-Quiñónez, 2021; Torres *et al.*, 2022; Duque-Castaño *et al.*, 2023; Trejos-Tamayo *et al.*, 2024, 2025). Sin embargo, los estudios de estos organismos en ecosistemas recientes siguen siendo limitados (Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos, 1983; Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Triffleman *et al.*, 1991; Parada-Ruffinatti, 1996; Ortiz-Moreno & Acosta, 2003; Bernal *et al.*, 2005; 2008; Fiorini, 2015; Barragán & Bernal, 2024), lo que podría dar lugar a sesgos en las interpretaciones paleoambientales que se adelantan en el norte de Colombia.

Los foraminíferos, en particular los de hábito de vida bentónico, presentan asociaciones que en los mares tropicales pueden llegar a ser muy diversas y son muy sensibles al impacto ambiental de origen antrópico (Hallock *et al.*, 2003; 2012; Doo *et al.*, 2014; Prazeres *et al.*, 2020). Variaciones significativas en parámetros ambientales como la temperatura, la incidencia de la luz y el pH, o la presencia abundante de materia orgánica e, incluso, de compuestos asociados a bloqueadores solares pueden afectar mucho a grupos selectos de foraminíferos bentónicos (*large benthic foraminifera*, LBF), asociados con algas simbiotas (Hallock *et al.*, 2003; Nobes *et al.*, 2008; Prazeres *et al.*, 2020; Litner *et al.*, 2022). Por tal motivo, en otras regiones tropicales los foraminíferos bentónicos se utilizan como bioindicadores ambientales en entornos arrecifales potencialmente amenazados (Culver & Buzas, 1995; Schueth & Frank, 2008; Barbosa *et al.*, 2009; Dimiza *et al.*, 2016).

Esta misma aproximación se ha probada en años recientes en el litoral Caribe colombiano y en el archipiélago de San Andrés con resultados promisorios (Velásquez *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2019; Rodríguez *et al.*, 2023; Patarroyo *et al.*, 2024). El uso de las asociaciones de foraminíferos como bioindicadores en los ambientes arrecifales de la mayoría de estos estudios se basó en la estimación del denominado índice FORAM (*Foraminifera in Reef Assessment and Monitoring*); (Hallock *et al.*, 2003). Dicho índice se basa en la relación entre la proporción de especies de foraminíferos y de algas simbiotas y las asociaciones consideradas como oportunistas. El índice FORAM (IF) no solo ha servido para las valoraciones del estrés ambiental en un momento de muestreo específico, sino para comprobar su variabilidad en los registros sedimentarios en las últimas décadas (Schueth & Frank, 2008; Barbosa *et al.*, 2009; Uthicke *et al.*, 2010; Carvajal-Chitty & Navarro, 2011; Stephenson *et al.*, 2015; Pisapia *et al.*, 2017; Humphreys *et al.*, 2018). A pesar de los avances recientes, sigue siendo necesaria una evaluación sistemática de herramientas como el IF en regiones del Caribe colombiano sujetas a impactos ambientales contrastantes, con el fin de ampliar su aplicabilidad regional.

Se presentan aquí los resultados del estudio de dos campañas de investigación en las que se recolectaron asociaciones recientes de foraminíferos bentónicos en dos regiones del Caribe colombiano: la isla de Providencia (archipiélago de San Andrés) y el arrecife de Varadero (bahía de Cartagena). Las dos regiones presentan afectaciones disímiles de origen antrópico (polución marina, sobrepesca), por lo que se buscó entender primero el tipo de asociaciones presentes y, posteriormente, su aplicación tentativa como bioindicadores del impacto ecológico en estas zonas.

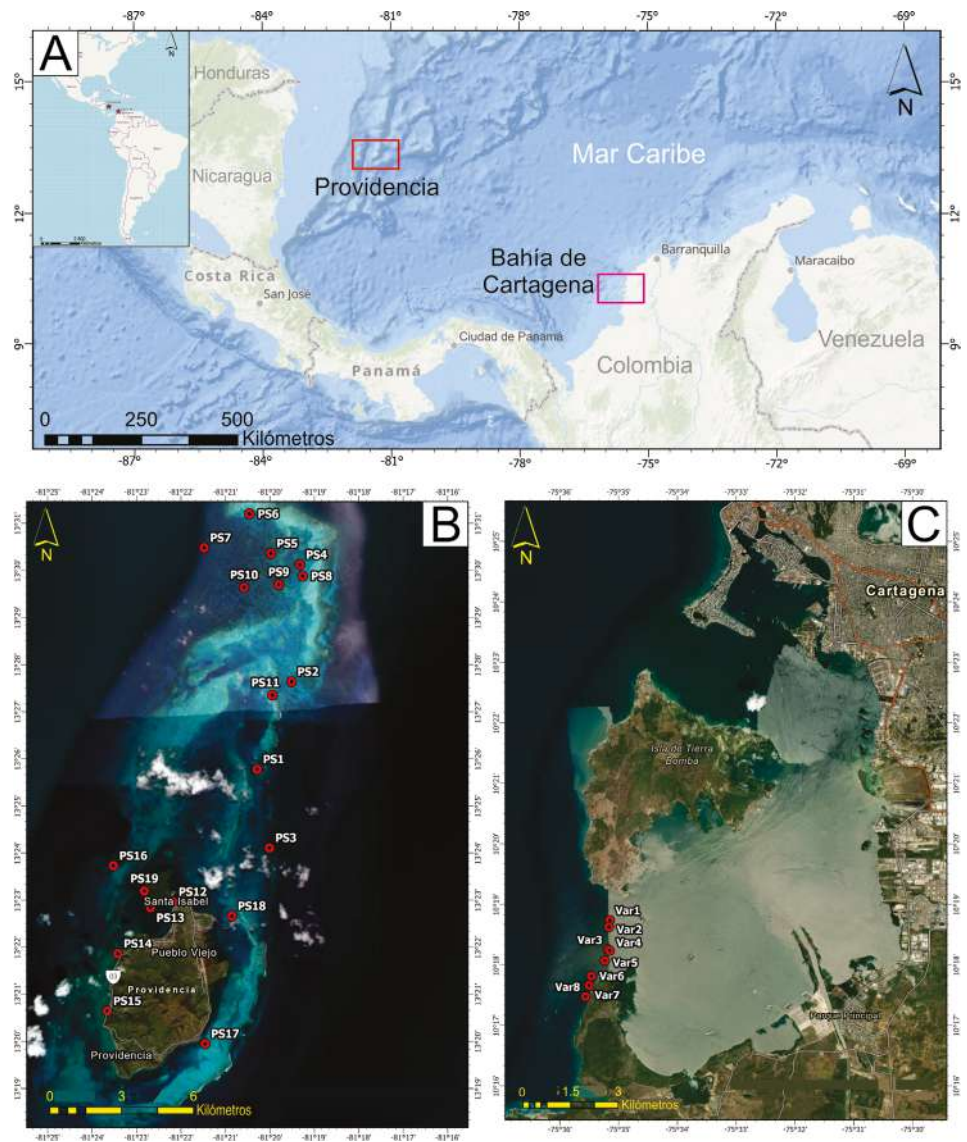
### *Área de estudio*

La isla de Providencia hace parte del archipiélago de San Andrés (Caribe colombiano), un conjunto de islas oceánicas, bancos y atolones ubicados a unos 300 km de Centroamérica y a 720 km del noroeste de la costa colombiana (CORALINA-Invemar, 2012; Geister & Díaz, 2007). En el 2000 la UNESCO reconoció mediante una resolución un área marina protegida en el archipiélago denominada Reserva de la Biosfera Seaflower, la cual alberga uno de los complejos arrecifales más extensos del Atlántico tropical (Díaz *et al.*, 2000; Taylor *et al.*, 2013; Ramírez, 2016). La isla de Providencia, ubicada al norte de la reserva, comprende un área de 20 km<sup>2</sup>, en tanto que el complejo arrecifal abarca un área total de 285 km<sup>2</sup> y se extiende hacia el norte a lo largo de una barrera arrecifal de 32 km de longitud (Díaz *et al.*, 2000; Geister & Díaz, 2007). Como todos los cuerpos insulares del archipiélago, la isla de Providencia tuvo su origen en un edificio volcánico durante el Paleógeno; una reactivación del volcanismo durante el Mioceno configuró la geomorfología de la isla y provocó que el registro sedimentario miocénico quedara fragmentado y se ubicara hacia la parte sur de la isla (Geister, 1992; Geister & Díaz, 2007; Durán-Gómez *et al.*, 2023). Actualmente los ecosistemas coralinos en la barrera y los pináculos distribuidos en la laguna arrecifal están dominadas por corales masivos (géneros *Siderastrea*, *Diploria* y *Montastrea*) y ramificados (*Porites*), así como por octocorales y macroalgas en el sector occidental de la isla (Sánchez *et al.*, 1998; Díaz *et al.*, 2000; Geister & Díaz, 2007). Las muestras recolectadas provienen de dos sectores: el sector norte de la laguna arrecifal (PS1 a PS11) y el litoral costero de la isla (PS12 a PS19) (Figura 1).

El arrecife de Varadero, ubicado en la bahía de Cartagena (Caribe colombiano), se encuentra en una zona costera estratégica entre el canal de Bocachica y la isla de Barú. En general, el arrecife comprende una estructura alargada de dirección sudoeste-noreste (SO-NE) con un área de 1,12 km<sup>2</sup>; está conformado por una terraza dominada por corales escleractínidos (*Orbicella*, *Agaricia* y *Porites*) y otra plataforma carbonatada menos desarrollada con presencia de colonias de corales (*Madracis*), octocorales (*Eunicea* y *Briareum*) y segmentos de pastos marinos (Pizarro *et al.*, 2017; Manrique-Rodríguez *et al.*, 2019). El descubrimiento de este arrecife en el 2013 fue inesperado, ya que la bahía de Cartagena es una zona históricamente contaminada por el manejo inadecuado de los residuos sólidos, los numerosos dragados realizados en el área y la descarga fluvial asociada al canal del Dique (Restrepo *et al.*, 2006; Pizarro *et al.*, 2017; Romero-Murillo *et al.*, 2023). Las muestras recolectadas hacen parte de la zona con mejor desarrollo de comunidades coralinas (Figura 1).

### **Métodos**

El material de la laguna arrecifal de Providencia se recolectó durante las actividades anuales de las expediciones Seaflower (septiembre de 2019) en colaboración con otros grupos de investigación que estudiaron las comunidades coralinas y evaluaron el contenido de metales traza en los sedimentos. Se estudiaron 19 muestras en Providencia, en profundidades que oscilaban entre los 1,5 y 11,8 metros (Figura 1). El material del arrecife de Varadero (8 muestras; 4-5 metros de profundidad) fue facilitado por Rafael Bortolin<sup>†</sup> (Universidad de la Costa, CUC) durante las actividades del Cartagena Reef Check (agosto de 2019). En ambos casos, los muestreos se hicieron de forma manual mediante buceo asistido.



**Figura 1.** (A) Localización de las áreas estudiadas. Muestras recolectadas para el estudio de las asociaciones de foraminíferos en la isla de Providencia (B) y el arrecife de Varadero (C)

Dadas las dificultades para utilizar el tinte rosa de Bengala en los dos grupos de muestras, el reconocimiento de las asociaciones de foraminíferos vivos (biocenosis) no fue posible en campo y se trabajó con asociaciones muertas (tanatocenosis). Sin embargo, las muestras de Providencia se secaron al sol inmediatamente después de su recolección, lo que permitió el reconocimiento de foraminíferos con algas simbiotas que, por su estado de conservación y coloración, probablemente estaban vivos en el momento del muestreo (Prazeres *et al.*, 2020). Por el contrario, las muestras tomadas en el arrecife de Varadero se fijaron en alcohol al 70 %, lo que favoreció el reconocimiento de géneros con algas simbiotas como *Amphistegina*.

Las muestras de Providencia tuvieron un peso entre los 10 y los 25 gramos y las de Varadero, entre 4 y 15 gramos. Para efectos de un mayor control de las asociaciones encontradas en ambos grupos de muestras, se hizo una valoración de la composición y la granulometría de los sedimentos en los que estaban embebidos los foraminíferos. Asimismo, se contabilizó el total de conchillas de foraminíferos fragmentados (fragmentación >30 %) como un indicador

indirecto del efecto del oleaje. Tras lavar las muestras con agua y eliminar la fracción más fina (<230  $\mu\text{m}$ ) en el laboratorio, los foraminíferos se asignaron a una morfoespecie hasta donde fue posible. Se identificaron entre 100 y 300 ejemplares para poder analizar poblaciones estadísticamente significativas (Fatela & Taborda, 2002; Forcino, 2012). La taxonomía de las formas encontradas siguió lo propuesto en la literatura especializada en la región Caribe (Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Bolli et al., 1994; Havach & Collins, 1997; Triffleman et al., 1991; Peebles et al., 1997; Gudnitz & Collins, 2024). Se consideraron también las observaciones ecológicas de los géneros asociados a ambientes arrecifales (Murray, 1991; 2006). Dado que *Archaias angulatus*, *Amphistegina gibbosa* y *Asterigerina carinata* son especies comunes en los ambientes arrecifales del Caribe, abreviamos sus nombres genéricos como Ar., Am. y As., respectivamente. Se estimaron la diversidad (Shannon-Wiener H) y la equidad (E) y se definieron los parámetros composicionales (tipo de conchilla) utilizando el programa PAST (Hammer et al., 2001). Para determinar la similitud entre las asociaciones de foraminíferos de las dos localidades, se hizo un análisis de varianza multivariado no paramétrico (PERMANOVA, mil permutaciones), usando la disimilitud de Bray-Curtis como método de estimación.

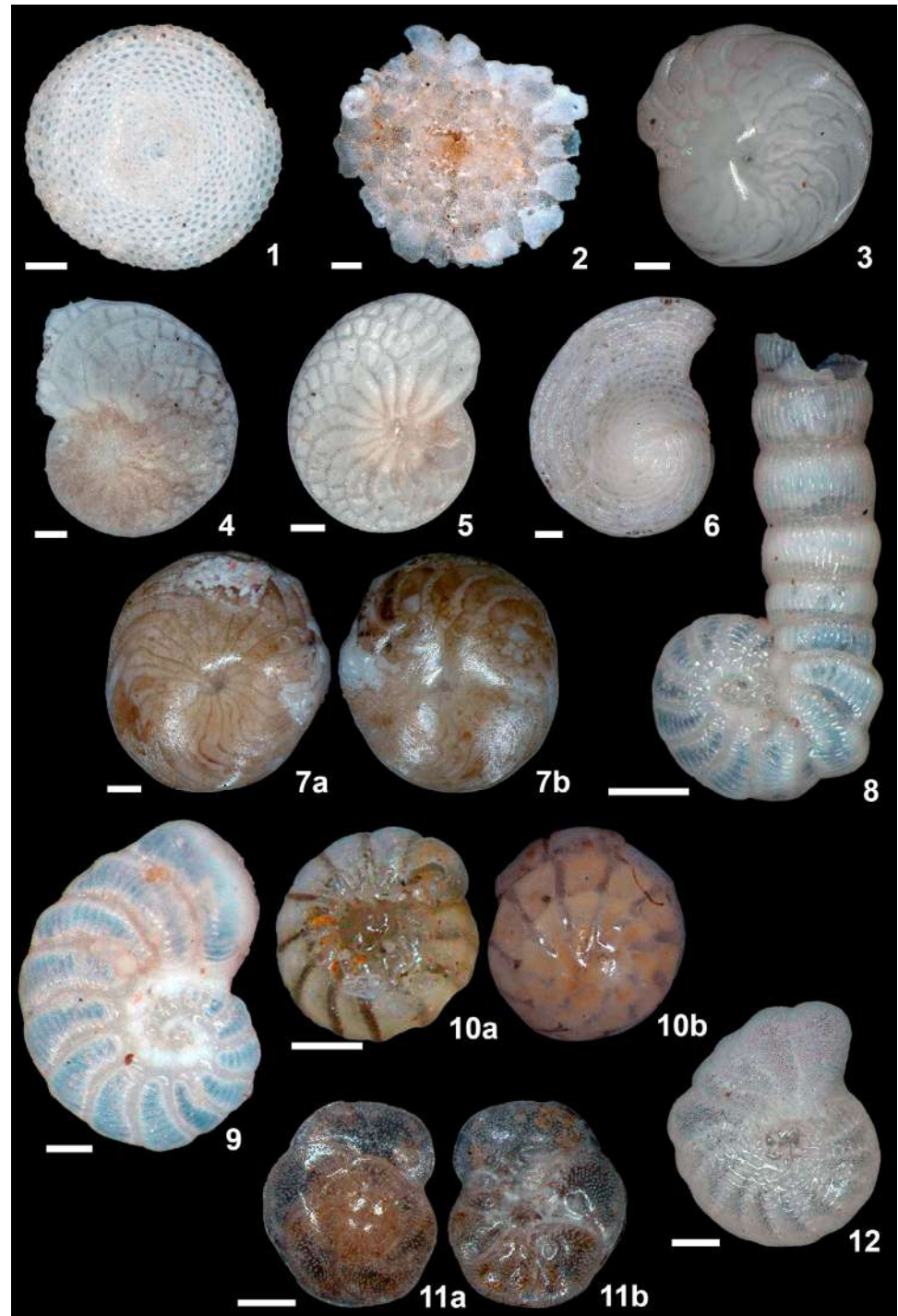
Los valores del índice FORAM (IF), que van de 0 a 10, se interpretan de la siguiente forma: IF >6, ambientes estables o en proceso de recuperación en caso de año previo; IF 4-6, ambientes con indicios de deterioro, e IF 2-4 o IF <2, ambientes con crecimiento marginal de arrecifes y en deterioro avanzado (Hallock et al., 2003; Prazeres et al., 2020). Los valores obtenidos en Providencia y Varadero se contrastaron con los reportes preliminares de estudios efectuados en el litoral caribe de Colombia (Parque Tayrona, islas del Rosario) (Velásquez et al., 2011; Rodríguez et al., 2023), y en el archipiélago de San Andrés (Sánchez et al., 2019; Patarroyo et al., 2024). En el caso del material de Providencia ya se había publicado una estimación preliminar del IF (Patarroyo et al., 2024), tomando como referencia una taxonomía de géneros y morfogrupos para las asociaciones.

## Resultados

### *Asociaciones de foraminíferos de la isla de Providencia*

Se reconocieron aproximadamente 4.800 ejemplares en las 19 muestras analizadas, que comprendían 27 géneros (siete géneros con algas simbiotes) y 34 especies de foraminíferos bentónicos. Algunos de los taxones más representativos se ilustran en las Figuras 2 y 3. Las especies con algas simbiotes más representativas fueron *A. angulatus* y *A. gibbosa*. También se identificaron, en menor proporción, ejemplares de *Laevipeneroplis*, *Heterostegina*, *Sorites*, *Asterigerina* y *Peneroplis*. Las muestras de la laguna arrecifal presentaron una mayor dominancia de la especie *A. gibbosa*, mientras que las muestras del litoral costero tuvieron una mayor proporción de la especie *A. angulatus*. Las formas porcelanáceas estuvieron conformadas principalmente por distintas especies de los géneros *Quinqueloculina* y *Spiroloculina*, en tanto que las formas hialinas presentaron proporciones variables de las especies *Cymbaloporeta squamosa*, *Rotorbinella rosea* (común en las muestras de la laguna arrecifal), *Planogypsina acervalis*, y de las especies indicadoras de estrés *Ammonia beccarii* (muy común en las muestras PS12 y PS15), *Eponides repandus*, *Criboelphidium poeyanum* y *Nonionella atlantica*. Las formas aglutinantes correspondieron casi exclusivamente a las especies *Textularia oviedoina* y *Clavulina angularis*. Los conteos totales de las muestras pueden consultarse en el material suplementario (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3145/4596>).

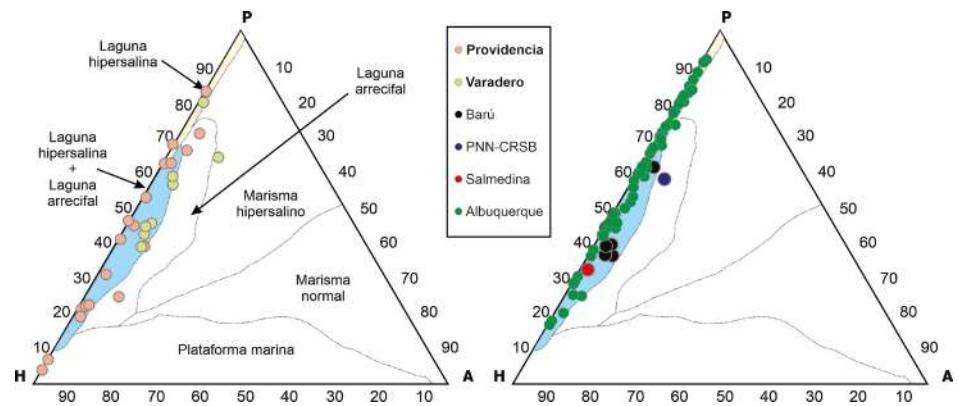
En general, las asociaciones de foraminíferos encontradas en Providencia reflejan las condiciones típicas de entornos hipersalinos y de laguna arrecifal, donde las formas con algas simbiotes y las que presentan conchillas calcáreas (tipo porcelanáceo y hialinas) son dominantes (>40 % de la asociación total), mientras que las formas de tipo aglutinante son escasas (<5 % de la asociación total) (Figura 4). Hay una mayor abundancia (~60 % de la asociación total) de las formas porcelanáceas en las muestras del litoral costero de la isla (muestras PS12 a PS19).



**Figura 2.** Foraminíferos representativos de los ambientes arrecifales de la isla de Providencia. La escala corresponde a 100  $\mu\text{m}$ . La técnica de adquisición de las microfotografías es de apilamiento focal. 1. *Sorites orbiculus* (Forsskål; PS6). 2. *Planogypsina acervalis* (Brady; PS4). 3 y 7a-b. *Amphistegina gibbosa* (d'Orbigny; PS3, PS7). 4-5. *Heterostegina depressa* (d'Orbigny; PS7, PS10). 6. *Archaias angulatus* (Fichtel & Moll; PS9). 8. *Peneroplis arietinus* (Batsch; PS8). 9. *Peneroplis pertusus* (Forsskål; PS13). 10a-b. *Ammonia beccarii* (Linnaeus; PS12). 11a-b. *Eponides repandus* (Fichtel & Moll; PS4). 12. *Criboelphidium* sp. (Cushman & Brönnimann; PS7)



**Figura 3.** Foraminíferos representativos de los ambientes arrecifales de la isla de Providencia. La escala corresponde a 100  $\mu\text{m}$ . La técnica de adquisición de las microfotografías es de apilamiento focal. **1a-b.** *Asterigerina carinata* (d'Orbigny; PS2). **2a-b.** *Rotorbinella rosea* (d'Orbigny; PS8). **3a-c, 4a-c.** *Cymbaloporeta squamosa* (d'Orbigny; PS12). **5.** *Spiroloculina atlantica* (Cushman; PS12). **6.** *Spiroloculina antillarum* (d'Orbigny; PS17). **7.** *Quinqueloculina poeyana* (d'Orbigny; PS9). **8.** *Quinqueloculina agglutinans* (d'Orbigny; PS13). **9.** *Quinqueloculina reticulata* (d'Orbigny; PS11). **10.** *Miliolinella subrotundata* (Montagu; PS5). **11.** *Borelis pulchra* (d'Orbigny; PS17). **12.** *Pyrgo* sp. (Defrance; PS10) **13.** *Bigenerina* sp. (d'Orbigny; PS5). **14.** *Clavulina trilatera* (Cushman; PS10). **15.** *Reophax* sp. (Monfort; PS6). **16.** *Textularia oviedoiana* (d'Orbigny; PS17)



**Figura 4.** Diagramas ternarios de las asociaciones de foraminíferos: **Izquierda:** asociaciones de la isla de Providencia y del arrecife de Varadero. **Derecha:** asociaciones de la región de Cartagena, incluyendo Barú (Rodríguez *et al.*, 2023), Parque Nacional Natural Islas del Rosario (Velásquez *et al.*, 2011), banco de Salmedina (Bernal *et al.*, 2005), y cayo Albuquerque (Patarroyo *et al.*, 2024). Tipos de conchillas: calcáreo hialino (H), calcáreo porcelanáceo (P) y aglutinado (A). Definición de hábitats basadas en Murray (1991, 2006)

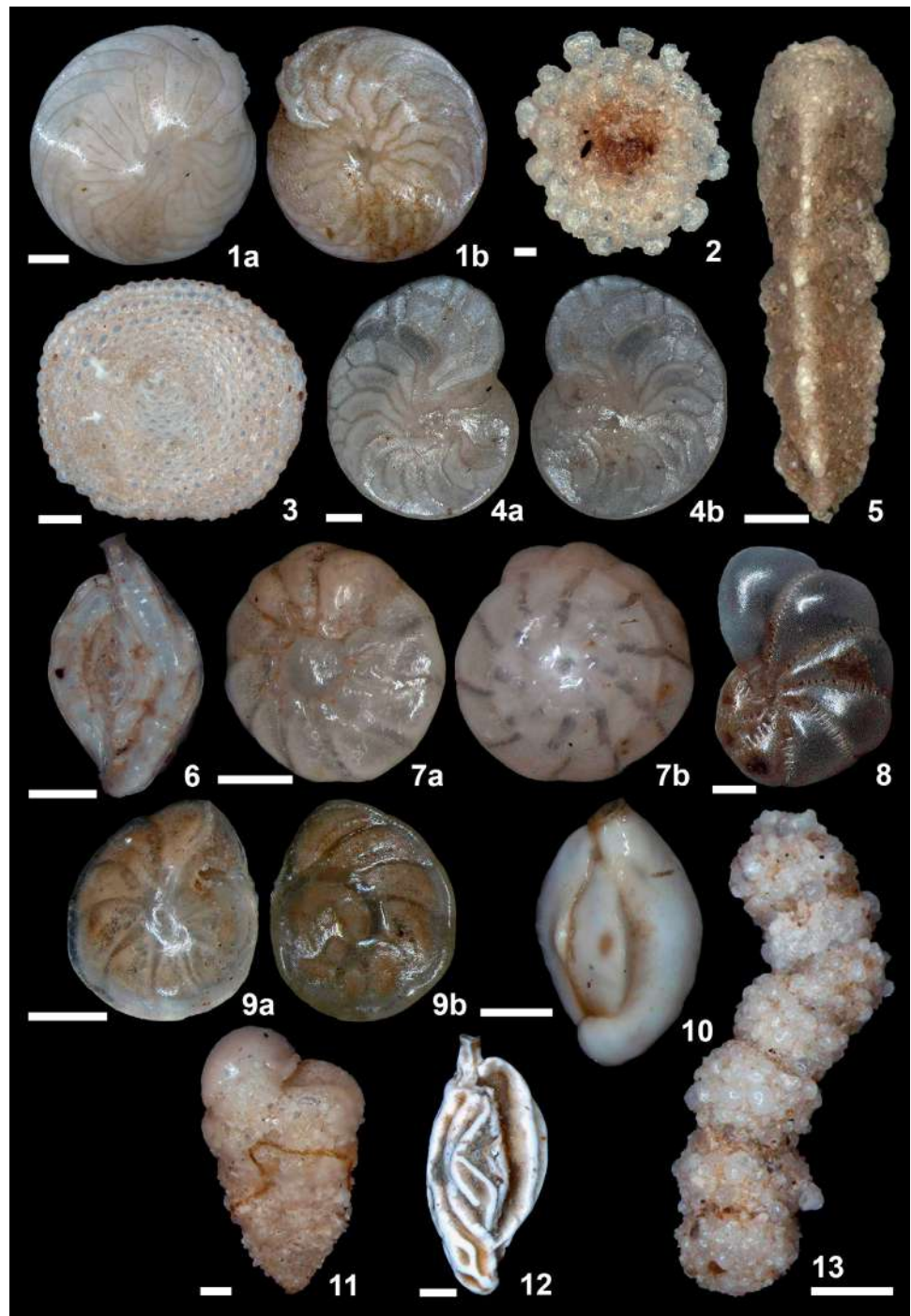
El porcentaje de conchillas fragmentadas fue bajo (<10 % de la asociación total) en la mayoría de las muestras, con excepción de las localidades PS1 y PS16, con porcentajes de 20 y 17 %, respectivamente. Sin embargo, el bajo recobro de foraminíferos en estas dos muestras (<100 individuos/muestra) pudo llevar a sobrestimaciones en este parámetro y por ello no fueron consideradas en los análisis de diversidad. La diversidad (Shannon-H) de las asociaciones de foraminíferos fluctuó entre 1,2 y 2,5, con excepción de las muestras PS2 y PS18, ubicadas en la parte norte de la isla (Figura 1), y cuyos valores de Shannon-H fueron menores a uno (<1). Los valores de equidad, en cambio, presentaron valores entre 0,24 y 0,55 en todas las muestras y no hubo diferencias significativas entre aquellas provenientes del litoral costero y las de la laguna arrecifal.

Otros elementos constitutivos de los sedimentos analizados en Providencia, que en general pueden definirse como arenas biogénicas de grano medio a grueso y arenas de grano muy fino (muestras PS1, PS13, PS12, PS15 y PS16), correspondían a fragmentos de gasterópodos y bivalvos, espinas de equinodermos, espículas de esponjas, valvas de ostrácodos (muy diversos), restos de peces (otolitos y dientes), foraminíferos planctónicos (género *Globigerinoides*) y restos leñosos (muestras del litoral costero).

#### **Asociaciones de foraminíferos del arrecife de Varadero**

Los sedimentos analizados en el arrecife de Varadero correspondieron a arenas biogénicas de grano medio, en las que, además de las conchillas de foraminíferos bentónicos, también estaban presentes abundantes fragmentos de invertebrados (moluscos, espinas y osículos de equinodermos, espículas de esponjas, valvas de ostrácodos) y vertebrados (otolitos y dientes de peces). Al igual que en el grupo de muestras de Providencia analizado, las formas de las conchillas calcáreas porcelanáceas y hialinas fueron dominantes (>40 % de la asociación total), en tanto que las de tipo aglutinante fueron escasas (<6 % de la asociación total) (Figura 4). Teniendo en cuenta el diagrama ternario de la Figura 4, la mayoría de las asociaciones encontradas en Varadero correspondían a las de un entorno de laguna arrecifal y laguna hipersalina, diferenciándose ligeramente las muestras al sur del arrecife (VAR-6 y VAR-8) (Figura 1) en su composición faunística.

Las asociaciones de foraminíferos encontradas en el sector de Varadero (1.024 especímenes en total) registraron una abundancia moderada (100-150 especímenes/muestra) y una preservación de buena a moderada. Se identificaron un total de 35 géneros (ocho de ellos con algas simbiotes) y 43 especies de foraminíferos bentónicos. Algunos de los taxones más representativos se muestran en la Figura 5. Entre las formas con



**Figura 5.** Foraminíferos representativos del arrecife de Varadero (bahía de Cartagena). La escala corresponde a 100  $\mu\text{m}$ . La técnica de adquisición de las microfotografías es de apilamiento focal. **1a-b.** *Amphistegina gibbosa* (d'Orbigny; VAR-5). **2.** *Planogypsina acervalis* (Brady; VAR-1). **3.** *Sorites orbiculus* (Forsskål; VAR-7). **4a-b.** *Heterostegina depressa* (d'Orbigny; VAR-5). **5.** *Clavulina trilatera* (Cushman; VAR-4). **6.** *Spiroloculina antillarum* (d'Orbigny; VAR-2). **7a-b.** *Ammonia tepida* (Cushman; VAR-2). **8.** *Elphidium* sp. (Monfort; VAR-2). **9a-b.** *Asterigerina carinata* (d'Orbigny; VAR-1). **10.** *Quinqueloculina lamarckiana* (d'Orbigny; VAR-7). **11.** *Textularia agglutinans* (d'Orbigny; VAR-2) **12.** *Quinqueloculina reticulata* (d'Orbigny; VAR-5). **13.** *Bigenerina* sp. (d'Orbigny; VAR-2)

algas simbioses dominantes se identificaron las especies *Am. gibbosa*, *Heterostegina depressa*, *As. carinata*, y *Ar. angulatus*, al igual que los géneros *Borelis*, *Sorites*, *Peneroplis* y *Laevipeneroplis*. Las formas porcelanáceas estaban conformadas principalmente por distintas especies de los géneros *Miliolinella*, *Quinqueloculina*, *Triloculina* y *Spiroloculina*. Por su parte, las formas hialinas estuvieron dominadas por los taxones indicadores de estrés *C. poeyanum*, *Ammonia tepida*, así como la especie generalista *Rosalina floridana*. Las formas aglutinantes registraron proporciones de especímenes de *C. angularis*, *Textularia* spp, *Reophax* spp., entre otros. Los conteos totales de las muestras se encuentran en el material suplementario (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3145/4597>).

Los valores de diversidad (Shannon-H) y equidad de las asociaciones de foraminíferos de Varadero variaron según la localidad. En general, las muestras de la parte norte del arrecife (VAR-1 a VAR-5) presentaron valores de diversidad menores a 2,8, en tanto que sus valores de equidad fluctuaron entre 0,53 y 0,66. En comparación, las muestras del sector sur del arrecife —donde hay mayor comunicación con el océano— registraron valores de equidad entre 0,60 y 0,67.

## Discusión

### *Las asociaciones de foraminíferos de Providencia y Varadero en el contexto de la región Caribe*

Las asociaciones encontradas en Providencia coinciden con lo reportado para ambientes arrecifales del Caribe, lo que respalda su utilidad como indicadores ambientales en este contexto. Por ejemplo, entre los géneros dominantes en Providencia se encuentran las formas porcelanáceas *Quinqueloculina*, *Spiroloculina* o *Miliolinella*. También destaca la especie hialina *R. rosea*, o los géneros con algas simbioses *Archaias* y *Amphistegina*, que son elementos comunes en Serranilla y Albuquerque (**Triffleman et al.**, 1991; **Patarroyo et al.**, 2024). En contraste, la proporción de *Amphistegina* y *Archaias* se ha reportado como baja (<10 % de la asociación total) en Roncador y Serrana (**Sánchez et al.**, 2019), y especies encontradas en baja proporción en Providencia, como *A. beccarii*, *Hauerina diversa* o *N. atlantica*, aunque típicas de ambientes marinos someros (**Murray**, 1991, 2006), representarían los primeros registros en el archipiélago.

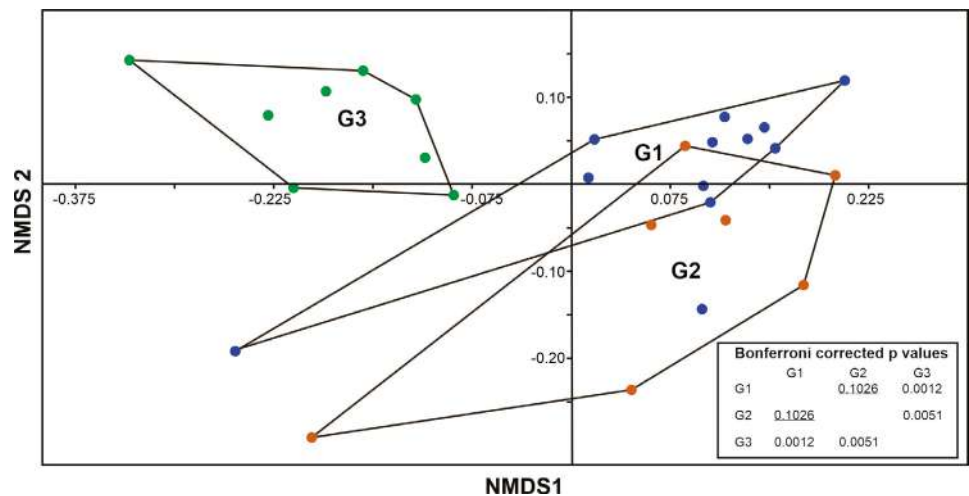
En general, *Amphistegina* y *Archaias* son característicos de aguas superficiales, a menudo adheridos a pastos marinos y bioclastos (**Culver & Buzas**, 1982; **Martin**, 1986; **Hallock et al.**, 1986). Sin embargo, debido a su morfología discoidal, pueden ser fácilmente movilizados de nuevo por eventos de alta energía que alteran la composición original de la tanatocenosis (**Li & Jones**, 1997; **Li et al.**, 1998; **Wilson**, 2006). Se ha propuesto que la abundancia de *Ar. angulatus* se ha sobrestimado en los sedimentos estudiados en Serranilla y Albuquerque dada las evidencias de daño en sus conchillas (abrasión, fragmentación, microperforaciones), causado ya sea por la dinámica del oleaje o la bioerosión (**Trifflemann et al.**, 1991, 1992; **Patarroyo et al.**, 2024). En contraste, la proporción de conchillas fragmentadas fue generalmente baja en las muestras de Providencia (<10 % de la asociación total, predominantemente especímenes de *Ar. angulatus*), lo que sugiere una baja energía en el lecho donde fueron recolectadas. Cabe resaltar que el muestreo de este estudio fue efectuado meses antes del paso del huracán Iota por la isla (noviembre de 2020), evento que ocasionó afectaciones significativas en el litoral costero y las zonas de manglar (**Instituto Humboldt**, 2021; **Comisión Colombiana del Océano-CCO**, 2024). Si bien la valoración preliminar de las comunidades coralinas sugiere afectaciones moderadas tras el paso del huracán (**Gómez et al.**, 2022; **CCO**, 2024), deben hacerse nuevos estudios que evalúen la respuesta de las asociaciones de foraminíferos desde el 2020.

Otras especies de foraminíferos que presentan algas simbioses, como *As. carinata*, *Heterostegina depressa*, y *Borelis pulchra*, registraron abundancias bajas a moderadas en Providencia (5-10 % de la asociación total), al igual que los géneros *Laevipeneroplis*, *Peneroplis* y *Sorites*. Estos taxones también se han identificado en Serranilla y Albuquerque

(Triffleman *et al.*, 1991; Patarroyo *et al.*, 2024). En Roncador y Serrana, en cambio, la proporción de estos taxones es baja, con excepción de *Laevipeneroplis* (Sánchez *et al.*, 2019), que, según algunos estudios, prefiere ambientes de moderada energía (Culver, 1990). La presencia común del género *Quinqueloculina* es una característica que comparten todos los cuerpos insulares analizados en el archipiélago, resultado esperable, ya que este género y otros miliólidos como *Spiroloculina* o *Miliolinella* son elementos característicos en las plataformas carbonatadas del Caribe, independientemente de las condiciones de energía en los sedimentos de fondo (Lidz & Rose, 1989; Havach & Collins, 1997; Gischler *et al.*, 2003). Entre las formas hialinas que no presentan algas simbiotes, la especie más representativa en Providencia fue *R. rosea*. Este taxón es común en los arrecifes del Caribe (Wilson & Ramsook, 2007; Gischler & Möder, 2009); en un ejemplo de sinonimia se ha identificado en Albuquerque (Patarroyo *et al.*, 2024) así, en Serranilla como *Discorbis rosea* (Triffleman *et al.*, 1991) y probablemente como *Discorbis* sp. en Roncador y Serrana (Sánchez *et al.*, 2019). Por último, aunque en el estudio de Sánchez *et al.* (2019) no se reconocieron taxones de conchillas aglutinantes en las muestras puntuales de las lagunas arrecifales de esos dos cayos, *Bigenerina* y *Textularia* parecen ser los géneros aglutinantes más comunes en las muestras de Providencia, así como en el material estudiado en Serranilla y Albuquerque (Triffleman *et al.*, 1991; Patarroyo *et al.*, 2024).

Si bien la mayoría de las asociaciones descritas en Providencia también estuvieron presentes en las muestras del arrecife de Varadero, la abundancia de algunos taxones y la presencia puntual de algunos géneros (*Buliminella*, *Cornuspira*, *Globocassidulina*, *Nodosaria*) y especies como *A. tepida*, *R. floridana*, y *Textularia agglutinans* en esta última, sugieren diferencias significativas entre ambas localidades.

La Figura 6 es un gráfico de ordenación no paramétrica (*non-metric multidimensional scaling*, NMDS) que indica cómo los dos grupos de muestras de Providencia (G1-G2, arrecife norte y litoral costero) se segregaron del grupo de muestras analizadas en Varadero (G3), lo que se vio respaldado por el análisis PERMANOVA, el cual evidenció una separación entre los grupos de muestras de Providencia y Varadero. Por ejemplo, el valor de p (con corrección de Bonferroni) de los grupos G1 y G2 fue de 0,1026, en contraste con los valores de 0,0012 y 0,0051 evidentes al comparar G1 y G2 con G3 (Figura 6). El valor de p en estos casos fue menor a 0,05, lo que refleja una separación plausible entre los grupos de muestras de Providencia y Varadero.



**Figura 6.** Gráfico de ordenación no paramétrica (NMDS) y prueba PERMANOVA de las asociaciones de foraminíferos de Providencia y Varadero. Las muestras se agruparon en tres grupos principales: Providencia (arrecife norte; G1), Providencia (litoral costero; G2) y Varadero (G3).

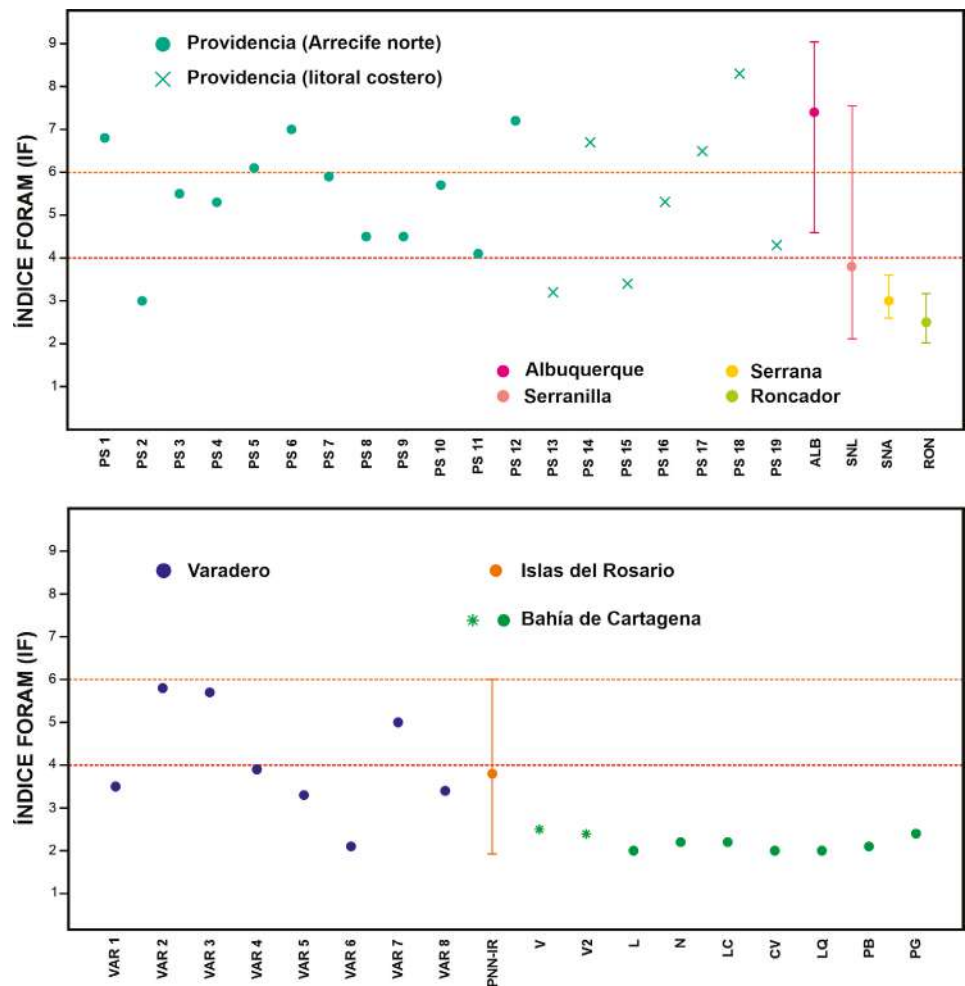
Una de las principales diferencias en las asociaciones de foraminíferos de Providencia y Varadero fue la proporciones de *Ar. angulatus* y *Am. gibbosa*. La primera fue siempre abundante (~20 % de la asociación total) en el material de Providencia, con abundancias significativas (>10 % de la asociación total) solamente en las muestras VAR-2 y VAR-3. En contraste, *Amphistegina* se caracterizó por ser el género dominante en las asociaciones con algas simbiotes de Varadero. En el litoral Caribe *Am. gibbosa* es característica de la plataforma interna a media (5-50 m de profundidad) (Havach & Collins, 1997; Gischler & Möder, 2009; Wilson & Carvajal-Chitty, 2021), siendo una especie ampliamente documentada en la bahía de Cartagena y en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y de San Bernardo (PNN-IR) (Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos, 1983; Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Bernal *et al.*, 2005; Velásquez *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2023). Otra especie con algas simbiotes y de mayor recurrencia en el arrecife de Varadero fue *H. depressa*. Según diversos estudios, esta especie al parecer no depende tanto de una alta incidencia de la luz en las masas de agua, como sí ocurre con *Ar. angulatus* y el género *Amphistegina* (Nobes *et al.*, 2008; Uthicke & Nobes, 2008; Eder *et al.*, 2016).

Otra diferencia significativa en el material de Varadero es la ausencia de *R. rosea*, una especie recurrente en el archipiélago de San Andrés. Según algunos autores, esta especie podría estar sobrestimada en la tanatocenosis debido a su forma discoidal y a su mayor resistencia a la abrasión (Brasier, 1975; Rose & Lidz, 1977). En contraste, *R. floridana*, un taxón adaptado a condiciones de mayor energía en las zonas de parches arrecifales que usualmente se adhiere al pasto marino (Langer, 1993; Gischler & Möder, 2009), fue un elemento común (>3 % de la asociación total) en las muestras de Varadero. Otros taxones encontrados únicamente en esta zona correspondieron a los géneros calcáreos *Bolivina*, *Buliminella*, *Globocassidulina*, *Lagena* y *Nodosaria*, géneros comunes en las zonas de plataforma y talud (Murray, 1991, 2006) cuya presencia se ha documentado a lo largo del litoral Caribe colombiano (Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos, 1983; Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Bernal *et al.*, 2005; Fiorini, 2015; Rodríguez *et al.*, 2023; Barragán & Bernal, 2024). Los miliólidos también son más diversos en Varadero, donde, además de la presencia común de los géneros *Quinqueloculina*, *Miliolinella* y *Spiroloculina*, se hallaron igualmente especímenes de *Cornuspira*, *Massilina* y *Pseudotriloculina*. Estas diferencias en la composición de las asociaciones explican los valores más altos de riqueza y diversidad observados en las muestras del arrecife de Varadero comparados con los estimados en el material de Providencia.

### ***Estimaciones del índice FORAM en el Caribe colombiano***

Teniendo en cuenta las proporciones de los foraminíferos con algas simbiotes en Providencia y Varadero, y las observaciones metodológicas recientemente propuestas por Prazeres *et al.* (2020), se estimó el índice FORAM (IF) (Figura 7) para hacer una valoración ambiental de sus entornos arrecifales. En dicha valoración se consideraron las estimaciones del IF previamente realizadas en el archipiélago de San Andrés (Sánchez *et al.*, 2019; Patarroyo *et al.*, 2024) y en el litoral Caribe colombiano (Velásquez *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2023).

Las estimaciones del IF en la isla de Providencia estuvieron, en general, entre 4 y 6, con valores significativamente altos (IF>6) en muestras puntuales del arrecife norte (PS5 y PS6) y del litoral costero (PS14, PS17 y PS18). En contraste, se obtuvieron valores de IF<4 en las muestras PS2, PS13 y PS15 (Figura 7). Todos los valores registrados concuerdan con las estimaciones previas (IF 3-8,4) reportadas por Patarroyo *et al.* (2024), quienes emplearon una taxonomía preliminar durante la fase de campo en el 2019. Las estimaciones del IF en Providencia sugieren condiciones moderadas de estrés ambiental (Hallock *et al.*, 2003; Prazeres *et al.*, 2020) en la mayoría de las zonas estudiadas. La distribución de los valores del IF indica condiciones más estables para los ambientes del arrecife norte, mientras que el material del litoral refleja condiciones ambientales más heterogéneas, asociadas con una mayor influencia antrópica (por ejemplo, la polución marina), la variabilidad en el tipo de sustrato, incluidos los lechos rocosos, y niveles con



**Figura 7.** Estimaciones del índice FORAM (IF) en la isla de Providencia y el arrecife de Varadero. Los valores del IF por debajo de 4 indican un crecimiento marginal de arrecifes o su deterioro avanzado. **Topo.** Se indican las estimaciones del IF promedio obtenidas en otros cuerpos insulares del archipiélago de San Andrés: Albuquerque (ALB), Serranilla (SNL), Roncador (RON) y Serrana (SNA) (Sánchez et al., 2019; Patarroyo et al., 2024). **Base.** Se indican las estimaciones propuestas del IF en el Parque Nacional Natural Islas del Rosario (PNN-IR) (Velásquez et al., 2011) y la bahía de Cartagena (Rodríguez et al., 2023). Las muestras V y V2 fueron recolectadas en la parte sur del arrecife de Varadero.

mayores concentraciones de materia orgánica. Esto explicaría la presencia relativamente frecuente de taxones indicadores de estrés, como *Ammonia*, *Elphidium* o *Clavulina*, en localidades expuestas a una mayor descarga fluvial y a intervenciones antrópicas como dragados o remoción de zonas de manglar, por ejemplo en las cercanías de Smooth Water Bay (muestras PS15) y en el canal que separa Providencia y Santa Catalina (muestras PS13 y PS12).

En general, la evolución ecológica de los ambientes arrecifales de Providencia se ha documentado a través del monitoreo de sus comunidades coralinas (Geister, 1986; 1992; Geister & Díaz, 2007; CCO, 2024), el cual ha revelado la disminución paulatina de la población de varias especies de coral y de la cobertura coralina, fenómeno que también se ha reportado en otras zonas del Caribe. Recientemente, Puyana et al. (2015) evaluaron el papel que pueden desempeñar las floraciones de cianobacterias en la salud de las comunidades coralinas de la isla, y reportaron una alta prevalencia de cianobacterias

(planctónicas y bentónicas) en Providencia, lo que constituye un nuevo factor de estrés ambiental que deberá explorarse en estudios futuros. Cabe resaltar que dicho estudio no incluyó la evaluación de las comunidades de cianobacterias en la parte norte del arrecife, por lo que se recomienda el monitoreo ecológico de dichas regiones a través de la valoración conjunta de las poblaciones de cianobacterias y de foraminíferos bentónicos.

Los valores del IF en Providencia contrastaron con los reportados en otras regiones del archipiélago de San Andrés (**Figura 7**). Dichos valores fueron particularmente bajos en Roncador (IF 2-3,1) y Serrana (IF 2,6-3,7), lo que se atribuye a la presencia relativamente frecuente de los géneros oportunistas *Bolivina*, *Clavulina* y *Elphidium*. Estos resultados fueron validados por el estudio de la cobertera coralina y de las asociaciones de erizos. La información obtenida en ambas islas sugiere un deterioro gradual en las últimas décadas de las comunidades arrecifales de esta parte del archipiélago (**Sánchez et al.**, 2019). En contraste, en Albuquerque las estimaciones del IF fueron similares a las de Providencia (IF 4,7-9,8), lo que sugiere condiciones favorables para el desarrollo de las comunidades coralinas. Dichos valores se explican por el predominio de los géneros indicadores *Archaias* o *Amphistegina*, y la baja proporción (<5 % de la asociación total) de los taxones indicadores de estrés *Clavulina*, *Criboelphidium* y *Elphidium* (**Patarroyo et al.**, 2024). Cabe mencionar que, por lo menos parcialmente, las condiciones ambientales de Albuquerque no necesariamente estarían siendo reflejadas por el IF, ya que las estimaciones del IF > 6,5 podrían corresponder a sobrestimaciones causadas por la nueva movilización del material recolectado debida a una mayor dinámica del fondo. Este caso podría ser más relevante en las estimaciones propuestas para Serranilla (IF 2,1-7,4) y en otros bancos submarinos de la parte norte de la plataforma de Nicaragua, donde estudios granulométricos y geomorfológicos indican una mayor exposición a las corrientes oceánicas y un colapso paulatino de estas plataformas carbonatadas (**Triffemann et al.**, 1992; **Peebles et al.**, 1997; **Patarroyo et al.**, 2024).

En conclusión, una valoración exitosa del IF en el archipiélago de San Andrés requerirá de nuevas campañas de muestreo en los cuerpos insulares restantes como San Andrés, Quitasueño, o Courtown, los cuales presentan distintos grados de afectación ambiental. Asimismo, se recomienda establecer un monitoreo periódico de los lugares donde ya se dispone de información de las asociaciones de foraminíferos. Esto resulta especialmente relevante si se considera que gran parte del material analizado en el archipiélago fue complemento de diversas actividades de investigación (cobertura coralina, monitoreo de tiburones, polución, análisis granulométricos). Recientemente, **Prazeres et al.** (2020) propusieron una serie de recomendaciones adicionales (metodologías, insumos) a la propuesta original de **Hallock et al.** (2003) para optimizar la información obtenida mediante el IF.

Así como las asociaciones de foraminíferos descritas en Varadero presentan diferencias en su composición con respecto al material de Providencia, las estimaciones del IF también reflejan diferencias claras entre ambas localidades. En general, los valores del IF en Varadero (IF 2,1-5,7) (**Figura 7**) sugieren condiciones de estrés ambiental en las comunidades coralinas, lo cual se ve respaldado por una mayor recurrencia de taxones oportunistas como *Ammonia*, *Clavulina* y *Elphidium* y, principalmente, la especie *C. poeyanum*, documentados previamente en la bahía de Cartagena y áreas circundantes (**Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos**, 1983; **Parada-Ruffinatti & Pinto**, 1986; **Velásquez et al.**, 2011; **Rodríguez et al.**, 2023). Aunque se trató de un sondeo exploratorio, las muestras de la parte norte del arrecife (muestras VAR-2 y VAR-3) sugieren condiciones ambientales menos estresantes que las de la parte sur (muestras VAR-4 a VAR-8), con estimaciones similares a las efectuadas por **Rodríguez et al.** (2023) en la parte más al sur del arrecife (muestras V y V2) y el sector de Barú (IF < 2,5). Asimismo, las estimaciones del IF en Varadero se ubicaron en los rangos reportados por **Velásquez et al.** (2011) en el PNN-IR (IF 2-6) (**Figura 7**), correspondientes al primer sondeo del índice en el Caribe colombiano. En ese estudio se valoró el IF en 14 localidades situadas dentro de dos áreas marinas protegidas (PNN-IR, Parque Nacional Natural Tayrona) o en sus cercanías. De forma sorpresiva, los valores del IF fueron más altos en las localidades situadas fuera

de las zonas protegidas. Se propuso que la mayor presión en los ecosistemas debido a las actividades turísticas y la presencia cercana de áreas densamente pobladas habrían condicionado tales resultados.

Es evidente que el factor de origen antrópico tiene un papel determinante en la salud de los entornos arrecifales de Varadero debido a la alta descarga de material silicoclástico asociado al canal del Dique (Restrepo *et al.*, 2006; Pizarro *et al.*, 2017; Manrique-Rodríguez *et al.*, 2019; Rodríguez *et al.*, 2023). Otros impactos significativos están ligados a las continuas actividades de dragado en el área y a la contaminación por metales pesados, cuyos valores exceden los estándares internacionales (Romero-Murillo *et al.*, 2023). A pesar del poco conocimiento que se tiene de las asociaciones de foraminíferos en la región de Varadero, los resultados obtenidos parecen reflejar apropiadamente el estado de salud en el que se encuentran hoy las comunidades coralinas. La realización de nuevos sondeos en el arrecife, incluidos transectos en distintos rangos batimétricos, así como el análisis de asociaciones vivas y su variabilidad genética, permitirán entender las principales características de los foraminíferos bentónicos de esta zona. Asimismo, la estimación del IF a partir de los sondeos ya realizados (Parada-Ruffinatti & Londoño de Hoyos, 1983; Parada-Ruffinatti & Pinto, 1986; Bernal *et al.*, 2005), podría contribuir a calibrar tales estimaciones en el litoral colombiano y a evaluar la progresión temporal del deterioro de los ambientes arrecifales de esta zona con una óptica diferente. En otras regiones del Caribe y del Pacífico, el índice IF se ha estimado no solo en términos espaciales, sino también con un enfoque temporal (Hallock *et al.*, 2003; Carnahan *et al.*, 2009; Carilli & Walsh, 2012). Por otra parte, el estudio de las asociaciones de foraminíferos en núcleos sedimentarios ha permitido determinar transformaciones ambientales en ambientes costeros de Brasil, Panamá y La Florida ocurridas en las últimas décadas y siglos (Cockey *et al.*, 1996; Almeida *et al.*, 2013; Gudnitz *et al.*, 2021; Gudnitz & Collins, 2024; Arellano-Torres *et al.*, 2024). El resiliente arrecife de Varadero, que representa un vestigio de las estructuras coralinas que se extendían por el litoral antes de la llegada de los europeos, constituye un valioso archivo natural que permite documentar la transformación ambiental que ha sufrido la bahía de Cartagena, especialmente desde la configuración del canal del Dique.

## Conclusiones

Se evaluaron las asociaciones de foraminíferos de dos ambientes arrecifales del Caribe colombiano: la isla de Providencia (archipiélago de San Andrés) y Varadero (bahía de Cartagena). En las dos localidades las asociaciones presentaron elementos característicos de estos ambientes, con la presencia común de taxones con algas simbioses como *Archaias*, *Amphistegina*, *Asterigerina* o *Heterostegina*, miliólidos (*Quinqueloculina*, *Spiroloculina* y *Triloculina*) y taxones heterótrofos como *Cymbaloporetta*, *Eponides* y *Rotorbinella*, entre otros. En proporciones variables, también se identificaron formas oportunistas como *Clavulina*, *Ammonia* o *Criboelphidium*. A pesar de su aparente similitud, las proporciones de algunos de estos taxones difieren en las dos localidades, lo que podría atribuirse a los distintos grados de impacto ambiental que presentan sus ecosistemas. En el caso de Providencia, las estimaciones del índice FORAM (IF) sugieren condiciones de estrés ambiental moderadas a bajas, con valores similares a los reportados recientemente en otras partes del archipiélago. En contraste, en Varadero los valores del IF indican condiciones de estrés ambiental moderado a alto, en concordancia con estimaciones previas en el área. Estos resultados nutren la evidencia de la intensa presión ecosistémica ejercida por la actividad antrópica en la bahía de Cartagena, asociada principalmente al aporte de material silicoclástico y a la contaminación marina. Por ello, el uso de los foraminíferos bentónicos como bioindicadores en ambientes arrecifales representa una herramienta con gran potencial para la valoración ambiental del litoral Caribe colombiano.

## Información suplementaria

Ver la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3145/4596> y la tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3145/4597>

## Agradecimientos

Un especial agradecimiento a todos los profesionales y a la comunidad local que brindaron apoyo logístico y metodológico en la fase de campo de la Expedición Seaflower 2019. Un sentido agradecimiento a Rafael Bortolin<sup>†</sup>, quien generosamente nos suministró parte del material analizado en Providencia y nos ofreció las muestras de sedimento obtenidas durante el Cartagena Reef Check 2019, y a Phanor Montoya (Corales de Paz) por la información adicional sobre las actividades llevadas a cabo durante dicha campaña. A la Universidad Industrial de Santander y Stratos Consultoría Geológica por el apoyo logístico adicional. A Pamela Hallock (University of South Florida) por la información para la correcta estimación del índice FORAM en el material que se viene estudiando en el Caribe colombiano. A los dos revisores por sus valiosos aportes, comentarios y sugerencias para mejorar el manuscrito.

## Contribución de los autores

**GDP:** caracterización taxonómica de las asociaciones de foraminíferos y análisis composicionales; **GDP, GAT, JMT y RB:** recolección del material en Providencia; **RB:** recolección del material en el arrecife de Varadero; **DFG:** preparación en el laboratorio del material recolectado en Providencia y Varadero; **GAT:** edición de las láminas fotográficas.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- Almeida, C.M., Fernandes-Barbosa, C.F., Cordeiro, R.C., Seoane, J.C.S., Fermino, G.M., Silva, P.O., Turcq, B.J.** (2013). Palaeoecology of a 3-kyr biosedimentary record of a coral reef-supporting carbonate shelf. *Continental Shelf Research*, 70, 168-176.
- Arellano-Torres, E., Correa-Metrio, A., Rutiaga-Ramírez, J. M., Escobar, J., & Castañeda-Posadas C.** (2024). Holocene benthic foraminifera ecological succession in the Panamanian Caribbean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 655, 112536.
- Barbosa, C., Prazeres, M., Ferreira, B., Sicoli, J.C.** (2009). Foraminiferal assemblage and reef check census in coral reef health monitoring of East Brazilian margin. *Marine Micropaleontology*, 73(1-2), 62-69.
- Barragan, C. & Bernal, G.** (2024). Benthic foraminifera as bioindicators of gas seep intensity in the offshore zone of the Sinú fold belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 148, 105103.
- Bernal, G., Agudelo, A., López, S., Domínguez, J.** (2005). Textura, composición y foraminíferos bentónicos de los sedimentos superficiales en los Bancos de Salmedina, Caribe Colombiano. *Boletín Científico CCCP*, 12, 95-112.
- Bernal, G., Ruiz-Ochoa, M., Piedrahita, M.T., Restrepo, E.** (2008). Foraminíferos en los sedimentos superficiales del sistema lagunar de Cispatá y la interacción Río Sinú-Mar Caribe Colombiano. *Boletín de las Ciencias de la Tierra*, 23, 5-20.
- Bolli, H.M., Beckmann, J.P., Saunders, J.B.** (1994). *Benthic Foraminiferal biostratigraphy of the South Caribbean region*. Cambridge University Press.
- Brasier, M.D.** (1975). The ecology and distribution of recent foraminifera from the reefs and shoals around Barbuda, West Indies. *Journal of Foraminiferal Research*, 5, 193-210.
- Carilli, J. & Walsh, S.** (2012). Benthic foraminiferal assemblages from Kiritimati (Christmas) Island indicate human-mediated eutrophication has occurred over the scale of decades. *Marine Ecology Progress Series*, 456, 87-99.
- Carnahan, E.A., Hoare, A.M., Hallock, P., Lidz, B.H., Reich, C.D.** (2009). Foraminiferal assemblages in Biscayne Bay, Florida, USA: Responses to urban and agricultural influence in a subtropical estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 59, 221-233.
- Carvajal-Chitty, H.I. & Navarro, S.** (2021). Preliminary foraminiferal survey in Chichiriviche de La Costa, Vargas, Venezuela. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 24(2), 90-103.
- Comisión Colombiana del Océano-CCO.** (2024). *Boletín Expedición Científica Seaflower 2021-I Old Providence y Santa Catalina*. Puntoaparte Editores.
- Cockey, E., Hallock, P., Lidz, B.H.** (1996). Decadal-scale changes in benthic foraminiferal assemblages off Key Largo, Florida. *Coral Reefs*, 15, 237-248.

- CORALINA-INVEMAR.** (2012). *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR.
- Culver, S.J.** (1990). Benthic foraminifera of Puerto Rican mangrove-lagoon systems: potential for paleoenvironmental interpretations. *Palaios*, 5, 34-51.
- Culver, S.J. & Buzas, M.A.** (1995). The effects of anthropogenic habitat disturbance, habitat destruction, and global warming on shallow marine benthic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, 25(3), 204-211.
- Díaz, J.M., Barrios, L.M., Cendales, M.H., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M., Ospina, G.H., Parra-Velandia, F., Pinzón, J., Vargas-Ángel, B., Zapata, F., Zea, S.** (2000). *Áreas coralinas de Colombia*. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR.
- Dimiza, M.D., Triantaphyllou, M.V., Koukousioura, O., Hallock, P., Simboura, N., Karageorgis, A.P., Papathanasiou, E.** (2016). The Foram Stress Index: A new tool for environmental assessment of soft-bottom environments using benthic foraminifera. A case study from the Saronikos Gulf, Greece, Eastern Mediterranean. *Ecological Indicators*, 60, 611-621.
- Doo, S.S., Fujita, K., Byrne, M., Uthicke, S.** (2014). Fate of calcifying tropical symbiont-bearing large benthic foraminifera: Living sands in a changing ocean. *The Biological Bulletin*, 226(3), 169-186.
- Duque-Castaño, M., Trejos-Tamayo, R., Osorio-Tabares, L.C., Angulo-Pardo, E., Vallejo, F., Plata, A., Pardo-Trujillo, A.** (2023). Lower to Middle Miocene multiproxy biostratigraphy of the P-18 core-stratigraphic well in Sinú-San Jacinto Basin, Caribbean region of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 123, 104228.
- Duque-Caro, H.** (1975). Los foraminíferos planctónicos y el Terciario de Colombia. *Revista Española de Micropaleontología*, 7(3), 403-427.
- Duque-Caro, H.** (1990). The Chocó block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1), 71-84.
- Durán-Gómez, J.E., Patarroyo, G.D., Torres-Parada, J.M.** (2023). Miocene Fossils of Old Providence Island (Western Caribbean, Colombia) and geological heritage of the Seaflower Biosphere Reserve. *Caribbean Journal of Science*, 53(2), 210-221.
- Eder, W., Briguglio, A., Hohenecker, J.** (2016). Growth of *Heterostegina depressa* under natural and laboratory conditions. *Marine Micropaleontology*, 122, 27-43.
- Fatela, F. & Taborda, R.** (2002). Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Marine Micropaleontology*, 45, 169-174.
- Fiorini, F.** (2015). Recent benthic foraminifera from the Caribbean continental slope and shelf off west of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 60, 117-128.
- Fiorini, F. & Jaramillo, C.** (2007). Paleoenvironmental reconstruction of the Oligocene- Miocene deposits of southern Caribbean (Carmen de Bolívar, Colombia) based on benthic foraminifera. *Boletín de Geología*, 29(2), 47-55.
- Forcino, F.L.** (2012). Multivariate assessment of the required sample size for community paleoecological research. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 315-316, 134-141.
- Geister, J.** (1986). Recent Coral Reefs and geology history of Providencia Island (Western Caribbean Sea, Colombia). *Geología Colombiana*, 15, 115-134.
- Geister, J.** (1992). Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia). *Facies*, 27, 1-70.
- Geister, J. & Díaz, J.M.** (2007). *Reef Environments and Geology of an Oceanic Archipelago: San Andrés, Old Providence and Santa Catalina (Caribbean Sea, Colombia) with field guide*. INGEOMINAS Special Publication.
- Gischler, E., Hauser, I., Heinrich, K., Scheitel, U.** (2003). Characterization of depositional environments in isolated carbonate platforms based on benthic foraminifera, Belize, Central America. *Palaios*, 18, 236-255.
- Gischler, E. & Möder, A.**, 2009. Modern benthic foraminifera on Banco Chinchorro, Quintana Roo, Mexico. *Facies*, 55, 27-35.
- Gómez C., Millán, S., Acosta-Chaparro, A., Abril-Howard, A., Navas-Camacho, R.** (2022). Evaluación preliminar del impacto del huracán Iota en arrecifes coralinos de las islas de Providencia y Santa Catalina. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 51(1), 193-200.
- Gudnitz, M.N., Collins, L.S., O’Dea, A.** (2021). Foraminiferal communities of a mid-Holocene reef: Isla Colón, Caribbean Panama. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 562, 110042.

- Gudnitz, M.N. & Collins, L.S.** (2024). Using foraminifera to assess changes in marine coastal habitats of Caribbean Panama since the Middle Holocene. *Marine Micropaleontology*, *192*, 102408.
- Hallock, P., Cottey, T.L., Forward, L. B., Halas, J.** (1986). Population dynamics and sediment production by *Archaias angulatus* (Foraminiferida) in Largo Sound, FL. *Journal of Foraminiferal Research*, *16*, 1-18.
- Hallock, P., Lidz, B.H., Cockey-Burkhard, E.M., Donnelly, K.B.** (2003). Foraminifera as bioindicators in coral reef assessment and monitoring: the FORAM index. En Melzian, B.D., Engle, V., McAlister, M., Sandhu, S., Eads, L.K. (Eds.) *Coastal Monitoring through Partnerships* (221-238). Springer.
- Hammer, O., Harper, D.A.T., & Ryan, P.D.** (2001). PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis: *Palaeontologia Electronica*, *4*(1), 1-9.
- Havach, S.M. & Collins, L.S.** (1997). The distribution of recent benthic foraminifera across habitats of Bocas Del Toro, Caribbean Panama: *Journal for Foraminiferal Research*, *27*, 232-249.
- Humphreys, A.F., Halfar, J., Ingle, J.C., Manzello, D., Reymond, C.E., Westphal, H., Riegl, B.** (2018). Effect of seawater temperature, Ph, and nutrients on the distribution and character of low abundance shallow water benthic foraminifera in the Galapagos. *PLoS One*, *13*, e0202746.
- Instituto Humboldt.** (2021). *Expedición Cangrejo Negro. Isla de Providencia 17 al 24 de enero de 2021*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Langer, M.R.** (1993). Epiphytic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, *20*(3-4), 235-265.
- Li, C. & Jones, B.** (1997). Comparison of foraminiferal assemblages in sediments on the windward and leeward shelves of Grand Cayman, British West Indies. *Palaaios*, *12*, 12-26.
- Li, C., Jones, B., Kalbfleisch, W.B.** (1998). Carbonate sediment transport pathways based on foraminifera: case study from Frank Sound, Grand Cayman, British West Indies. *Sedimentology*, *45*, 109-120.
- Lidz, B.H. & Rose, P.R.** (1989). Diagnostic Foraminiferal Assemblages of Florida Bay and Adjacent Shallow Waters: A Comparison. *Bulletin of Marine Science*, *44*(1), 399-418.
- Lintner, M., Schagerl, M., Lintner, B., Nagy, M., Heinz, P.** (2022). Photosynthetic performance of symbiont-bearing foraminifera *Heterostegina depressa* affected by sunscreens. *Scientific Reports*, *12*, 2750.
- Manrique-Rodríguez, N., Agudelo, C., Sanjuan-Muñoz, A.** (2019). Comunidad de octocorales gorgonáceos del arrecife de coral de Varadero en el Caribe colombiano: diversidad y distribución espacial. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, *48*(1), 55-64.
- Martin, R.E.** (1986). Habitat and distribution of the foraminifer *Archaias angulatus* (Fichtel and Moll) (Miliolina, Soritidae), northern Florida Keys. *Journal of Foraminiferal Research*, *16*, 201-206.
- Molinares, C.E., Martínez, J.I., Fiorini, F., Escobar, J., Jaramillo, C.** (2012). Paleoenvironmental reconstruction for the lower Pliocene Arroyo Piedras section (Tubará – Colombia): Implications for the Magdalena River – paleodelta’s dynamic. *Journal of South American Earth Sciences*, *39*, 170-183.
- Ortiz-Moreno, M.L. & Acosta, N.** (2003). Inferencia de las condiciones ambientales de la playa “Pilón de azúcar” (Guajira, Colombia), a partir del conjunto de foraminíferos en una muestra de sedimento. *Acta Biológica Colombiana*, *8*(2), 13-22.
- Murray, J.W.** (1991). *Ecology and Paleoecology of Benthic Foraminifera*. Longman.
- Murray, J.W.** (2006). *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera*. Cambridge University Press.
- Nobes, K. Uthicke, S., Henderson, R.** (2008). Is light limiting factor for the distribution of benthic symbiont bearing foraminifera on the Great Barrier Reef? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *363*, 48-57.
- Parada-Ruffinatti, C.** 1996. *Foraminíferos del Pleistoceno – Holoceno del Caribe Colombiano*. Editora Guadalupe.
- Parada-Ruffinatti, C. & Londoño de Hoyos, C.** (1983). *Foraminíferos bentónicos recientes del Norte de Cartagena*. Editora Guadalupe.
- Parada-Ruffinatti, C. & Pinto, J.** (1986). *Foraminíferos bentónicos recientes de la Isla Barú*. FEN Colombia.
- Patarroyo, G., Torres, G., Gómez, D.** (2024). Foraminiferal assemblages as bioindicators In the Western Caribbean: Albuquerque Cay (Colombia). *Journal of Foraminiferal Research*, *54*(1), 36-48.

- Peebles, M.W., Hallock, P., Hine, A.** (1997). Benthic foraminiferal assemblages from current-swept carbonate platforms of the Northern Nicaraguan Rise, Caribbean Sea. *Journal of Foraminiferal Research*, 27(1), 42-50.
- Petters, V. & Sarmiento, S.** (1956). Oligocene and Lower Miocene biostratigraphy of the Carmen-Zambrano area, Colombia. *Micropaleontology*, 2(1), 7-35.
- Pisapia, C., El Kateb, A., Hallock, P., Spezzaferri, P.** (2017). Assessing coral reef health in the North Ari Atoll (Maldives) using the FoRAM index. *Marine Micropaleontology*, 133, 50-57.
- Pizarro, V., Rodríguez, S.C., López-Victoria, M., Zapata, F.A., Zea, S., Galindo-Martínez, C.T., Iglesias-Prieto, R., Pollock, J., Medina, M.** (2017). Unraveling the structure and composition of Varadero Reef, an improbable and imperiled coral reef in the Colombian Caribbean. *PeerJ*, 5, e411.
- Prazeres, M., Martínez-Colon, M., Hallock, P.** (2020). Foraminifera as bioindicators of water quality: The FoRAM Index revisited. *Environmental Pollution*, 257, 113612.
- Puyana, M., Acosta, A., Bernal-Sotelo, K., Velásquez-Rodríguez, T., Ramos, F.** (2015) Spatial scale of cyanobacterial blooms in Old Providence Island, Colombian Caribbean. *Universitas Scientiarum*, 20(1), 83-105.
- Ramírez, L.F.** (2016). Marine protected areas in Colombia: advances in conservation and barriers for effective governance. *Ocean Coastal Management*, 125, 49-62.
- Restrepo, J.D., Zapata, P., Díaz, J.M., Garzón-Ferreira, J., García, C.B.** (2006). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: the Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, 50, 33-49.
- Rincón-Martínez, D.A., Arenas, J.E. Cuartas, C.H., Cárdenas, A.L., Molinares, C.E., Caicedo, C., Jaramillo C.** (2007). Eocene–Pliocene planktonic foraminifera biostratigraphy from the continental margin of the southwest Caribbean. *Stratigraphy*, 4, 261-311.
- Rodríguez, L., Acosta, A., González-Zapata, F.L., Gómez-Corrales, L., Marrugo, M., Alvarado-Ch., E.M., Dueñas, L.F., Andrade, J., Gutiérrez-Cala, L., Sánchez, J.A.** (2023). Conservation at the edge: connectivity and opportunities from non-protected coral reefs close to a national park in the Colombian Caribbean. *Biodiversity and conservation*, 32, 1493-1522.
- Romero-Murillo, P., Gallego, J.L., Leignel, V.** (2023). Marine pollution and advances in biomonitoring in Cartagena Bay in the Colombian Caribbean. *Toxics*, 11, 631.
- Rose, P.R. & Lidz, B.** (1977). Diagnostic foraminiferal assemblages of shallow-water modern environments: south Florida and the Bahamas. *Sedimenta*, 6, 1-55.
- Salazar-Ortiz, E.A., Rincón-Martínez, D., Páez, L.A., Restrepo, S.M., Barragán, S.** (2020). Middle Eocene mixed carbonate-siliciclastic systems in the southern Caribbean (NW Colombian margin). *Journal of South American Earth Sciences*, 99, 102507.
- Sánchez, J., Zea S., & Díaz, J.** (1998) Patterns of octocoral and black coral distribution in the oceanic barrier reef-complex of Old Providence island, southwestern. *Caribbean Journal of Science*, 34(3-4), 250- 264.
- Sánchez, J.A., Gómez-Corrales, M., Gutiérrez-Cala, L., Vergara, D.C., Roa, P., González-Zapata, F.L., Gnecco, M., Puerto, N., Neira, L., Sarmiento, A.** (2019). Steady Decline of Corals and Other Benthic Organisms in the Seaflower Biosphere Reserve (Southwestern Caribbean). *Frontiers in Marine Science*, 6, 416927. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00073>
- Schueth, J.D. & Frank, T.D.** (2008). Reef foraminifera as bioindicators of coral reef health: Low Isles Reef, Northern Great Barrier Reef, Australia. *Journal of Foraminiferal Research*, 38(1), 11-22.
- Sen Gupta, B.K.** (1999). *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers.
- Stephenson, C.M., Hallock, P., & Kelmo, F.** (2015). Foraminiferal assemblage indices: A comparison of sediment and reef rubble samples from Conch Reef, Florida, USA. *Ecological Indicators*, 48, 1-7.
- Taylor, E., Baine, M., Killmer, A., Howard, M.** (2013). Seaflower marine protected area: governance for sustainable development. *Marine Policy*, 41, 57-64.
- Torres, G.A., Patarroyo, G.D., Veloza, G., Mora, J.A., Gómez, D.F.** (2022). Asociaciones de foraminíferos aglutinados de la Formación San Cayetano en el Cinturón Plegado de San Jacinto (Norte de Colombia). *Boletín de Geología*, 44(1), 75-92.
- Trejos-Tamayo, R., Garzón, D., Salazar-Ríos, A., Pardo-Trujillo, A., Flores, J. A.** (2024). Paleoaambientes en la parte central del Cinturón Plegado de San Jacinto (Caribe colombiano) entre el Eoceno tardío y el Mioceno Temprano: Inferencias a partir de foraminíferos bentónicos. *Boletín de Geología*, 46(3), 169-191.

- Trejos-Tamayo, R., Garzón-Oyola, D., Rodríguez-Abaunza, A., Frontalini, F., Betancur, J. P., Gallego, F., Pardo-Trujillo, A., Flores, J.A.** (2025). Late Eocene-early Miocene paleoenvironmental shifts in the NW south American margin: Tectonic and climatic drivers inferred from benthic foraminifera. *Global and Planetary Change*, 104744.
- Triffleman, N.J., Hallock, P., Hine, A.C.** (1992). Morphology, sediments, and depositional environments of a small carbonate platform; Serranilla Bank, Nicaraguan Rise, Southwest Caribbean Sea. *Journal of Sedimentary Research*, 62, 591-606.
- Triffleman N.J., Hallock, P., Hine, A.C., Peebles, M.W.** (1991). Distribution of foraminiferal tests in sediments of Serranilla Bank, Nicaraguan Rise, southwestern Caribbean. *Journal of Foraminiferal Research*, 21(1), 39-47.
- Uthicke, S., Thompson, A., Schaffelke, B.** (2010). Effectiveness of benthic foraminiferal and coral assemblages as water quality indicators on inshore reefs of the Great Barrier Reef, Australia. *Coral Reefs*, 29, 209-225.
- Velásquez, J., López-Angarita, J., Sánchez, J.A.** (2011). Evaluation of the FORAM index in a case of conservation: Benthic foraminifera as indicators of ecosystem resilience in protected and non-protected coral reefs of the southern Caribbean. *Biodiversity and Conservation*, 20, 3591-3603.
- Wilson, B.** (2006). The environmental significance of *Archaias angulatus* (Miliolida, Foraminifera) in sediments around Nevis, West Indies. *Caribbean Journal of Science*, 42(1), 20-23.
- Wilson, B. & Ramsook, A.** (2007). Population densities and diversities of epiphytal foraminifera on nearshore substrates, Nevis, West Indies. *Journal of Foraminiferal Research*, 37(3), 213-222.

Artículo original

## Utilización de subproductos lignocelulósicos para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. y *P. djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn en San Martín, Perú: una evaluación productiva y nutricional

### Utilization of lignocellulosic by-products for the cultivation of *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. y *P. djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn in San Martín, Perú: a productive and nutritional evaluation

✉ José Jaime Cayotopa-Torres<sup>1,\*</sup>, ✉ E. Hanz Rodríguez-Cabrera<sup>2</sup>,  
✉ Delmar Arbey Olivera-Cayotopa<sup>1</sup>, ✉ Héctor Guerra-Arévalo<sup>1</sup>, ✉ Felix Andi Eugenio-Quiroz<sup>1</sup>,  
✉ Dennis del Castillo-Torres<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Microorganismos Eficientes, Dirección de Bosques, Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, Tarapoto, Perú

<sup>2</sup>Laboratorio de Botánica Aplicada Jean-Christophe Pintaud, Dirección de Diversidad Biológica, Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana Tarapoto, Perú

## Resumen

El cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* representa una estrategia sostenible para la valorización de residuos lignocelulósicos en regiones agroforestales. En este estudio se evaluó el efecto productivo y nutricional de *Pleurotus ostreatus* (LMEPo-1) y *P. djamor* (LMEPd-1) utilizando rastrojo de maíz (*Zea mays*) (RM) y aserrín de yana bara (*Piptocoma discolor*) (AS), residuos abundantes en la región San Martín, Perú. Se analizaron las variables de eficiencia biológica, tasa de producción, rendimiento y composición proximal de los carpóforos. Los resultados mostraron que el sustrato RM 100 % combinado con *P. ostreatus* tuvo el mejor desempeño productivo, alcanzando una eficiencia biológica del 138,48 %, una tasa de producción del 2,53 % y un rendimiento del 22,53 %. En contraste, los tratamientos con AS 100 % permitieron producciones significativamente menores. La composición nutricional de los carpóforos también varió con el sustrato y la especie: *P. ostreatus* en RM 100 % se destacó por su alto contenido proteico (31,7 %) y de fibra cruda (25,2 %), mientras que *P. djamor* en AS 100 % tuvo mayor contenido de carbohidratos solubles (40,5 %). Se observó una influencia significativa de la interacción especie-sustrato sobre las variables evaluadas. Estos hallazgos respaldan el uso del rastrojo de maíz como sustrato eficiente y revalorizan su potencial en sistemas para el cultivo de especies comestibles del género *Pleurotus* con fines alimentarios, nutricionales y ambientales, promoviendo prácticas agrícolas circulares en la Amazonía peruana.

**Palabras clave:** Bioconversión fúngica; Hongos comestibles; Residuos agroindustriales; Sistemas alimentarios sostenibles.

## Abstract

The cultivation of edible mushrooms of the *Pleurotus* genus represents a sustainable strategy for valorizing lignocellulosic waste in agroforestry regions. Here, we evaluated the productive and nutritional performance of *Pleurotus ostreatus* (LMEPo-1) and *P. djamor* (LMEPd-1) using corn stover (*Zea mays*) (CS) and sawdust from yana bara (*P. discolor*) (SD), both abundant residues in the San Martín region of Perú. We analyzed variables such as biological efficiency, production rate, yield, and the proximate composition of fruiting bodies. The results showed that the CS 100% substrate combined with *P. ostreatus* exhibited the highest productive performance, reaching a biological efficiency of 138.48%, a production rate of 2.53%, and a yield of 22.53%. In contrast,

**Citación:** Cayotopa-Torres JJ, et al. Utilización de subproductos lignocelulósicos para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. y *P. djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn en San Martín, Perú: una evaluación productiva y nutricional. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):748-761, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3254>

**Editor:** Jairo Castaño Zapata

**\*Correspondencia:**

José Jaime Cayotopa-Torres;  
jcayotopa@iiap.gob.pe

**Recibido:** 14 de julio de 2025

**Aceptado:** 19 de agosto de 2025

**Publicado en línea:** 8 de octubre de 2025



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

treatments with SD 100% produced significantly lower outputs. The nutritional composition of the fruiting bodies also varied depending on the substrate and species: *P. ostreatus* grown on CS 100% stood out for its high protein (31.7%) and crude fiber (25.2%) content, while *P. djamor* on SD 100% had the highest content of soluble carbohydrates (40.5%). We confirmed the significant effect of species and substrate interaction for all the variables evaluated. These findings support the use of corn stover as an efficient substrate and highlight its potential in mushroom cultivation systems of *Pleurotus* species for food, nutritional, and environmental purposes, promoting circular agricultural practices in the Peruvian Amazon.

**Keywords:** Fungal bioconversion; Edible mushrooms; Agro-industrial waste; Sustainable food systems.

## Introducción

La diversidad mundial de hongos se estima entre 2,2 y 3,8 millones de especies, aunque solo unas 14.000 han sido descritas (Kaliyaperumal *et al.*, 2018; Rahimlou *et al.*, 2023). De ellas, alrededor de 700 poseen propiedades farmacológicas, unas 1.400 son letales y aproximadamente 7.000 se consideran comestibles (Kaliyaperumal *et al.*, 2018; Pérez-Montes *et al.*, 2021; Kothiyal *et al.*, 2022).

Los hongos comestibles de la división Basidiomycota son macrohongos que producen cuerpos fructíferos grandes, carnosos o gelatinosos que se han utilizado desde la antigüedad en la alimentación y en la medicina tradicional debido a su valor nutricional y propiedades terapéuticas (Wu *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Corpuz Jr. *et al.*, 2023). En la actualidad unas 200 especies se cultivan en laboratorio, cerca de 100 han sido domesticadas y alrededor de 60 se producen a nivel industrial. Entre las especies más destacadas se encuentran *Agaricus bisporus* (J.E.Lange) Imbach, *Lentinus edodes* (Berk.) Singer, *Auricularia auricula* (L.) Underw., *Flammulina velutipes* (Curtis) Singer, *Volvariella volvacea* (Bull.) Singer y especies del género *Pleurotus* (Wu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

El género *Pleurotus* incluye hongos comestibles con alto valor nutricional y propiedades medicinales. Son bajos en grasas, calorías y azúcares, pero ricos en proteínas, vitaminas y minerales, lo que los hace adecuados como alimentos funcionales, especialmente recomendables en dietas para personas con obesidad o diabetes (Bulam *et al.*, 2019; Fazoranti *et al.*, 2019). Se estima que su producción representa aproximadamente el 25 % del total de hongos cultivados a nivel mundial (Törös *et al.*, 2022), lo que demuestra su gran relevancia comercial. Este éxito se debe no solo a sus beneficios para la salud, sino también por su destacada capacidad ligninolítica, que les permite descomponer compuestos vegetales complejos y facilita su cultivo a gran escala en diversas regiones del mundo (Bellettini *et al.*, 2019).

Las especies del género *Pleurotus* constituyen una herramienta biotecnológica prometedora para mitigar el impacto ambiental generado por los residuos lignocelulósicos y agroalimentarios debido a su alta capacidad de biodegradación, su favorable perfil nutricional y su amplia adaptabilidad ecológica (Ritota & Manzi, 2019; Zapašnik *et al.*, 2025). Además, permiten valorizar estos desechos al transformarlos en biomasa fúngica comestible, lo que contribuye a la seguridad alimentaria (Ariyo, 2023).

Una de las principales ventajas del cultivo de *Pleurotus* spp. radica en su facilidad. A diferencia de *A. bisporus*, pueden producirse utilizando sustratos lignocelulósicos sin necesidad de compostarlos previamente, basta con picarlos, humedecerlos y esterilizarlos, lo que simplifica el proceso productivo (Raman *et al.*, 2021). Entre los sustratos comúnmente empleados se encuentran la paja de arroz, el bagazo de caña de azúcar, la paja de trigo, la cáscara de cacao, la de yuca, la cáscara y el tallo de maíz y el aserrín, entre otros (Fufa *et al.*, 2021; Doroški *et al.*, 2022).

En la Amazonía peruana las actividades agrícolas generan diversos subproductos agroindustriales y residuos vegetales con alto contenido nutricional, energético y proteico (Godoy *et al.*, 2021). La región San Martín en particular registra altos niveles de producción en cultivos como el arroz (797.767 t/anales), el cacao (56.136 t/anales), el

coco (9.867 t/anales), la palma aceitera (428.347 t/anales) y el maíz (110.450 t/anales), lo que conlleva la generación de grandes volúmenes de residuos agrícolas (**Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - MINAGRI**, 2019). El sector forestal también aporta residuos lignocelulósicos, como el aserrín, que constituyen fuentes energéticas de bajo costo (**Bernaola *et al.***, 2023). En este contexto, tanto los residuos agrícolas como los forestales constituyen una alternativa viable y ambientalmente sostenible como sustratos para el cultivo de especies del género *Pleurotus*, favoreciendo, además, el aprovechamiento eficiente de los subproductos disponibles en la región.

En el presente estudio nos propusimos evaluar el potencial productivo y nutricional del cultivo de dos especies de *Pleurotus*: *P. ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. y *P. djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn, utilizando subproductos lignocelulósicos disponibles en la región San Martín, Perú. Se seleccionaron residuos agrícolas y forestales representativos de la zona, con el fin de determinar su viabilidad como sustratos alternativos para la producción de biomasa fúngica comestible. Esta evaluación busca optimizar el aprovechamiento de materiales subutilizados y también contribuir al desarrollo de prácticas sostenibles que favorezcan la seguridad alimentaria y la valorización de residuos agroindustriales a nivel local.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Microorganismos Eficientes (LME) del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP), ubicado en la ciudad de Tarapoto, Perú. Esta zona se encuentra a una altitud de 324 m s.n.m. y presenta un clima estacionalmente cálido y húmedo, con temperaturas anuales que oscilan entre los 20 °C y los 39,8 °C (**Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi**, 2024). Durante el periodo de ejecución del estudio (septiembre a noviembre de 2024), se registraron temperaturas máximas de 34,20 °C y mínimas de 22,94 °C.

### Especies de cultivo

Las especies utilizadas en este estudio fueron *P. ostreatus* (Jacq.) P. Kumm (LPMPo-1) y *P. djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn (LPMPd-1), las cuales se adquirieron en la empresa Micelios, región Cusco. Una vez reactivadas en el LME del IIAP, se conservaron en refrigeración a 6 °C en el medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA) al 2,5 % (250 g papa, 1 L de agua destilada, 20 g de dextrosa y 18 g de agar-agar).

### Producción de semillas inoculantes

Para la preparación del inóculo, se emplearon semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.), las cuales se lavaron para desprender las impurezas y se hidrataron en agua durante 1 h. Después se escurrieron en un tamiz de plástico (28 cm x 16,50 cm x 7,70 cm), se colocaron en bolsas de polipropileno (35,56 cm x 60,96 cm x 2 µm) y se les añadió un 5 % p/p de hidróxido de calcio [Ca(OH)<sub>2</sub>]. Las bolsas se esterilizaron en una autoclave a 121 °C durante 45 min y luego se dejaron enfriar a temperatura ambiente en condiciones asépticas.

Después de haberse enfriado, las semillas fueron inoculadas con fragmentos de 1 cm<sup>2</sup> de agar previamente colonizado con las cepas LMEPo-1 y LMED-1 de *P. ostreatus* y *P. djamor*, respectivamente, bajo condiciones estériles dentro de una cabina de flujo laminar. Las bolsas inoculadas se incubaron a temperatura ambiente durante 25 días para permitir el crecimiento micelial de ambas especies.

### Preparación del sustrato y producción de carpóforos

Se emplearon residuos agrícolas y forestales como base para la formulación de los sustratos. En cuanto a los residuos agrícolas, se utilizó rastrojo de maíz (*Zea mays* L.) (RM), una fuente rica en carbono especialmente adecuada para el cultivo de especies de *Pleurotus* debido a su alto contenido de hemicelulosa (34,20 %), celulosa (28,10 %) y lignina (21,70 %) (**Zhou *et al.***, 2023). Como residuo forestal se empleó aserrín (AS) de *P. discolor* (Kunth) Pruski (conocido localmente como yana bara), una especie nativa de

rápido crecimiento abundante en los bosques secundarios de la Amazonía sudamericana, con alto potencial como fuente de biomasa y energía renovable (González *et al.*, 2023). Se evaluaron dos tratamientos con tres repeticiones cada uno: RM al 100 % y AS al 100 %.

El rastrojo de maíz se recolectó tras la cosecha en campos cercanos a la ciudad de Tarapoto y el aserrín se obtuvo del procesamiento de troncos de yana bara. En el laboratorio se fragmentó mecánicamente el rastrojo de maíz en segmentos de entre 1 y 5 cm de longitud. Ambos sustratos se dividieron en unidades de 1 kg (tres por tratamiento) y se hidrataron en un balde de 8 L con una solución al 2 % de hidróxido de calcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  durante 12 h y luego se escurrieron durante 4 h para posteriormente ser envasados en bolsas de polipropileno y esterilizados en autoclave a 121 °C durante 1 h; después se dejaron enfriar en condiciones asépticas a temperatura ambiente.

Una vez enfriados, los sustratos de RM y AS se inocularon con 5 % p/p de semillas de las dos especies de *Pleurotus*. Las bolsas inoculadas se incubaron en condiciones de oscuridad total a temperatura controlada ( $25 \pm 2$  °C). Cuando el micelio colonizó completamente los sustratos, las bolsas se trasladaron al módulo de cultivo del LME, donde se mantuvieron bajo condiciones de luz solar indirecta, temperatura controlada de  $25 \pm 2$  °C y humedad relativa entre el 85 y el 90 %. Se realizaron pequeños orificios en las bolsas para facilitar la aireación y estimular la aparición de los primordios y la formación de carpóforos (Figura 1).



**Figura 1.** Etapas del proceso de cultivo de *Pleurotus ostreatus* y *P. djamor* empleando rastrojo de maíz y aserrín como sustratos. **A.** Cultivo inicial del micelio en papa dextrosa agar (PDA). **B.** Preparación del inóculo mediante colonización de semillas de trigo. **C.** Sustrato previamente formulado y esterilizado. **D.** Inoculación del sustrato con el inóculo preparado. **E.** Desarrollo y colonización del micelio sobre el sustrato. **F.** Formación de primordios de *P. ostreatus*. **G.** Formación de primordios de *P. djamor*. **H.** Fructificación y maduración de carpóforos de *P. ostreatus*. **I.** Fructificación y maduración de carpóforos de *P. djamor*

### ***Eficiencia biológica, tasa de producción y rendimiento***

Para cada tratamiento, se registró el peso de los sustratos húmedos y el peso fresco de los carpóforos obtenidos en cada cosecha hasta el agotamiento del sustrato. Estos datos se emplearon para calcular los siguientes parámetros:

eficiencia biológica (EB), determinada como el porcentaje de conversión del sustrato seco en masa fresca de carpóforos según la siguiente fórmula (Roblero-Mejía et al., 2021):

$$EB (\%) = \left( \frac{\text{Peso fresco total de carpóforos (g)}}{\text{Peso seco del sustrato (g)}} \right) \times 100 \quad (1);$$

tasa de producción (TP), calculada como el rendimiento de carpóforos frescos por bolsa durante el tiempo total de producción mediante la fórmula (Jaramillo & Albertó, 2019):

$$TP (\%) = \frac{EB (\%)}{(\text{días de incubación} + \text{días de producción})} \quad (2);$$

tasa de producción diaria (TPD), estimada como el rendimiento promedio de carpóforos frescos por día durante el período efectivo de fructificación, considerando los días en los que se registró cosecha según la siguiente fórmula:

$$TPD (\text{g/día}) = \frac{\text{Peso total de carpóforos (g)}}{\text{Número de días de cosecha}} \quad (3), \text{ y}$$

rendimiento (R), determinado como la proporción entre el peso fresco de los carpóforos y el peso húmedo inicial del sustrato, expresado en porcentaje (Maccapa et al., 2024):

$$R (\%) = \left( \frac{\text{Peso fresco total de carpóforos (g)}}{\text{Peso húmedo del sustrato (g)}} \right) \times 100 \quad (4).$$

### ***Análisis de composición proximal de los carpóforos***

La determinación de la composición proximal, incluidos los contenidos de grasa, ceniza y proteína cruda, se hizo en el laboratorio agrícola del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT). Los análisis se efectuaron conforme a los procedimientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SSA1-1994 (Bienes y servicios. Alimentos y bebidas no alcohólicas con modificaciones en su composición. Especificaciones nutrimentales). Los resultados se expresaron como porcentaje (% p/p) del peso del material seco.

### ***Análisis de datos***

Mediante estadística descriptiva se calcularon los valores de media y desviación estándar. En los análisis inferenciales se utilizó un nivel de significación de  $\alpha = 0,05$ . Dado que las variables de respuesta presentaron distribución normal, estas se analizaron mediante modelos lineales (LM) en un diseño factorial con interacción. A las características de los carpóforos y a los valores de productividad se les aplicó un análisis de varianza (ANOVA) seguido de la prueba de Tukey para la comparación de medias. Todos los análisis se realizaron en el software RStudio versión 2025.05.0+496 (RStudio Team, 2025).

## **Resultados y Discusión**

### ***Producción de carpóforos y rendimiento de los sustratos***

En los tratamientos con sustratos RM 100 %, el tiempo promedio de incubación de las cepas LMEPo-1 y LMED-1 de *P. ostreatus* y *P. djamor* fue de 26 y 29 días, respectivamente (Tabla 1). Estos valores se encuentran dentro del rango reportado para las especies del género *Pleurotus*, cuyo tiempo de incubación varía entre 24 y 55,66 días, dependiendo de la especie cultivada (Raman et al., 2021; İnci et al., 2024). Durante esta fase, la temperatura ambiental influye directamente en la velocidad de desarrollo del micelio, en tanto que la luz no se requiere para dicho proceso.

En cuanto al periodo medio de producción, se registraron valores de 30 días para *P. ostreatus* (LPMPo-1) y de 30,33 días para *P. djamor* (LPMPd-1) en el mismo sustrato (**Tabla 1**), lo que evidenció un comportamiento productivo similar entre ambas especies bajo las condiciones evaluadas. Según **Belletini et al. (2019)**, factores como la temperatura del aire, la humedad relativa y la concentración de nutrientes en los sustratos pueden actuar sinérgicamente y favorecer la producción de hongos. Por lo tanto, el desempeño observado en estas especies podría atribuirse a una relación adecuada entre las condiciones de cultivo y los requerimientos fisiológicos de cada especie.

Los tratamientos con sustratos RM 100 % permitieron obtener al menos tres cosechas, en tanto que aquellos con AS 100 % solo produjeron dos. En términos de rendimiento, los tratamientos con RM también alcanzaron las mayores producciones promedio, con 1384,77 g para *P. ostreatus* (LPMPo-1) y 1008,48 para *P. djamor* (LPMPd-1) (**Tabla 1**). En la **Tabla 2** se muestra la comparación del tiempo de incubación, el periodo de producción y el peso promedio total obtenido en especies de *Pleurotus* reportadas en otros estudios, lo que sirve para contextualizar nuestros resultados.

El peso total de los carpóforos frescos presentó diferencias significativas en función del tipo de sustrato ( $F=63,19$ ;  $gl=1$ ;  $p=4,57e^{-05}$ ) y la especie empleada ( $F=5,45$ ;  $gl=1$ ;  $p=0,048$ ). El sustrato que generó el mayor aporte en la producción de carpóforos fue RM

**Tabla 1.** Producción total de carpóforos frescos (g) de *Pleurotus ostreatus* y *P. djamor* de acuerdo con el tratamiento evaluado

Tratamientos	DI	PP	1ª Co (%)	2ª Co (%)	3ª Co (%)	Peso total
<b><i>Pleurotus ostreatus</i> (Cepa LPMPo-1)</b>						
RM 100 %						
B2	26	32	679,99 (42,18)	631,04 (39,15)	301,03 (18,67)	1612,06 g
B3	26	18	634,80 (49,63)	644,36 (50,37)	-	1279,16 g
B5	26	40	573,43 (45,40)	419,25 (33,19)	270,40 (21,41)	1263,08 g
Promedio	26	30	629,41 g	564,88 g	285,72 g	1384,77 g
AS 100 %						
B2	42	18	288,60 (58,57)	204,13 (41,43)	-	492,73 g
B4	42	18	314,69 (58,73)	221,11 (41,27)	-	535,80 g
B5	45	19	277,72 (56,81)	211,12 (43,19)	-	488,84 g
Promedio	43	18,33	293,67 g	212,12 g	-	505,79 g
<b><i>Pleurotus djamor</i> (Cepa LPMPd-1)</b>						
RM 100 %						
B1	28	27	496,84 (43,52)	345,32 (30,21)	300,37 (26,27)	1142,53 g
B2	31	24	411,26 (35,86)	444,89 (38,83)	290,38 (25,31)	1146,53 g
B4	31	40	358,31 (48,64)	244,76 (33,29)	133,30 (18,07)	736,37 g
Promedio	29	30,33	422,14 g	344,99 g	241,35 g	1008,48 g
AS 100 %						
B2	35	28	267,40 (58,24)	191,70 (41,76)	-	459,10
B3	41	26	287,05 (57,38)	213,20 (42,62)	-	500,25
B4	37	18	245,42 (56,65)	187,81 (43,35)	-	433,23
Promedio	37,67	24	266,62	197,57	-	464,19

DI: días de incubación; PP: periodo de producción (desde el final de la incubación hasta el último día de cosecha); (%): proporción de cada cosecha

**Tabla 2.** Comparación de las condiciones de cultivo, duración de etapas y rendimiento total de *P. ostreatus* y *P. djamor* en diversos sustratos según estudios de los últimos cinco años

Especie	Sustrato	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Días de incubación	Días de producción	Peso total (g)	Referencia
<i>Pleurotus ostreatus</i>	RM 100 %	25 ± 2	85 – 90	26	30 ± 11,14	1384,77	Presente estudio
	AS 100 %	25 ± 2	85 – 90	43 ± 1,73	18,33 ± 0,58	505,79	Presente estudio
	desechos de jojoba	26 ± 3	80 ± 5	18,53 ± 2,06	51,04 ± 3,67	1049,8	Delgado et al., 2024
	paja de avena	13 - 15	60 – 70	38	65	796	Maccapa et al., 2024
	heno de totora	13 - 15	60 – 70	33	55	868	Maccapa et al., 2024
	broza de quinua	13 - 15	60 – 70	28	38	596	Maccapa et al., 2024
	paja de trigo	18 - 24	73 – 94	19	21	916,67	Vargas-Mendoza et al., 2024
	rastrojo de maíz	24	75 – 85	25	28	561,13	Lorenzana-Moreno et al., 2023
	mazorca de maíz	25	-	31	-	1441,18	Fufa et al., 2021
	paja de mijo	25	-	37	-	253,07	Fufa et al., 2021
	desecho de bambú	25	-	46	-	180,79	Fufa et al., 2021
	rastrojo de maíz	19,5 ± 2	85 – 90	24,1 ± 1,24	25,5 ± 1,3	238,9	García et al., 2021
	paja de avena	19,5 ± 2	85 – 90	26,5 ± 0,53	25,5 ± 1,3	258,1	García et al., 2021
	olote de maíz	25	80 – 90	21 - 35	-	94,5	Roblero-Mejía et al., 2021
	papel de desecho	25	-	33	-		Tesfay et al., 2020
<i>Pleurotus djamor</i>	RM 100 %	25 ± 2	85 – 90	29 ± 1,73	30,33 ± 8,5	1008,48	Presente estudio
	AS 100 %	25 ± 2	85 – 90	37,67 ± 3,06	24 + 5,29	464,19	Presente estudio
	desechos de jojoba	26 ± 3	80 ± 5	20	57,8 ± 0,75	721,2	Delgado et al., 2024
	paja de trigo	25	80	29	-	308	Dwivedi et al., 2024
	paja de trigo	25 ± 1	80 – 85	37,5 ± 1,90	90,5 ± 7,3	90	Ínci et al., 2024
	tallos de quinua	25 ± 1	80 – 85	32,1 ± 2,34	50 ± 7,4	176,25	Ínci et al., 2024
	rastrojo de maíz	24	75 – 85	25	28	525	Lorenzana-Moreno et al., 2023
	paja de arroz	25	90	9 – 21	32 – 47	35,67	Sindhu et al., 2023
	olote de maíz	25	80 – 90	21 - 35	-	129,1	Roblero-Mejía et al., 2021

100 %, con un promedio de 1196,63 g. La relación *P. ostreatus* (LMEPo-1)/RM 100 % registró el valor más alto, con un peso promedio de 1384,77 g de carpóforos frescos (Tabla 3). Estos resultados coinciden con lo reportado en estudios previos que destacan la gran eficiencia productiva del rastrojo de maíz como sustrato base para el cultivo de especies de *Pleurotus* debido a su adecuada composición lignocelulósica y disponibilidad de nutrientes (Lorenzana-Moreno et al., 2023).

En cuanto al peso total de los carpóforos secos, se observó una influencia significativa del tipo de sustrato ( $F=56,09$ ;  $gl=1$ ;  $p=7e^{-05}$ ), de la especie ( $F=21,54$ ;  $gl=1$ ;  $p=0,002$ ), y de la interacción especie/sustrato ( $F=11,49$ ;  $gl=1$ ;  $p=0,01$ ). La relación *P. ostreatus* (LMEPo-1)/RM 100 % también obtuvo el mayor promedio en esta variable, alcanzando 180,78 g de carpóforo seco. No obstante, para la especie *P. djamor* (LMEPd-1) no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (Tabla 3), lo cual sugiere su menor sensibilidad a las variaciones en el tipo de sustrato en lo que respecta a la producción de biomasa seca.

Asimismo, se detectaron diferencias entre los sustratos en la proporción de humedad del carpóforo ( $F=10,09$ ;  $gl=1$ ;  $p=0,01$ ) y en la proporción de masa seca ( $F=9,58$ ;  $gl=1$ ;  $p=0,015$ ). Sin embargo, al analizar estas variables por especie, no se identificaron diferencias

significativas entre los tratamientos para ninguna de las dos especies (**Tabla 3**), lo que indica que, si bien el sustrato influye en la composición hídrica del carpóforo, dicha variación no se manifiesta consistentemente entre especies.

Estos resultados refuerzan la importancia de seleccionar adecuadamente tanto la especie como el sustrato en función de los objetivos productivos del cultivo, de manera que permiten convertir los residuos lignocelulósicos de los campos agrícolas y de los bosques en biomasa rica en proteínas (**Besufekad et al.**, 2020). En este caso, el sustrato RM 100 % combinado con la cepa *P. ostreatus* (LMEPo-1) representó una opción muy eficiente en términos de rendimiento en peso fresco y seco, lo que la convierte en una alternativa prometedora para escalas de producción comercial.

La eficiencia biológica (EB) se vio significativamente influenciada por el tipo de sustrato ( $F=63,20$ ;  $gl=1$ ;  $p=4,57e^{-05}$ ), mientras que la especie influyó en menor medida y sin significación estadística ( $F=5,45$ ;  $gl=1$ ;  $p=0,48$ ). El valor más alto de EB se registró en la relación *P. ostreatus* (LMEPo-1)/ RM 100 %, con un promedio de 138,48 %, seguido de *P. djamor* (LMEPd-1)/ RM 100 % con 100,85 % (**Tabla 4**). Estos resultados respaldan el notable potencial del rastrojo de maíz (RM) como sustrato eficiente para el cultivo de ambos hongos, ya que se superó ampliamente el 40 % de EB sugerido por **Gume et al.** (2013) como criterio mínimo para recomendar un sustrato en la producción de *Pleurotus*, aunque se han reportado eficiencias superiores a la de este estudio en otros materiales, como el papel de desecho, con 179,2 % (**Tesfay et al.**, 2020). Por otro lado, sustratos como el AS 100 % mostraron rendimientos considerablemente bajos, con valores de 50,58 % para *P. ostreatus* (LMEPo-1) y 46,42 % para *P. djamor* (LMEPd-1) (**Tabla 4**), mientras que otros residuos lignocelulósicos como el olote de maíz reportaron incluso menores eficiencias, por ejemplo, el 33,2 % registrado por **Roblero-Mejía et al.** (2021) para *P. djamor*, lo que sugiere un aprovechamiento subóptimo de estos materiales por las especies evaluadas en el estudio (**Tabla 5**).

**Tabla 3.** Características de los carpóforos de *Pleurotus ostreatus* y *P. djamor* según los tratamientos

Especies	Peso total del carpóforo fresco (g)		
	RM 100 %	AS 100 %	Promedio
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	1384,77 ± 197,01 <sup>a</sup>	505,79 ± 26,06 <sup>b</sup>	945,28
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	1008,48 ± 235,66 <sup>a</sup>	464,19 ± 33,80 <sup>b</sup>	736,34
Promedio	1196,63	484,99	
Peso total del carpóforo seco (g)			
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	180,78 ± 3,73 <sup>a</sup>	57,18 ± 0,78 <sup>b</sup>	118,98
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	89,54 ± 39,09 <sup>a</sup>	42,95 ± 2,56 <sup>a</sup>	66,25
Promedio	135,16	50,07	
Proporción de humedad del carpóforo (%)			
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	86,79 ± 1,60 <sup>a</sup>	88,69 ± 0,64 <sup>a</sup>	87,74
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	87,05 ± 1,38 <sup>a</sup>	89,22 ± 0,19 <sup>a</sup>	88,14
Promedio	86,92	88,96	
Proporción de masa seca del carpóforo (%)			
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	12,94 ± 1,47 <sup>a</sup>	11,31 ± 0,64 <sup>a</sup>	12,26
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	12,95 ± 1,38 <sup>a</sup>	10,78 ± 0,19 <sup>a</sup>	11,87
Promedio	12,95	11,05	

Los valores con letras diferentes presentan diferencias significativas entre sí ( $p < 0,05$ , Tukey)

**Tabla 4.** Eficiencia biológica, tasa de producción y rendimiento alcanzados por las dos especies de *Pleurotus* en los sustratos evaluados

Especies	Eficiencia biológica (%)		
	RM 100 %	AS 100 %	Promedio
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	138,48 ± 19,70 <sup>a</sup>	50,58 ± 2,61 <sup>b</sup>	96,34
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	100,85 ± 23,56 <sup>a</sup>	46,42 ± 3,38 <sup>b</sup>	79,33
Promedio	119,67	48,5	
Tasa de producción (%)			
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	2,53 ± 0,54 <sup>a</sup>	0,82 ± 0,07 <sup>b</sup>	1,68
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	1,61 ± 0,53 <sup>a</sup>	0,75 ± 0,03 <sup>a</sup>	1,18
Promedio	2,07	0,79	
Tasa de producción diaria (g/día)			
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	61,34 ± 28,33 <sup>a</sup>	35,35 ± 2,84 <sup>a</sup>	48,35
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	35,32 ± 14,62 <sup>a</sup>	24,27 ± 6,06 <sup>a</sup>	29,80
Promedio	48,33	29,81	
Rendimiento (%)			
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	22,53 ± 2,79 <sup>a</sup>	10,13 ± 0,50 <sup>b</sup>	16,63
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	16,43 ± 5,52 <sup>a</sup>	9,55 ± 0,65 <sup>b</sup>	13,90
Promedio	20,68	9,85	

Los valores con letras diferentes presentan diferencias significativas entre sí ( $p < 0,05$ , Tukey)

La tasa de producción también se vio influenciada por el tipo de sustrato ( $F=34,06$ ;  $gl=1$ ;  $p=0,0004$ ). La relación *P. ostreatus* (LMEPo-1)/RM 100 % registró el valor más alto, con 2,53 %, superando a la otra especie y sustrato (**Tabla 4**). Sin embargo, a nivel de especie, en *P. djamor* (LMEPd-1) no se encontraron diferencias entre los tratamientos (**Tabla 4**). Según **García et al.** (2021), este resultado supera los valores reportados para *P. ostreatus* cultivado en paja de avena (*Avena sativa* L.) (1,78 %) y rastrojo de maíz (1,99 %), así como los valores obtenidos para *P. djamor* en paja de arroz (*Oryza sativa* L.) (1,46–2,42 %) (**Sindhu et al.**, 2023). En contraste, la TP más baja se registró para *P. djamor* cultivada sobre paja de trigo, con solo el 0,15 % (**Ínci et al.**, 2024), lo que podría atribuirse a condiciones de cultivo desfavorables o a una baja afinidad entre la especie y ese sustrato específico (**Tabla 5**).

En cuanto a la tasa de producción diaria (TPD), aunque no se detectaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), se observaron tendencias relevantes. El sustrato RM 100 % mostró mayor TPD, con un promedio de 48,33 %, alcanzando su valor máximo en la relación *P. ostreatus* (LMEPo-1)/RM 100 %, con 61,34 % (**Tabla 4**), lo que indica una elevada eficiencia temporal de producción. En contraste, sustratos como los desechos de jojoba [*Simmondsia chinensis* (Link) C.K. Scheined], a pesar de mostrar una buena duración productiva (51–57 días), presentaron valores más bajos de TPD (<1 %), evidenciando una producción más lenta, aunque sostenida (**Delgado et al.**, 2024).

El rendimiento también varió de forma significativa tanto entre sustratos ( $F=53,49$ ;  $gl=1$ ;  $p=8,28e^{-05}$ ) como entre especies ( $F=6,40$ ;  $gl=1$ ;  $p=0,04$ ), siendo el sustrato RM 100 % el que presentó el mayor promedio (20,68 %), destacándose la relación *P. ostreatus* (LMEPo-1)/RM 100 %, con un valor de 22,53 % (**Tabla 4**). Este rendimiento fue superior al registrado en otros sustratos como el rastrojo de maíz (16,03 %), la broza de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) (17,03 %) y los desechos de jojoba (11,87 %), e incluso

**Tabla 5.** Comparación de la eficiencia biológica (EB), tasa de producción (TP) y rendimiento (R) de *Pleurotus ostreatus* y *P. djamor* en distintos sustratos con lo reportado en estudios de los últimos cinco años

Especie	Sustrato	Eficiencia biológica (%)	Tasa de producción (%)	Rendimiento (%)	Referencia
<i>Pleurotus ostreatus</i>	RM 100 %	138,48	2,53	22,53	Presente estudio
	AS 100 %	50,58	0,82	10,13	Presente estudio
	desechos de jojoba	33,91	0,65	11,87	Delgado <i>et al.</i> , 2024
	paja de avena	79,60	1,07	24,11	Maccapa <i>et al.</i> , 2024
	heno de totora	86,80	1,30	22,25	Maccapa <i>et al.</i> , 2024
	broza de quinua	59,60	0,90	17,03	Maccapa <i>et al.</i> , 2024
	paja de trigo	35,17	0,87	8,79	Vargas-Mendoza <i>et al.</i> , 2024
	rastrojo de maíz	48,38	0,91	16,03	Lorenzana-Moreno <i>et al.</i> , 2023
	mazorca de maíz	41,07	-	28,82	Fufa <i>et al.</i> , 2021
	paja de mijo	50,20	-	5,06	Fufa <i>et al.</i> , 2021
	desecho de bambú	35,07	-	3,62	Fufa <i>et al.</i> , 2021
	rastrojo de maíz	119,5	1,99	23,89	García <i>et al.</i> , 2021
	paja de avena	129,1	1,78	25,81	García <i>et al.</i> , 2021
	olote de maíz	24,6	0,3	9,5	Roblero-Mejía <i>et al.</i> , 2021
	papel de desecho	179,2	-	11,94	Tesfay <i>et al.</i> , 2020
<i>Pleurotus djamor</i>	RM 100 %	100,85	1,61	16,43	Presente estudio
	AS 100 %	46,42	0,75	9,55	Presente estudio
	paja de cebada	40,67	0,46	3,23	Aguilar-Ventura <i>et al.</i> , 2025
	hoja de caña de azúcar	42,28	1,75	5,25	Aguilar-Ventura <i>et al.</i> , 2025
	rastrojo de maíz	74,07	2,17	7,59	Aguilar-Ventura <i>et al.</i> , 2025
	desechos de jojoba	28,64	0,55	10,03	Delgado <i>et al.</i> , 2024
	paja de trigo	14,11	0,15	12	İnci <i>et al.</i> , 2024
	tallos de quinoa	27,65	0,55	23,5	İnci <i>et al.</i> , 2024
	rastrojo de maíz	45,7	0,86	15	Lorenzana-Moreno <i>et al.</i> , 2023
	paja de arroz	99,5	1,46 - 2,42	14,26	Sindhu <i>et al.</i> , 2023
	olote de maíz	33,2	0,5	12,9	Roblero-Mejía <i>et al.</i> , 2021

comparable a materiales tradicionalmente eficaces como la paja de avena (25,81 %) o el heno de totora [*Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey) Soják] (22,25 %). En contraste, sustratos como la paja de mijo (*Panicum miliaceum* L.) (5,06 %), el bambú (*Bambusa vulgaris* L.) (3,62 %) y el papel de desecho (11,94 %) mostraron rendimientos considerablemente bajos, probablemente por limitaciones nutricionales o físicas (Tabla 5). Estos resultados evidencian que la eficiencia del rendimiento depende fuertemente de la interacción entre el tipo de sustrato y la especie utilizada, y posicionan el RM 100 % como una alternativa efectiva y sostenible para la producción de *Pleurotus*.

Por último, se encontraron diferencias significativas en el peso húmedo de los sustratos luego del proceso de hidratación ( $F=230,77$ ;  $gl=1$ ;  $p=3,52e-07$ ), observándose que el sustrato RM 100 % fue el que alcanzó el mayor peso tras 12 horas de humectación, con un promedio de 6128,34 g, frente a 4923,34 g registrados en AS 100 % (Tabla 6). Este comportamiento sugiere una mayor capacidad de retención de agua por parte del RM, lo cual podría estar relacionado con su porosidad, estructura fibrosa o composición

**Tabla 6.** Incremento en el contenido de humedad en 1000 g de sustrato en *Pleurotus ostreatus* y *P. djamor*

Especies	Peso húmedo del sustrato (g)		
	RM 100 %	AS 100 %	Promedio
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	6136,67 ± 120,14 a	4996,67 ± 145,72 b	5566,67
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	6120 ± 180,83 a	4850 ± 85,44 b	5485
Promedio	6128,34	4923,34	

Los valores con letras diferentes presentan diferencias significativas entre sí (p<0,05, Tukey)

lignocelulósica, lo que favorecería un entorno más adecuado para el desarrollo del micelio. Estos resultados resaltan la importancia de considerar las propiedades fisicoquímicas del sustrato, ya que una mayor disponibilidad de agua puede influir positivamente en los procesos de colonización, fructificación y rendimiento del cultivo de *Pleurotus* (Zárate-Salazar et al., 2020; Zubairi et al., 2022).

#### Composición proximal de los carpóforos

El análisis de la composición proximal de los carpóforos evidenció diferencias notables entre las especies y los sustratos utilizados (Tabla 7). La especie *P. djamor* (LMEPd-1) cultivada en AS 100 % sobresalió por su alto contenido de carbohidratos solubles (40,5 %) y humedad (89,22 %), lo que sugiere una mayor acumulación de compuestos energéticos solubles, aunque con una menor concentración de proteínas (22,4 %) en comparación con el cultivo en RM 100 % (36,7 %), donde también presentó un contenido intermedio de fibra cruda (17,5 %). En contraste, *P. ostreatus* (LMEPo-1) mostró en RM 100 % el mayor contenido proteico (31,7 %) y de fibra cruda (25,2 %), parámetros deseables desde el punto de vista nutricional, mientras que en AS 100 % presentó un perfil más equilibrado con mayores carbohidratos solubles (23,7 %) y fibra cruda moderada (18,6 %). En términos generales, los niveles de aceites y grasas se mantuvieron relativamente homogéneos entre especies y sustratos, sin variaciones sustanciales (entre 9,7 y 11,4 %).

Al comparar estos resultados con los estudios de Raman et al. (2021) e İnci et al. (2024), los valores de proteína y fibra de *P. ostreatus* (LMEPo-1) en RM 100 % se situaron por encima del promedio reportado para *P. djamor* y *P. ostreatus*, lo que resalta el potencial nutricional de esta combinación. Así, los datos evidencian que tanto el tipo de sustrato como la especie influyen significativamente en la calidad nutricional de los carpóforos, lo que permite direccionar el cultivo hacia perfiles deseados según su uso final.

**Tabla 7.** Composición proximal de los carpóforos de *Pleurotus ostreatus* y *P. djamor* cosechados en sustratos de rastrojo de maíz (RM 100 %) y aserrín (AS 100 %)

Cepa	Sustrato	Composición proximal					
		Humedad (%)	Aceites y grasas (%)	Fibra cruda (%)	Cenizas (%)	Proteína (%)	Carbohidratos solubles (%)
<i>Pleurotus ostreatus</i> (LMEPo-1)	RM 100 %	86,79	11,4	25,2	4,2	31,7	12,3
	AS 100 %	88,69	9,7	18,6	3,1	24,5	23,7
<i>Pleurotus djamor</i> (LMEPd-1)	RM 100 %	87,05	10,8	17,5	2,9	36,7	18,0
	AS 100 %	89,22	10,9	10,0	1,7	22,4	40,5

## Conclusiones

El estudio demostró que el cultivo de especies del género *Pleurotus* utilizando subproductos lignocelulósicos de la región San Martín representa una alternativa productiva, sostenible y de alto valor nutricional. Entre los sustratos evaluados, el rastrojo de maíz (RM 100 %) combinado con la especie *P. ostreatus* (LMEPo-1) presentó el mejor desempeño, con altos valores de eficiencia biológica, tasa de producción y contenido proteico, superando significativamente al aserrín de yana bara (AS 100 %). Aunque el aserrín mostró un perfil nutricional con mayor proporción de carbohidratos solubles, su rendimiento fue limitado en ambas especies. Además, se evidenció que la interacción entre el tipo de sustrato y la especie influye de manera significativa en los resultados de productividad y composición proximal de los carpóforos. Estos hallazgos resaltan la importancia de seleccionar estratégicamente los insumos de cultivo y validan el potencial de las especies de *Pleurotus* como herramienta biotecnológica para la valorización de residuos agroindustriales y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles en esta región de la Amazonía peruana.

## Agradecimientos

Agradecemos al Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) por las facilidades brindadas y la prestación del servicio de análisis de la composición proximal de los carpóforos, así como a la empresa Micelios por la provisión de las especies de *Pleurotus* empleadas en el presente estudio.

## Contribución de los autores

**JJCT**: concepción del trabajo, dirección de la investigación, toma de datos, análisis y discusión de los resultados, redacción del manuscrito; **EHRC**: asesoría de diseño metodológico del trabajo, investigación, análisis de datos, análisis y discusión de los resultados, revisión y redacción del manuscrito; **DAOC**: toma de datos, redacción del manuscrito. Todos los autores revisaron los resultados, y corrigieron y aprobaron la versión final del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## Referencias

- Aguilar-Ventura, D. A., Serna-Lagunes, R., Aguilar-Rivera, N., Mata, G., Zetina-Córdoba, P., Llarena-Hernández, R. C.** (2025). Capacidad productiva de cepas nativas de *Pleurotus djamor* en Veracruz, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 12(1), e4115. <https://doi.org/10.19136/era.a12n1.4115>
- Ariyo, O. O.** (2023). Edible Mushrooms: their Impact on Food Security. *FUOYE Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(2), 57-68. <https://doi.org/10.55518/fjpas.QBCF1374>
- Bellettini, M. B., Fiorda, F. A., Maieves, H. A., Teixeira, G. L., Ávila, S., Hornung, P. S., Júnior, A. M., Ribani, R. H.** (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 633-646. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
- Bernaola, R. I., Flores, C. E., Parada, D. C., Rodríguez, U. F.** (2023). Energy potential of agricultural and forestry by-Products in Peru. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 10(1), 1-8. <https://doi.org/10.30501/jree.2022.323731.1310>
- Besufekad, Y., Mekonnen, A., Girma, B., Daniel, R., Tassema, G., Melkamu, J., Asefa, M., Fikiru, T., Denboba, L.** (2020). Selection of appropriate substrate for production of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Journal of Yeast and Fungal Research*, 11(1), 15-25. <https://doi.org/10.5897/JYFR2019.0187>
- Bulam, S., Üstün, N. Ş., Pekşen, A.** (2019). Evaluation of nutritional and medicinal values of edible wild and cultivated *Pleurotus ostreatus*. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7(12), 2054-2061. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i12.2054-2061.2730>

- Corpuz Jr., J. C., De la Cruz, J. G., Magallanes, R., Laforteza, J. V. R.** (2023). A Review on benefits, cultivation and biodiversity of macrofungi. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4(11), 1586-1592. <https://doi.org/10.55248/gengpi.4.1123.113103>
- Delgado, N., Miranda, V., Barros, J., Isla, M. I., Fracchia, S.** (2024). Exploring local lignocellulosic substrates for the production of edible mushrooms in Northwestern Argentina. *Lilloa*, 61(2), 317-339. <https://doi.org/10.30550/j.lil/1973>
- Doroški, A., Klaus, A., Jambak, A. R., Djekic, I.** (2022). Food waste originated material as an alternative substrate used for the cultivation of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*): A Review. *Sustainability*, 14, 12509. <https://doi.org/10.3390/su141912509>
- Dwivedi, S., Singh, B., Singh, A. K., Singh, V. K.** (2024). Cultivation of oyster mushroom (*Pleurotus djamor*) by using different substrates in laboratory conditions. *KAVAKA*, 60(3), 1-6. <https://doi.org/10.36460/Kavaka/60/3/2024/1-6>
- Fasoranti, O. F., Ogidi, C. O., Oyetayo, V. O.** (2019). Nutrient contents and antioxidant properties of *Pleurotus* spp. cultivated on substrate fortified with Selenium. *Current Research in Environmental & Applied Mycology*, 9(1), 66-76. <https://doi.org/10.5943/cream/9/1/7>
- Fufa, B. K., Tadesse, B. A., Tulu, M. M.** (2021). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* on agricultural wastes and their combination. *International Journal of Agronomy*, 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2021/1465597>
- García, N. D., Ramos, M. A., Rubalcava, I., Caratachea, I. L., Flores, A.** (2021). Adición de alfalfa deshidratada como suplemento nutricional de los sustratos paja de avena y rastrojo de maíz en la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Sociedades Rurales, Producción y Medio ambiente*, 41, 77-86.
- Godoy, D., Gonzáles, J., Roque, R., Fernández, M., Gamarra, S., Hidalgo, V., Gómez, C.** (2021). Use of unconventional agro-industrial by-products for supplementation of grazing dairy cattle in the Peruvian Amazon region. *Tropical Animal Health and Production*, 53, 294. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02718-y>
- González, J. E., Oliva, D., Romero, A. S., Ledesma, R. D., Coronel, B. D., Abreu-Naranjo, R.** (2023). Thermogravimetric characteristics and kinetic modeling of *Piptocoma discolor* pyrolysis and combustion processes to contribute to its use as a renewable energy source in the Ecuadorian Amazon region. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 15761-15768. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02178-2>
- Gume, B., Muleta, D., Abate, D.** (2013). Evaluation of locally available substrates for cultivation of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) in Jimma, Ethiopia. *African Journal of Microbiology Research*, 7(20), 2228-2237. <https://doi.org/10.5897/ajmr12.895>
- İnci, S., Kirbağ, S., Akyüz, M.** (2024). Valorization of local agro-residues for the cultivation of *Pleurotus djamor* (Rumph. Ex Fr.) Boedijn and their effects on nutritional value. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05515-3>
- Jaramillo, S. & Albertó, E.** (2019). Incremento de la productividad de *Pleurotus ostreatus* mediante el uso de inóculo como suplemento. *Scientia Fungorum*, 49, e1243. <https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1243>
- Kaliyaperumal, M., Kezo, K., Gunaseelan, S.** (2018). A global overview of edible mushrooms. En B. P. Singh, Lallawmsanga y A. K. Passari (Eds.) *Biology of Macrofungi* (15-56). Fungal Biology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-02622-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02622-6_2)
- Kothiyal, G., Singh, K., Kumar, A., Juyal, P., Guleri, G.** (2022). Wild macrofungi (Mushrooms) diversity occurrence in the forest of Uttarakhand, India. *International Journal of Botany Studies*, 7(1), 567-578.
- Lorenzana-Moreno, A. V., Leal, H., Corona, L., Granados, O., Márquez-Mota, C. C.** (2023). Production of 17 strains of edible mushroom grown on corn stover and its effect on the chemical composition and ruminal in vitro digestibility of the residual substrate. *PLoS ONE*, 18(5), e0286514. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286514>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - MINAGRI.** (2019). Anuario estadístico de la producción agrícola 2018. Ministerio de Agricultura y Riego, Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/midagriinformes-publicaciones/2730325-compendio-anual-de-produccion-agricola>
- Pérez-Montes, A., Rangel-Vargas, E., Lorenzo, J. M., Romero, L., Santos, E. M.** (2021). Edible mushrooms as a novel trend in the development of healthier meat products. *Current Opinion in Food Science*, 37, 118-124. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.004>

- Maccapa, L. M., Palao, L. A., Chura, E. J.** (2024). Producción de hongo ostra [*Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm] sobre residuos lignocelulósicos en la provincia de Puno. *Revista de Ciencias Agrarias*, 9(1), 16-22.
- Rahimlou, S., Moghaddam, M. H., Nezhad, A.-M. H., Heidari, B., Bahram, M.** (2023). A checklist and worldwide distribution patterns of macrofungi in Iran. *Mycological Progress*, 22(4). <https://doi.org/10.1007/s11557-022-01863-4>
- Raman, J., Jang, K.-Y., Oh, Y.-L., Oh, M., Im, J.-H., Lakshmanan, H., Sabaratnam, V.** (2021). Cultivation and nutritional value of prominent *Pleurotus* spp.: An Overview. *Mycobiology*, 49(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/12298093.2020.1835142>
- Ritota, M. & Manzi, P.** (2019). *Pleurotus* spp. Cultivation on different agri-food by-products: Example of biotechnological application. *Sustainability*, 11(18), 5049. <https://doi.org/10.3390/su11185049>
- Roblero-Mejía, D. O., Aguilar-Marcelino, L., Sánchez, J. E.** (2021). Efecto de la variación del sustrato en la productividad de dos cepas de *Pleurotus* spp. *Scientia Fungorum*, 52, e1377. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.52.1377>
- RStudio Team.** (2025). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi.** (2024). Condiciones climáticas e hidrológicas actuales y perspectivas en el departamento de San Martín (setiembre – noviembre 2024). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/3759>
- Sindhu, S., Theradimani, M., Vellaikumar, S., Paramasivam, M., Ramamoorthy, V.** (2023). Development of novel rapid-growing and delicious *Pleurotus djamor* strains through hybridization. *Archives of Microbiology*, 206, 13. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03739-x>
- Tesfay, T., Godifey, T., Mesfin, R., Kalayu, G.** (2020). Evaluation of waste paper for cultivation of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) with some added supplementary materials. *AMB Express*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-020-0945-8>
- Törös, G., El-Ramady, H., Prokisch, J.** (2022). Edible Mushroom of *Pleurotus* spp.: A case study of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.). *Environment, Biodiversity & Soil Security*, 6, 51-59. <https://doi.org/10.21608/jenvbs.2022.117554.1161>
- Vargas-Mendoza, Y., Santiago-García, P. A., Soto-Castro, D., Gaitán-Hernández, R.** (2024). Establecimiento de una unidad de producción familiar de *Pleurotus* spp. en una comunidad rural de Oaxaca, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 21(4), 523-535. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i4.1660>
- Wu, F., Zhou, L.-W., Yang, Z. L., Bau, T., Li, T.-H., Dai, Y.-C.** (2019). Resource diversity of Chinese macrofungi: edible, medicinal and poisonous species. *Fungal Diversity*, 98, 1-76. <https://doi.org/10.1007/s13225-019-00432-7>
- Yu, Q., Guo, M., Zhang, B., Wu, H., Zhang, Y., Zhang L.** (2020). Analysis of nutritional composition in 23 kinds of edible fungi. *Journal of Food Quality*, 2020, 821315. <https://doi.org/10.1155/2020/821315>
- Zapašnik, A., Bryła, M., Sokółowska, B., Waśkiewicz, A.** (2025). *Pleurotus* spp.—an effective way in degradation mycotoxins? A comprehensive review. *Mycotoxin Research*, 41, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12550-024-00572-z>
- Zárate-Salazar, J. R., Santos, M. N., Muñoz, E. N., Gomes, O., Palomo, A. A.** (2020). Use of lignocellulosic corn and rice wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* Jacq.) cultivation. *SN Applied Sciences*, 2, 1904. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03720-z>
- Zhang, Y., Wang, D., Chen, Y., Liu, T., Zhang, S., Fan, H., Liu, H., Li, Y.** (2021). Healthy function and high valued utilization of edible fungi. *Food Science and Human Wellness*, 10(4), 408-420. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.04.003>
- Zhou, Y., Li, Z., Xu, C., Pan, J., Zhang, H., Hu, Q., Zou, Y.** (2023). Evaluation of corn stalk as a substrate to cultivate king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*). *Horticulturae*, 9, 319. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030319>
- Zubairi, S. I., Md Zabidi, N. A. S., Azman, Z. Z., Mohd Kamaruddin, S. N. D., Mohd Kasim, Z., Mat Lazim, A., Nurzahim, Z., Md Jamil, M. S.** (2022). *Pleurotus ostreatus* cultivation: Physico-chemical characteristics of a robust pre-blocks oyster mushroom substrate with absorptive starch binders. *Sains Malaysiana*, 51(2), 329-343. <https://doi.org/10.17576/jsm-2022-5102-01>

Artículo original

## Inmunidad innata y funciones antimicrobianas del capullo durante la estivación de los peces pulmonados

### Innate immunity and antimicrobial functions of the cocoon during aestivation in lungfish

 Luis F. García

Grupo de Inmunología Celular e Inmunogenética (GICIG), Facultad de Medicina, Sede de Investigación Universitaria, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

#### Resumen

El paso de los vertebrados de la vida acuática a la terrestre, ocurrido hace 400 millones de años durante el Devoniano, es uno de los eventos más importantes de la evolución animal. Los peces pulmonados, o dipnoos, son los peces vivos más cercanos a los tetrápodos terrestres y su estudio es fundamental para entender la terrenalización y posterior radiación de los vertebrados a los múltiples ecosistemas terrestres. Estos peces poseen los genomas animales más grandes conocidos hasta ahora, con genes necesarios tanto para la vida acuática como para la terrestre. Los peces pulmonados de África (*Protopterus sp.*) y Suramérica (*Lepidosiren paradoxa*) tienen la capacidad de estivar en las temporadas de sequía y entrar en un estado de sopor en el que disminuyen muchas de sus actividades metabólicas y respiran aire. Durante la estivación están expuestos a múltiples microorganismos presentes en el lodo circundante, pero en el caso de los *Protopterus sp.*, exhiben un capullo que actúa como una barrera inmunológica en la que se localizan granulocitos que desarrollan las trampas extracelulares de neutrófilos (NETs), donde quedan atrapados los microorganismos que son controlados por los múltiples compuestos antimicrobianos presentes en el capullo.

**Palabras claves:** Peces pulmonados; Dipnoos; Estivación; Capullo; Inmunidad innata; Granulocitos; NETs.

#### Abstract

The transition of vertebrates from aquatic to terrestrial life, which occurred 400 million years ago during the Devonian Period, is one of the most important events in animal evolution. Lungfish, or dipnoans, are the living fish most closely related to terrestrial tetrapods, and their study is essential for understanding the terrenalization and subsequent radiation of vertebrates into the many terrestrial ecosystems. These fish possess the largest animal genomes known to date, containing genes necessary for both aquatic and terrestrial life. The lungfish of Africa (*Protopterus sp.*) and South America (*Lepidosiren paradoxa*) can aestivate during dry seasons, entering a state of torpor in which many of their metabolic activities decrease and they breathe air. During aestivation, they are exposed to multiple microorganisms present in the surrounding mud. In the case of *Protopterus sp.*, they exhibit a cocoon that acts as an immunological barrier containing granulocytes that develop neutrophil extracellular traps (NETs), which trap and control the multiple antimicrobial compounds present in the cocoon.

**Keywords:** Lungfish; Dipnoi; Aestivation; Cocoon; Innate immunity; Granulocytes; NETs.

#### Introducción

Los grandes saltos evolutivos, como el paso de la unicelularidad a la pluricelularidad, del exoesqueleto de los invertebrados al endoesqueleto de los vertebrados, de la vida acuática a la terrestre, entre otros, requieren la acumulación de múltiples cambios genéticos. La conquista de la tierra por los vertebrados acuáticos, evento conocido como terrenalización

**Citación:** García LF. Inmunidad innata y funciones antimicrobianas del capullo durante la estivación de los peces pulmonados. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):762-771, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3272>

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**\*Correspondencia:**

Luis F. García;  
lfernando.garciam@gmail.com

**Recibido:** 6 de agosto de 2025

**Aceptado:** 11 de septiembre de 2025

**Publicado en línea:** 8 de octubre de 2025

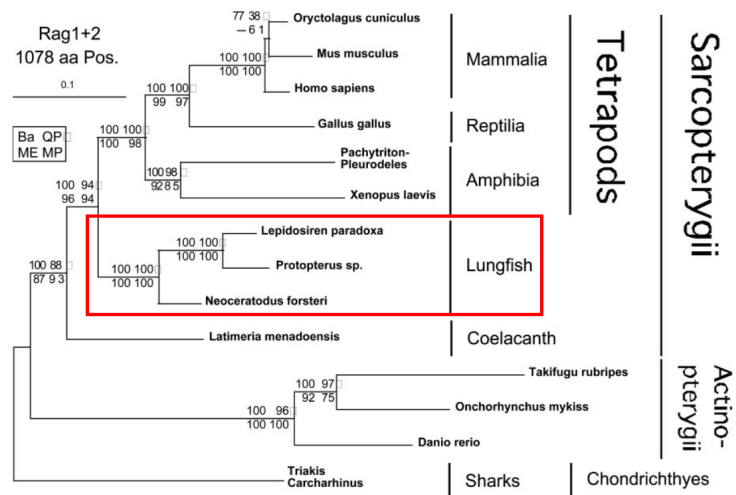


Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

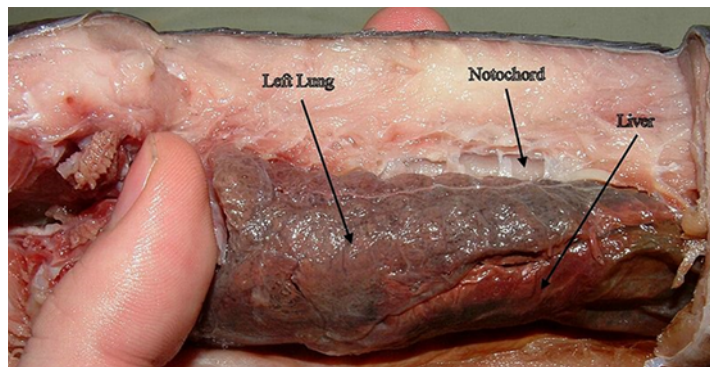
(Perry *et al.*, 2008), ocurrió en el Devoniano Tardío y fue un evento seminal en la evolución de los vertebrados terrestres que requirió de múltiples adaptaciones anatómicas y fisiológicas (Ashley-Ross *et al.*, 2013; Fishman *et al.*, 1986), pero permitió la radiación de las especies y la ocupación de múltiples ecosistemas terrestres.

Los cambios y adaptaciones requeridos para el paso de la vida acuática a la terrestre incluyen: 1) el cambio de aletas a extremidades anteriores y posteriores (tetrápodos) para la movilidad; 2) la transformación de branquias a uno o dos pulmones para la respiración (Cupello *et al.*, 2022; Bassi *et al.*, 2005; da Silva *et al.*, 2008; da Silva *et al.*, 2017; de Moraes *et al.*, 2005; Nunan *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023) y la presencia de surfactante recubriendo la superficie de las mucosas respiratorias (Orgeig & Daniels, 1995); 3) las adaptaciones en el cráneo, la boca y la mandíbula para acceder a fuentes de alimentación diferentes; 4) la ubicación espacial en el entorno terrestre que requiere de cuello, y 5) la exposición a microorganismos patógenos existentes en la tierra o el aire.

Los peces pulmonados (dipnoos) son los peces vivos más cercanos a los tetrápodos terrestres, con una historia evolutiva de 400 millones de años (Figura 1) (Brinkmann *et al.*, 2004a; Brinkmann *et al.*, 2004b; Palominos *et al.*, 2024; Yokobori *et al.*, 1994; Zhu & Yu, 2002). Los dipnoos tienen adaptaciones tanto a la vida acuática como a la terrestre; en el caso de la terrestre es importante la presencia de pulmones (Figura 2) y de



**Figura 1.** Posición filogenética de los peces pulmonados de acuerdo al análisis de las proteínas RAG1 y RAG2. Tomado de Brinkmann *et al.* (2004b). Árbol filogenético inferido de 14 especies y 1.078 aminoácidos de las secuencias RAG1 y RAG2 (Brinkmann *et al.*, 2004b)



**Figura 2.** Vista lateral del pulmón disecado de *Protopterus dolloi*. Tomado de <https://en.wikipedia.org/wiki/Lungfish>

vestigios de extremidades anteriores y posteriores diferentes a las aletas, de tal manera que su estudio es fundamental para comprender este quiebre evolutivo. En la presente revisión se presentan las principales características genómicas de los dipnoos y se describen específicamente los mecanismos de inmunidad innata que ocurren durante los períodos de estivación durante las prolongadas temporadas de sequía en *Protopterus sp.*, y los que protegen de la infección por parte de los microorganismos presentes en el medio circundante en *Lepidosiren paradoxa*.

### Filogenia, taxonomía y estivación

Los peces pulmonados pertenecen al orden de los Ceratodontiformes (**Tabla 1**), y están distribuidos en tres familias: la familia Neoceratodontidae, con una sola especie viviente, *Neoceratodus forsteri*, que vive en Australia; la familia Protopteridae, con cuatro especies vivientes en África, *Protopterus aethiopicus*, *P. amphibius*, *P. annectens* y *P. dolloi*, y la familia Lepidosirenidae, con una sola especie, *Lepidosiren paradoxa*, que vive en Suramérica, en la cuenca del río Amazonas (**Figura 3**).

**Tabla 1.** Taxonomía de los peces pulmonados o dipnoos

Familia	Género	Especie	Continente
Neoceratodontidae	<i>Neoceratodus</i>	<i>forsteri</i>	Australia
Protopteridae	<i>Protopterus</i>	<i>aethiopicus</i>	África
	<i>Protopterus</i>	<i>amphibius</i>	África
	<i>Protopterus</i>	<i>anectens</i>	África
	<i>Protopterus</i>	<i>dolloi</i>	África
Lepidosirenidae	<i>Lepidosiren</i>	<i>paradoxa</i>	Suramérica



**Figura 3.** Especimen de *Lepidosiren paradoxa* (A) y su distribución geográfica en Suramérica (B). **A.** Especimen de *Lepidosiren paradoxa* capturado en Leticia (Colombia) en 1966 durante una excursión del Club Científico Colombiano (3C) en la que participó el autor; actualmente exhibido en el Museo de Ciencias Naturales La Salle, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Fotografía tomada el 15/10/2024. **B.** Distribución de los registros de *Lepidosiren paradoxa* en Suramérica (Ubs6u!d-pongsakorn - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=146682451>);

Una de las características más peculiares de los dipnoos, específicamente de las cuatro especies de *Protopterus* africanos y de la amazónica *L. paradoxa* (aunque extrañamente no de la australiana *N. forsteri*), es su capacidad de estivar. Esto significa que, además de vivir libres en el agua, pueden vivir en tierra por meses o años durante las temporadas de sequía respirando aire, bien sea dentro de un capullo de moco parcialmente deshidratado en el caso de las especies de *Protopterus*, o en una especie de madriguera en el lodo en el caso de *L. paradoxa* (Casadei & Salinas, 2023; Glass *et al.*, 2009). Durante la estivación los especímenes de *Protopterus sp.* se enrollan, reducen su actividad metabólica y secretan grandes cantidades de moco que se endurece y forma un capullo translúcido de color parduzco que los protege de la desecación y cumple funciones inmunológicas, como se describe más adelante (Casadei & Salinas, 2023; Heimroth *et al.*, 2021; Heimroth *et al.*, 2018). La estivación requiere de complejas adaptaciones fisiológicas (Amelio & Garofalo, 2020; Glass *et al.*, 2009) y de una extensa remodelación de la piel y las mucosas que aumenta drásticamente la vulnerabilidad frente a los patógenos presentes en la tierra o en el aire que respiran por fuera del agua (Heimroth *et al.*, 2021; Sturla *et al.*, 2002), lo que determina la necesidad de adaptaciones en la respuesta inmune que les permitan sobrevivir en estas condiciones extremas.

### El genoma de los dipnoos

La hipótesis de que los dipnoos son el eslabón viviente más cercano entre los vertebrados acuáticos y los tetrápodos terrestres se ha visto respaldada por los análisis recientes de sus genomas (Metcalfe *et al.*, 2012; Otto, 2021) (Tabla 2). Meyer *et al.* (2021) lograron ensamblar el genoma de los 17 macrocromosomas y 10 microcromosomas de *N. forsteri*, cuyo tamaño total es de 43Gb (14 veces más grande que el genoma humano) y 31.120 genes codificantes, y exhibe una sintenia altamente conservada con los cromosomas de los tetrápodos. Alrededor del 90 % del genoma de *N. forsteri* está compuesto por secuencias repetitivas, principalmente de elementos largos intercalados (*long interspersed nuclear elements*, LINE), las más altas reportadas en genomas animales. El análisis de los genes seleccionados positivamente mostró que estos están relacionados, ante todo, con la preadaptación a la vida terrestre, siendo los principales el surfactante necesario para el mantenimiento de la superficie pulmonar, el regulador del desarrollo pulmonar *ssh*, los receptores olfatorios, particularmente los genes V2R del receptor del órgano vomeronasal, y una expansión del grupo de los genes *hoc* relacionados con el desarrollo de los miembros y, en consecuencia, con el desplazamiento terrestre de los tetrápodos.

Por su parte, Wang *et al.* (2021) estudiaron el genoma de *Protopterus annectens*, el cual tiene 40 Gb en 17 cromosomas con 19.457 genes codificadores de proteínas. En esta especie las relaciones filogenéticas reconstruidas con 5.149 genes ortólogos de otras ocho especies de vertebrados confirmaron que los peces pulmonados constituyen el linaje hermano más cercano a los tetrápodos, de los cuales divergieron hace 419 millones de años, al inicio del Devoniano. El análisis de la expresión génica evidenció, asimismo, el papel de los genes del surfactante de la superficie pulmonar y la transición de aletas a miembros. La comparación de los perfiles de expresión relacionados con la estivación mostró que algunos se regulan negativamente, como los relacionados con la actividad hormonal del cerebro y el colágeno de la matriz extracelular de la piel, en tanto que ocho de los diez genes de proteínas de choque térmico, que pueden tener un papel protector en las temporadas de sequía, se regulan positivamente.

**Tabla 2.** Características de los genomas gigantes de los dipnoos

Especie	Tamaño	Versus genoma humano	Referencia
<i>Neoceratodus fosteri</i>	43GB	14X	Meyer <i>et al.</i> , 2021
<i>Protopterus annectens</i>	40GB	13X	Wang <i>et al.</i> , 2021
<i>Lepidosiren paradoxa</i>	91Gb	30x	Schartl <i>et al.</i> , 2024

El genoma de *L. paradoxa* (Schartl *et al.*, 2024), por su parte, alcanza 91Gb en 19 cromosomas con 19.777 genes. Es el genoma animal más grande que se haya secuenciado (cerca de 30 veces el tamaño del genoma humano y el doble de los otros dos géneros de dipnoos), y es particularmente rico en ADN repetitivo y en elementos transposables (ET) (cerca de 85Gb), los cuales continúan expandiéndose.

## Los órganos y las células de defensa de los dipnoos

El sistema inmune de los dipnoos contiene todos los componentes estructurales, celulares y funcionales de los demás vertebrados gnatostomados, esto es, un sistema inmune innato y un sistema inmune adaptativo, altamente conservados, que se comunican y colaboran para una respuesta inmune efectiva (Rauta *et al.*, 2012). En los dipnoos el sistema inmune tiene la exigencia de responder a los inmunógenos presentes en su fase de vida acuática de nado libre, así como durante la estivación. En cuanto a los estudios realizados sobre el sistema inmune de los dipnoos y su importancia en la adaptación a la vida terrestre, los primeros estudios sobre las células de su sistema inmune datan de principios del siglo XX, cuando Bryce (1906) describió el desarrollo del timo en *L. paradoxa*. Posteriormente, en 1931, Jordan y Speidel (1931) describieron la formación de células sanguíneas en *Protopterus aethiopicus* en condiciones de nado libre y estivación; según estos autores, los principales órganos hematopoyéticos son el bazo, los intestinos y el riñón. Los granulocitos se forman en el intestino, la cápsula renal, las gónadas y el bazo; existen varias formas de estas células, siendo las más frecuentes las eosinofílicas. Una observación importante de este estudio es que los granulocitos eosinofílicos parecen estar asociados con la estivación. Se postula que *Protopterus sp.* tienen la mayor diversidad de granulocitos de todos los vertebrados (Casadei & Salinas, 2023). Bielik y Strauss (1993) estudiaron las características citoquímicas y ultraestructurales de los granulocitos de *L. paradoxa* y los clasificaron tentativamente como eosinofílicos I y II y basofílicos, y confirmaron que los eosinofílicos son los más frecuentes. Riberiro *et al.* (2007) analizaron también en *L. paradoxa* las características morfológicas de las células circulantes y del exudado en el celoma recolectadas en diferentes momentos después de la inyección de tioglicolato, y encontraron linfocitos, monocitos, macrófagos y diferentes poblaciones de fagocitos polinucleares con las características morfológicas de otras especies de vertebrados. Los autores denominaron los granulocitos basofílicos como granulocitos III; la peroxidasa y la fosfatasa alcalina se encontraron principalmente en los granulocitos II, los cuales correspondieron al 85 % de las células del exudado. Mas recientemente, Tacchi *et al.* (2015) estudiaron la estructura de los tejidos linfoides de los dipnoos africanos *P. dolloi* y *P. annectens* y encontraron tanto los más primitivos agregados de células linfoides no encapsulados (LA) como los tejidos linfoides encapsulados más organizados de las mucosas (O-MALT) en la mucosa nasofaríngea e intestinal, donde, además, se encontraron transcritos de las cadenas pesadas de inmunoglobulinas (IGH) y de CD3 de los linfocitos T, los cuales aumentaron en presencia de infecciones. Es importante señalar que en los dipnoos también se ha detectado la presencia de componentes del sistema complemento (Sato *et al.*, 1999).

## Capullo de estivación

En los peces teleósteos la piel es un epitelio mucoso compuesto por capas de células en contraste con los vertebrados terrestres, cuya piel no contiene células secretoras de moco y está queratinizada. En cuanto a los dipnoos, Heimroth *et al.* (2018), utilizando cromatografía líquida-espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS), la base de datos de RNA-seq de Illumina y bases de datos de proteínas de dipnoos publicadas previamente, hicieron el análisis comparativo del inmunoproteoma del moco de *Protopterus dolloi* libre en el agua, durante la terrestreización y en el moco producido por las branquias. El moco cutáneo en fase terrestre se encontró enriquecido en proteínas con funciones antimicrobianas como las histonas y las proteínas S100. Específicamente el análisis ontológico del proteoma del moco cutáneo en fase terrestre mostró funciones relacionadas

con el procesamiento de virus, respuesta a bacterias Gram negativas y señales mediadas por el factor de necrosis tumoral (*tumor necrosis factor*, TNF). Los autores concluyeron que el moco cutáneo durante la fase de terrestrialización permite una mejor protección contra patógenos externos presentes en la tierra.

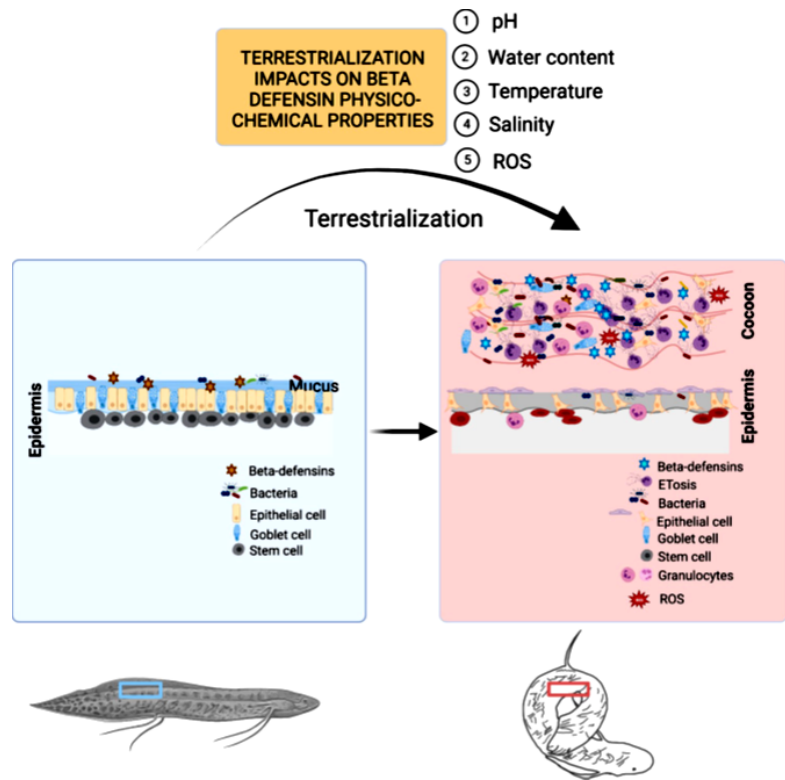
Más recientemente, el grupo de **Heimroth et al.** (2021) demostró que en *P. dolloi* el capullo formado durante la estivación no es una estructura inerte, sino que está formado por capas con una estructura celular bien definida, compuesta por células epiteliales, endoteliales, caliciformes e inmunes, además de una red de canales recubiertos por células escamosas, con presencia de un gran número de bacterias en grumos, lo que sugiere que el capullo se forma por el desprendimiento sucesivo de capas de células epiteliales y proliferación de las células epiteliales aplanadas en la capa externa del capullo (**Figura 4**).

En cuanto al papel de los granulocitos que en la fase de nado libre migran de los depósitos de estas células en el intestino, los riñones y las gónadas hacia la piel y del capullo al inicio de las temporadas de sequía y sus funciones en la defensa antimicrobiana, los autores encontraron que al iniciarse la terrestrialización hubo un aumento de granulocitos circulantes acumulados a las dos semanas en la piel, lo que demostró histológicamente y por la expresión del mRNA del receptor de la quimiocina 2 (*cxcr2*), la elastasa (*elane*) y la mieloperoxidasa (*mpo*); asimismo, observaron áreas con desprendimiento de la epidermis de la membrana basal e infiltración por granulocitos. En el capullo también encontraron una alta transcripción de genes de células epiteliales como la citoqueratina 8 (*ck8*), de péptidos antimicrobianos como las defensinas- $\beta$  (*dfb1* a *dfb4*), de citocinas proinflamatorias como la interleucina 1 $\beta$  (*il1b*) y la interleucina 8 (*il8*), productos de las células caliciformes como las mucinas 2 y 4 (*muc2* y *muc4*), y productos de los granulocitos (*cxcr2*, *elane*, *mpo*) (**Casadei & Salinas, 2023**).

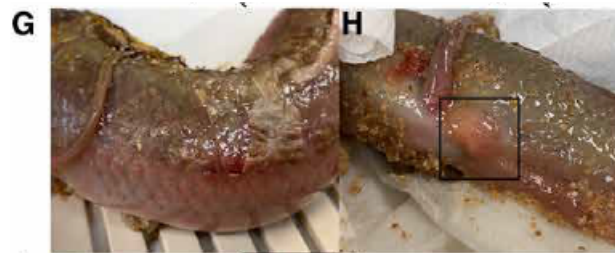
En conjunto, estos hallazgos demuestran que durante la terrestrialización se produce un capullo vivo donde se atrapan bacterias y hay transcripción activa de genes con prolongada acción antimicrobiana. Uno de los hallazgos más interesantes de este estudio fue la demostración de que durante la terrestrialización los granulocitos que salen del cuerpo entran a ser parte integral del capullo y sufren ETosis (ET), una forma de muerte celular en la que se libera la cromatina decorada con histonas y hasta 30 proteínas globulares, muchas con actividad antimicrobiana, las cuales forman redes extracelulares que permiten atrapar bacterias y hongos y que se conocen como trampas extracelulares de neutrófilos (*neutrophil extracellular traps*, NETs) (**Casadei & Salinas, 2023**) (**Figura 4**). El papel protector de estas trampas extracelulares se demostró aplicando aerosoles de la enzima ADNasa1 por varios días en la superficie de animales en estivación, lo cual resultó en lesiones cutáneas, hemorragias, edema de la cabeza, prolapso del ano y septicemia por bacterias tipo cocos (**Figura 5**).

**Amelio y Garafolo** (2023) estudiaron en *P. dolloi* los cambios morfológicos y funcionales de la piel a los 0, 5 y 40 días de inducción de la estivación mediante microscopía de luz e inmunofluorescencia. A los seis días encontraron una disminución del grosor de la epidermis, de las células caliciformes productoras de moco (que ya no se requieren para la formación del capullo) y de las células epidérmicas presentes en la capa media de la epidermis. A los 40 días el grosor de la epidermis aumentó y las células caliciformes y epidérmicas disminuyeron y se localizaron en la capa externa de la epidermis. Mediante inmunofluorescencia, los hallazgos más relevantes fueron el aumento de la enzima aldehído oxidasa (AO), la disminución a los seis días y posterior recuperación de la enzima óxido nítrico sintetasa endotelial (eNOS) y de las proteínas de choque térmico (HSP70 y HSP90), posiblemente para preservar la estructura tisular y facilitar el retorno postestivación. La HSP70 se localizó principalmente en el citoplasma de las células epidérmicas y en la membrana de las células productoras de moco, lo que sugiere, según los autores, que desempeñaría un papel protector contra el daño oxidativo.

Recientemente, **Palominos et al.** (2024) estudiaron los cambios ocurridos durante la inducción de la estivación en *P. annectens* de África occidental. Los análisis por microscopía electrónica mostraron gran cantidad de bacterias y hongos en la superficie



**Figura 4.** Diagrama de los cambios que ocurren en los peces pulmonados africanos durante la terrestrialización y algunos factores ambientales que pueden afectar a los péptidos antimicrobianos. Tomado de Casadei y Salinas (2023)



**Figura 5.** El tratamiento con ADNsA-I en *Protopterus dolloi* terrestrializado produce lesiones cutáneas, hemorragias, edema de la cabeza (G), prolapso del ano (H) y septicemia. Tomado de Heimroth *et al.* (2021)

externa del capullo que no parecían comprometer la salud de los animales, con lo que se comprueba que este es una barrera que impide el acceso de los gérmenes a la piel. Para determinar la posible actividad antimicrobiana del capullo, se tomaron muestras del capullo a las dos y seis semanas de estivación que fueron cocultivadas con *Escherichia coli*; sin embargo, no se detectó ninguna actividad inhibitoria en las muestras tomadas en estos dos tiempos. El estudio histológico de muestras teñidas con yoduro de propidio y DAPI demostró que la mayoría de las células de las capas interna y externa del capullo estaban vivas en los dos momentos estudiados y correspondían a núcleos de granulocitos; además, se visualizaron trampas de neutrófilos (NETs). Tomados todos estos hallazgos en conjunto, como lo sugiere Olena (2021), podría concluirse que convierten el capullo en una “chaqueta” inmunológica extracorporal.

La respuesta inmune de la especie *L. paradoxa* suramericana se ha estudiado menos; sin embargo, recientemente **Bernades et al.** (2024) describieron el transcriptoma en muestras de piel de tres especímenes sometidos a injurias en tres momentos diferentes; estudiaron en particular los genes de las lectinas, glicoproteínas con capacidad de unir carbohidratos, y entre estos, los de las interlectinas, miembros de la familia de las lectinas dependientes de  $\text{Ca}^{2+}$  que contienen un dominio conservado de fibrinógeno (FReD) que les permite aglutinar microorganismos, lo que sugiere que participan en la inmunidad innata. A los siete días después de la injuria, se identificó la interlectina 2 (LpITLN2-B), la cual presentó una alta afinidad por disacáridos como la D-manosa y las moléculas de Poli(I-C) y LPS, lo que apunta a una actividad antimicrobiana.

## Conclusiones

Los peces pulmonados o dipnoos son el eslabón más cercano en el paso de los vertebrados de la vida acuática a la terrestre. Estos peces exhiben características anatómicas y fisiológicas, así como un sistema inmune (tema de interés específico de esta revisión), que les permiten vivir tanto en el agua como fuera de ella. Una de las peculiaridades más notorias es su capacidad de estar en las temporadas de sequía; en estas condiciones respiran aire y entran en un estado de sopor que posibilita a las especies de *Protopterus* vivir por largos periodos dentro de un capullo. Este capullo está formado por células epiteliales y moco secretado por las células caliciformes de la piel, y es infiltrado por células de la respuesta inmune innata, como los granulocitos eosinofílicos, que al morir por ETosis liberan el ADN que forma redes (NETs) con gran variedad de proteínas cuya actividad antimicrobiana les permite contener a las bacterias y hongos atrapados en ellas. La respuesta inmune en los dipnoos durante la estivación es una muestra de los complejos eventos evolutivos del sistema inmune que permiten responder a los microorganismos patógenos presentes en los diferentes hábitats que ocupan las especies durante su ciclo vital.

## Agradecimientos

A la memoria de Octavio Martínez López, director del Club Científico Colombiano (3C); a Dany Zulay Urrego del Museo de Ciencias Naturales de La Salle del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) DE Medellín, Colombia; a Sally Station, por la traducción del resumen al inglés; a Mauricio Rojas, por la lectura crítica del manuscrito y por sus sugerencias para mejorarlo, y a Lina María Vélez, por su acompañamiento y apoyo permanentes.

## Referencias

- Amelio, D. & Garofalo, F.** (2020). The NOS/NO system in an example of extreme adaptation: The African lungfish. *Journal of Thermal Biology*, 90, 102594. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102594>
- Amelio, D. & Garofalo, F.** (2023). Morpho-functional changes of lungfish *Protopterus dolloi* skin in the shift from freshwater to aestivating conditions. *Comparative and Biochemical Physiology, Part B Biochemistry and Molecular Biology*, 266, 110846. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2023.110846>
- Ashley-Ross, M. A., Hsieh, S. T., Gibb, A. C., Blob, R. W.** (2013). Vertebrate Land Invasions—Past, Present, and Future: An Introduction to the Symposium. *Integrative and Comparative Biology*, 53(2), 192-196. <https://doi.org/10.1093/icb/ict048>
- Bassi, M., Klein, W., Fernandes, M. N., Perry, S. F., Glass, M. L.** (2005). Pulmonary Oxygen Diffusing Capacity of the South American Lungfish *Lepidosiren paradoxa*: Physiological Values by the Bohr Method. *Physiological and Biochemical Zoology*, 78(4), 560-569. <https://doi.org/10.1086/430230>
- Bernardes, G., Serra, G. M., Silva, L., Martins, M. P., Perez, L. N., Molfetta, F. A., Santos, A. V., Schneider, M. P. C.** (2024). Potential Involvement of the South American Lungfish Intellectin-2 in Innate-Associated Immune Modulation. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(9), 4798. <https://doi.org/10.3390/ijms25094798>
- Bielek, E. & Strauss, B.** (1993). Ultrastructure of the granulocytes of the South American lungfish, *Lepidosiren paradoxa*: Morphogenesis and comparison to other leucocytes. *Journal of Morphology*, 218(1), 29-41. <https://doi.org/10.1002/jmor.1052180103>

- Brinkmann, H., Denk, A., Zitzler, J., Joss, J. J., Meyer, A.** (2004a). Complete mitochondrial genome sequences of the South American and the Australian lungfish: testing of the phylogenetic performance of mitochondrial data sets for phylogenetic problems in tetrapod relationships. *Journal of Molecular Evolution*, 59(6), 834-848. <https://doi.org/10.1007/s00239-004-0122-8>
- Brinkmann, H., Venkatesh, B., Brenner, S., Meyer, A.** (2004b). Nuclear protein-coding genes support lungfish and not the coelacanth as the closest living relatives of land vertebrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, 101(14), 4900-4905. <https://doi.org/10.1073/pnas.0400609101>
- Bryce, T. H.** (1906). Note on the Development of the Thymus Gland in *Lepidosiren paradoxa*. *Journal Anatomy Physiology*, 40(Pt 2), 91-99.
- Casadei, E. & Salinas, I.** (2023). Fighting pathogens in two battlefields: Antimicrobial defenses in the African lungfish. *PLoS Pathogens* 19(4), e1011302. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1011302>
- da Silva, G. S., Giusti, H., Sanchez, A. P., do Carmo, J. M., Glass, M. L.** (2008). Aestivation in the South American lungfish, *Lepidosiren paradoxa*: effects on cardiovascular function, blood gases, osmolality and leptin levels. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 164(3), 380-385. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2008.08.009>
- da Silva, G. S. F., Ventura, D. A. D. N., Zena, L. A., Giusti, H., Glass, M. L., Klein, W.** (2017). Effects of aerial hypoxia and temperature on pulmonary breathing pattern and gas exchange in the South American lungfish, *Lepidosiren paradoxa*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Mol Integr Physiol*, 207, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2017.03.001>
- de Moraes, M. F., Holler, S., da Costa, O. T., Glass, M. L., Fernandes, M. N., Perry, S. F.** (2005). Morphometric comparison of the respiratory organs in the South American lungfish *Lepidosiren paradoxa* (Dipnoi). *Physiological and Biochemical Zoology*, 78(4), 546-559. <https://doi.org/10.1086/430686>
- Fishman, A. P., Pack, A. I., Delaney, R. G., Galante, R. J.** (1986). Estivation in *Protopterus*. *J Morphol*, 190(S1), 237-248. <https://doi.org/10.1002/jmor.1051900416>
- Glass, M. L., Amin-Navas, J., da Silva, G. S. F.** (2009). Aestivation in Amphibians, Reptiles, and Lungfish. In M. L. Glass & S. C. Wood (Eds.), *Cardio-Respiratory Control in Vertebrates: Comparative and Evolutionary Aspects* (pp. 179-189). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-93985-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-93985-6_8)
- Heimroth, R. D., Casadei, E., Benedicenti, O., Amemiya, C. T., Muñoz, P., Salinas, I.** (2021). The lungfish cocoon is a living tissue with antimicrobial functions. *Science Advances*, 7(47), eabj0829. <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.abj0829>
- Heimroth, R. D., Casadei, E., Salinas, I.** (2018). Effects of Experimental Terrestrialization on the Skin Mucus Proteome of African Lungfish (*Protopterus dolloi*). *Frontiers in Immunology* 9. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.01259>
- Jordan, H. E. & Speidel, C. C.** (1931). Blood formation in the African lungfish, under normal conditions and under conditions of prolonged estivation and recovery. *J Morphol* 51(2), 319-371. <https://doi.org/10.1002/jmor.1050510203>
- Metcalfe, C. J., Filée, J., Germon, I., Joss, J., Casane, D.** (2012). Evolution of the Australian Lungfish (*Neoceratodus forsteri*) Genome: A Major Role for CR1 and L2 LINE Elements. *Molecular Biology and Evolution*, 29(11), 3529-3539. <https://doi.org/10.1093/molbev/mss159>
- Meyer, A., Schloissnig, S., Franchini, P., Du, K., Woltering, J. M., Irisarri, I., Wong, W. Y., Nowoshilow, S., Kneitz, S., Kawaguchi, A., Fabrizius, A., Xiong, P., Dechaud, C., Spaink, H. P., Volf, J.-N., Simakov, O., Burmester, T., Tanaka, E. M., Schartl, M.** (2021). Giant lungfish genome elucidates the conquest of land by vertebrates. *Nature*, 590(7845), 284-289. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03198-8>
- Nunan, B. L. C. Z., Silva, A. S., Wang, T., da Silva, G. S. F.** (2019). Respiratory control of acid-base status in lungfish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Mol Integr Physiol*, 237, 110533. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.110533>
- Olena, A.** (2021). Lungfish cocoons are alive, sort of. *The Scientist*. [https://www.the-scientist.com/lungfish-cocoons-are-alive-sort-of-6943https://www.realclearscience.com/2021/11/18/lungfish\\_cocoons\\_are\\_alive\\_sort\\_of\\_804142.html](https://www.the-scientist.com/lungfish-cocoons-are-alive-sort-of-6943https://www.realclearscience.com/2021/11/18/lungfish_cocoons_are_alive_sort_of_804142.html) 7
- Orgeig, S. & Daniels, C. B.** (1995). The evolutionary significance of pulmonary surfactant in lungfish (Dipnoi). *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 13(2), 161-166. <https://doi.org/10.1165/ajrcmb.13.2.7626285>
- Otto, G.** (2021). Giant genomes of lungfish. *Nature Reviews Genetics*, 22(4), 199-199. <https://doi.org/10.1038/s41576-021-00337-9>

- Palominos, M. F., Bharadwaj, R., Tralka, C., Trang, K., Aka, D., Alami, M., Andrews, D., Bartlett, B. I., Golde, C., Liu, J., Le-Pedroza, M., Perrot, R., Seiter, B., Sparrow, C., Shapira, M., Martin, C. H.** (2024). The West African lungfish secretes a living cocoon during aestivation with uncertain antimicrobial function. *bioRxiv*, 2024.07.05.602297. <https://doi.org/10.1101/2024.07.05.602297>
- Perry, S. F., Euverman, R., Wang, T., Loong, A. M., Chew, S. F., Ip, Y. K., Gilmour, K. M.** (2008). Control of breathing in African lungfish (*Protopterus dolloi*): a comparison of aquatic and cocooned (terrestrialized) animals. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 160(1), 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2007.06.015>
- Rauta, P. R., Nayak, B., Das, S.** (2012). Immune system and immune responses in fish and their role in comparative immunity study: A model for higher organisms. *Immunology Letters*, 148(1), 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.imlet.2012.08.003>
- Ribeiro, M. L., DaMatta, R. A., Diniz, J. A., de Souza, W., do Nascimento, J. L., de Carvalho, T. M.** (2007). Blood and inflammatory cells of the lungfish *Lepidosiren paradoxa*. *Fish and Shellfish Immunology*, 23(1), 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2006.10.005>
- Sato, A., Sülmann, H., Mayer, W. E., Figueroa, F., Tichy, H., Klein, J.** (1999). cDNA sequence coding for the  $\alpha'$ -chain of the third complement component in the African lungfish. *Scandinavian Journal of Immunology*, 49(4), 367-375. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3083.1999.00512.x>
- Schartl, M., Woltering, J. M., Irisarri, I., Du, K., Kneitz, S., Pippel, M., Brown, T., Franchini, P., Li, J., Li, M., Adolphi, M., Winkler, S., de Freitas Sousa, J., Chen, Z., Jacinto, S., Kvon, E. Z., Correa de Oliveira, L. R., Monteiro, E., Baia Amaral, D.,...Meyer, A.** (2024). The genomes of all lungfish inform on genome expansion and tetrapod evolution. *Nature*, 634, 96-103. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07830-1>
- Sturla, M., Paola, P., Carlo, G., Angela, M. M., Maria, U. B.** (2002). Effects of induced aestivation in *Protopterus annectens*: a histomorphological study. *Journal of Experimental Zoology*, 292(1), 26-31. <https://doi.org/10.1002/jez.1139>
- Tacchi, L., Larragoite, Erin T., Muñoz, P., Amemiya, Chris T., Salinas, I.** (2015). African Lungfish Reveal the Evolutionary Origins of Organized Mucosal Lymphoid Tissue in Vertebrates. *Current Biology*, 25(18), 2417-2424. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.07.066>
- Wang, K., Wang, J., Zhu, C., Yang, L., Ren, Y., Ruan, J., Fan, G., Hu, J., Xu, W., Bi, X., Zhu, Y., Song, Y., Chen, H., Ma, T., Zhao, R., Jiang, H., Zhang, B., Feng, C., Yuan, Y.,...Wang, W.** (2021). African lungfish genome sheds light on the vertebrate water-to-land transition. *Cell*, 184(5), 1362-1376.e1318. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.047>
- Yokobori, S., Hasegawa, M., Ueda, T., Okada, N., Nishikawa, K., Watanabe, K.** (1994). Relationship among coelacanth, lungfishes, and tetrapods: a phylogenetic analysis based on mitochondrial cytochrome oxidase I gene sequences. *Journal of Molecular Evolution*, 38(6), 602-609. <https://doi.org/10.1007/BF00175880>
- Zhang, R., Liu, Q., Pan, S., Zhang, Y., Qin, Y., Du, X., Yuan, Z., Lu, Y., Song, Y., Zhang, M., Zhang, N., Ma, J., Zhang, Z., Jia, X., Wang, K., He, S., Liu, S., Ni, M., Liu, X.,... Fan, G.** (2023). A single-cell atlas of West African lungfish respiratory system reveals evolutionary adaptations to terrestrialization. *Nature Communications*, 14(1), 5630. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41309-3>
- Zhu, M. & Yu, X.** (2002). A primitive fish close to the common ancestor of tetrapods and lungfish. *Nature*, 418(6899), 767-770. <https://doi.org/10.1038/nature00871>

Artículo original

## La familia Marcgraviaceae en México

### The Marcgraviaceae family in Mexico

Diego Giraldo-Cañas

Herbario Nacional Colombiano (COL), Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

#### Resumen

Se presenta el estudio morfológico y taxonómico de las especies de la familia neotropical Marcgraviaceae en México. Se incluyen las claves, los materiales tipo, los sinónimos, las descripciones, la distribución geográfica y ecológica, así como algunas fotografías y nombres populares. Se designan los lectotipos para *Marcgravia rectiflora* Triana & Planch. var. *brownei* Triana & Planch., *Marcgravia pittieri* Gilg y *Marcgravia tonduzii* Gilg. La familia está representada en México por tres géneros y ocho especies nativas. Por otra parte, se discuten variados aspectos sobre los tipos de hábito de crecimiento, el dimorfismo foliar, los tipos de inflorescencia y la verdadera naturaleza del fruto en esta familia.

**Palabras clave:** Ericales; Flora de México; Marcgraviaceae; Plantas neotropicales.

#### Abstract

A morphological and taxonomic treatment of the Mexican species from the Neotropical family Marcgraviaceae is provided, including keys, type specimens, synonyms, descriptions, ecological and geographic distribution, some photographs, and common names. The lectotypifications for *Marcgravia rectiflora* Triana & Planch. var. *brownei* Triana & Planch., *Marcgravia pittieri* Gilg, and *Marcgravia tonduzii* Gilg are given. A total of three genera and eight native species of this family are currently known in Mexico. Additionally, various aspects regarding growth habit, leaf dimorphism, types of inflorescence, and the true nature of the fruit in this family are discussed.

**Keywords:** Ericales; Flora of Mexico; Marcgraviaceae; Neotropical plants.

#### Introducción

La familia Marcgraviaceae Bercht. & J. Presl, de distribución neotropical, consta de ocho géneros y 138 especies (Giraldo-Cañas, 2018). Su distribución más septentrional la constituyen los estados de Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Puebla, Tabasco y Veracruz en México, mientras que la más austral corresponde a los estados de Paraná, Rio Grande do Sul y Santa Catarina en Brasil; también están presentes en el Caribe (tanto en las Antillas mayores como en las Antillas Menores), así como en algunas islas del Pacífico tropical americano de Colombia, Costa Rica y Panamá (Giraldo-Cañas, 2018). Los miembros de esta familia están representados por lianas o arbustos epífitos y hemiepífitos (raramente terrestres), que, por lo general, están restringidos a los bosques húmedos a pluviales entre el nivel del mar y los 3000 m de altitud (Giraldo-Cañas, 2018).

Las Marcgraviaceae son monofiléticas (Ward & Price, 2002), aunque desde el punto de vista molecular se las conoce poco. Actualmente, la familia está ubicada en el orden Ericales, principalmente relacionada con las Tetrameristaceae y las Balsaminaceae (Schönenberger *et al.*, 2005; Reveal & Chase, 2011; von Balthazar & Schönenberger, 2013; Christenhusz *et al.*, 2017). Estas familias comparten la presencia de rafidios de oxalato de calcio y de estructuras glandulares en hojas, pecíolos, sépalos o pétalos, y poseen flores hipoginas, estilo simplificado, estambres con filamentos aplanados dorsiventralmente,

**Citación:** Giraldo-Cañas D. La familia Marcgraviaceae en México. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):772-796, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3244>

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**Correspondencia:**

Diego Giraldo-Cañas;  
dagiraldoc@unal.edu.co

**Recibido:** 3 de julio de 2025

**Aceptado:** 16 de septiembre de 2025

**Publicado en línea:** 14 de noviembre de 2025



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

frutos apiculados con estilo y estigma persistentes y semillas sin endospermo, entre otras características morfológicas y anatómicas (Ward & Price, 2002; Schöenberger *et al.*, 2005; Giraldo-Cañas, 2011a, 2018; von Balthazar & Schöenberger, 2013).

La familia se caracteriza principalmente por presentar dos tipos de nectarios, que, según la terminología de Schmid (1988), corresponden a nectarios extra-reproductivos laminales, es decir, glándulas laminales abaxiales (*glandulae hypophyllae* o *hypophyllous glands*) en el sentido de Weber (1956) y Ward & Price (2002), respectivamente, y nectarios reproductivos, los cuales corresponden a brácteas nectaríferas que pueden estar presentes en los pedicelos, en su base, en el raquis o en la base de la flor, y cuya posición, unida a la forma de la inflorescencia, entre otras características, define los límites genéricos (Giraldo-Cañas, 2018).

Aquí se presenta el tratamiento taxonómico de la familia en la flora mexicana, con el fin de seguir aportando al esclarecimiento taxonómico-nomenclatural, morfológico y biogeográfico de las Marcgraviaceae (Giraldo-Cañas, 2011a, 2011b, 2018, 2023; Giraldo-Cañas *et al.*, 2024). En este sentido, Palmas-Pérez *et al.* (2013) ya habían destacado la necesidad de producir un nuevo tratamiento taxonómico de esta familia en el contexto mexicano, con lo cual se contribuye al conocimiento de la rica flora de México, una de las más diversas del planeta (Villaseñor, 2016; Villaseñor & Meave, 2022).

## Materiales y métodos

El análisis morfológico y la concepción de este tratamiento se hicieron utilizando los métodos convencionales de la taxonomía y la sistemática biológicas (Cerón-Martínez, 2015; Sosef *et al.*, 2021). Se siguió el concepto morfológico de especie con base en los postulados expuestos en McDade (1995), Wiens & Servedio (2000) y Sosef *et al.* (2021). Se revisó la literatura concerniente a la familia Marcgraviaceae, haciendo énfasis en las descripciones, las ilustraciones y los protólogos de todos los binomios relacionados con ella, así como el análisis de numerosos materiales tipo y colecciones generales (herbarios BR, BRIT, COAH, COL, CR, F, GH, HOXA, HUA, HUT, INPA, JAUM, K, LPB, MA, MEDEL, MEXU, MICH, MO, MOL, NY, QAP, QCA, QCNE, RB, RSA, SI, SP, US, USM, VEN, XAL). Los acrónimos de los herbarios son los propuestos por Thiers (2025). La terminología morfológica aplicada a las Marcgraviaceae se basa en Giraldo-Cañas (2011a, 2018), la terminología de los tipos de venación foliar en Moreno (1984), Font Quer (1993) y Gonçalves & Lorenzi (2007), y la definición de hemiepifitismo en Zott *et al.* (2021). Las fotografías son de Barry Hammel (MO, Saint Louis, Missouri, figuras 1 y 2), Federico Oviedo-Brenes (Organización de Estudios Tropicales OET, Ecos del Bosque, Costa Rica, figuras 3, 4A–D y 7), Marco Tschapka (University of Ulm, Alemania, figuras 4E y 5C), Klaus Mehlreter (INCOL, México, figura 5A), Dalila Frago Tejas (Revista Botanical Sciences-Sociedad Botánica de México, volumen 100, número especial de 2022, S14–S33) (México, figura 5B) y Lucio Lozada Pérez (UNAM, figura 6). Las categorías de riesgo de extinción no se estimaron aquí, pues ya fueron consideradas por Palmas-Pérez *et al.* (2013) para las Marcgraviaceae mexicanas.

## Resultados y discusión

**Hábitos de crecimiento.** En muchas descripciones de la familia Marcgraviaceae publicadas en diversas obras se menciona que hay árboles (Cronquist, 1981; Goldberg, 1986; Dressler, 2001, 2004a, 2004b; González & Betancur, 2013; Palmas-Pérez *et al.*, 2013; Christenhusz *et al.*, 2017; Mabberley, 2017), pero es necesario especificar que las Marcgraviaceae están representadas exclusivamente por lianas o arbustos que comúnmente son epífitos o hemiepífitos, muy raramente terrestres (Giraldo-Cañas, 2018).

**Dimorfismo foliar.** Heywood (1985) destacó que tanto en *Marcgravia* como en *Norantea* había dimorfismo foliar (las hojas de las ramas jóvenes estériles diferentes a las hojas de las ramas maduras y fértiles), pero aquí se debe aclarar que esta condición se presenta de manera exclusiva en *Marcgravia*.

**Tipos de inflorescencias.** Dressler (2004b) menciona que todas las inflorescencias en Marcgraviaceae son racemosas, pero en *Sarcopera* son verdaderas espigas, toda vez que sus flores son sésiles, en tanto que en la mayoría de las especies de *Marcgravia* son umbelas (Giraldo-Cañas, 2018). Por su parte González & Betancur (2013) señalan que las flores de esta familia descritas por ellos presentaban siete (7) sépalos, lo cual claramente es un craso error de interpretación morfológica, ya que en las Marcgraviaceae solo se presentan cuatro (en *Marcgravia*) o cinco sépalos (en los restantes siete géneros), error que, quizá, responda a haber considerado las dos bractéolas como sépalos.

**Naturaleza de los frutos en Marcgraviaceae.** En cuanto a los tipos de frutos presentes en la familia, ha habido muchas propuestas de denominación; por ejemplo, se ha sugerido llamarlos cápsulas loculicidas dehiscentes o indehiscentes (de Roon, 1970), frutos carnosos indehiscentes o parcialmente dehiscentes (Cronquist, 1981), frutos globosos o subglobosos con dehiscencia anómala (Utley, 1984), bayas o cápsulas dehiscentes (van Roosmalen, 1985), frutos globosos, carnosos o secos y a menudo indehiscentes (Heywood, 1985), bayas (Goldberg, 1986), cápsulas indehiscentes (*carcerulus*) (Spjut, 1994), cápsulas foraminicidas (Spjut, 1994), frutos globosos irregularmente dehiscentes (Utley, 2001), frutos capsulares (Dressler, 2004a), cápsulas loculicidas dehiscentes (Dressler, 2001, 2004b), abayados irregularmente dehiscentes o cápsulas loculicidas dehiscentes (Hald et al., 2002), abayados que se abren irregularmente (Hammel, 2007), cápsulas secas dehiscentes (González & Betancur, 2013) y bayas o cápsulas dehiscentes (Christenhusz et al., 2017).

Ante este espectro tan amplio de nombres, aquí se considera denominar los frutos, con base en sus características morfológicas y anatómicas reales, como bayas indehiscentes o con 1–4 rupturas irregulares por presión mecánica interna de la placenta cuando madura (“dehiscencia anomalocida”, *sensu* Moreno, 1984). Estas rupturas irregulares no corresponden a las fisuras o las hendiduras anatómicas, como las que presentan las verdaderas cápsulas (*sensu* Font Quer, 1993). Las bayas siempre son globosas, generalmente apiculadas (por persistencia del estilo y el estigma), además, con cáliz persistente y un mesocarpo usualmente coriáceo o raramente carnoso, mientras que el epicarpo es liso o tuberculado; por lo general, tienen numerosas semillas dispuestas en una placenta homogénea y frecuentemente jugosa, carnosa y roja o anaranjada. Por todo lo anterior, el tipo de fruto de la familia es una baya, originada, además, en un gineceo sincárpico y un ovario súpero.

**Glándulas laminales abaxiales.** Las glándulas laminales se hallan exclusivamente en la superficie abaxial de las hojas; son circulares a elípticas, algunas veces se encuentran levemente elevadas con relación a la lámina, distanciadas entre sí y distribuidas generalmente en filas submarginales a ambos extremos de la cara abaxial o, muy raramente, en forma aleatoria; su número varía enormemente por lámina y, ocasionalmente, están ausentes (Giraldo-Cañas, 2011a). Dichas glándulas podrían contribuir a la secreción de resinas o azúcares (véanse las referencias en Giraldo-Cañas, 2011a), aunque su verdadera función es desconocida (Metcalf & Chalk, 1950; Rudall, 2007). Dressler (2004a) y Rudall (2007) consideran que el exudado de azúcares de las glándulas laminales podría atraer hormigas durante el desarrollo temprano de las hojas, lo que las protegería de insectos fitófagos, ya que en su estado juvenil carecen de esclereidas. Gilg & Werdermann (1925) clasificaron estas glándulas como hidatodos, en tanto que Stevens (2025) las denominó domacios. Aquí se optó por denominarlas glándulas laminales abaxiales.

**Nectarios reproductivos extraflorales.** Los nectarios reproductivos corresponden a los nectarios nupciales extraflorales (*sensu* Schmid, 1988; Weberling, 1992) o recipientes nectaríferos ascidiiformes (*sensu* Font Quer, 1964). Son los que más llaman la atención por su gran tamaño, color, textura, variedad de formas y, principalmente, por su posición en la inflorescencia, lo que, con otras características, define los límites genéricos en esta familia (Giraldo-Cañas, 2018). Pueden ser tubulares, sacciformes, cilíndricos, clavados, cocleariformes, galeados, gibosos, subglobosos, ciatiformes, cimbiformes, cuculados,

cupuliformes, urceolados o ventricosos, y su tamaño varía mucho entre las especies. Además, son de gran importancia taxonómica en las Marcgraviaceae, toda vez que servirían como marcadores filogenéticos (Giraldo-Cañas, 2011a). Aquí se opta por denominarlos nectarios reproductivos extraflorales.

Es curioso que algunos de ellos pueden presentar en la porción opuesta al pedículo algunas rupturas ocasionadas por vertebrados (posiblemente aves) que actuarían como “ladrones de néctar” y no contribuirían con la polinización (obs. pers.). Esta condición solo la he visto en algunas especies de *Marcgravia*, lo cual concuerda con las observaciones de Thompson (2003) cuando señala que en tres de las especies de *Marcgravia* el colibrí *Heliodoxa jacula* es más un ladrón de néctar que un polinizador.

**Polinización.** En cuanto a la polinización, en algunas especies esta se realiza por medio de murciélagos, colibríes, chupamieles u otras aves tropicales, en tanto que otras son visitadas, y quizás polinizadas, por lagartos, abejas, avispas, mariposas, polillas y hormigas de los géneros *Camponotus* (Formicinae), *Cephalotes*, *Crematogaster* (Myrmicinae) y *Dolichoderus* (Dolichoderinae) (D. Giraldo-Cañas et al. 4409 (COL), que visitan las glándulas abaxiales laminales y los nectarios reproductivos extraflorales. También pueden polinizar chuchas, zarigüellas o rabipelados (*Didelphis marsupialis*, Didelphidae), en tanto que algunas especies, por ejemplo, *Marcgravia* spp., se autopolinizarían antes de la apertura de las flores (véanse las numerosas referencias en Giraldo-Cañas, 2011a).

## Tratamiento taxonómico

**Marcgraviaceae Bercht. & J. Presl**, *Prir. Rostlin* 218. 1820, *nom. cons.*

**Género tipo:** *Marcgravia* L.

Lianas o arbustos, raramente terrestres, más comúnmente epífitos o hemiepífitos, trepadores; tallos frecuentemente muy ramificados, generalmente robustos, sinuosos, escandentes, dimorfos solo en *Marcgravia* (tallos juveniles rastreros, adheridos al sustrato por medio de raíces adventicias, con hojas muy reducidas y adheridas al sustrato, y venación hifódroma; tallos adultos fértiles, escandentes, divergentes con respecto a los sustratos, con hojas bien desarrolladas); ramas péndulas, erectas, divergentes o patentes; cortezas estriadas o lisas, escamosas o no, frecuentemente lenticeladas; sin estípulas, sin resinas, sin látex, sin mucílagos. **Hojas** simples, alternas, dísticas (*Marcgravia*) o espiraladas (en los siete géneros restantes), dimorfas en *Marcgravia*, conspicuamente pecioladas, cortamente pecioladas o subsésiles, las hojas más jóvenes convolutas que encierran el extremo distal de las ramas; láminas enteras (raras veces diminutamente crenadas en algunas especies de *Marcgravia*), membranáceas, cartáceas a coriáceas, glabras, simétricas, muy raramente asimétricas, con el ápice rematando en una punta o un mucrón, el mucrón frecuentemente caduco, márgenes planas o ligeramente revolutas, esclereidas abundantes y muy diversas en formas; **glándulas laminales** (= nectarios extra-reproductivos laminales) presentes solo en la cara abaxial, muy variables en número y disposición, sólidas o poriformes, crateriformes, circulares a elípticas, a nivel de la lámina o ligeramente elevadas con respecto a la misma, distanciadas entre sí, generalmente dispuestas en filas submarginales (las glándulas laminales abaxiales muy raramente pueden estar ausentes); venación pinnada o broquidódroma, a menudo hifódroma (en una o en ambas caras), la vena media conspicua. **Inflorescencias** generalmente terminales, muy raramente laterales (condición solo observada en *Marcgravia stonei* y *Schwartzia jimenezii*), paucifloras a más comúnmente multifloras, laxas a más frecuentemente densas, horizontales, erectas o péndulas, espigas (*Sarcopera*), espiciformes, racemosas, umbeladas o umbeliformes (muy cortamente racemosas, pseudoumbelas), muy raramente están presentes en la porción proximal de la inflorescencia de 1–3 brácteas foliáceas no nectaríferas, con textura, color, forma y ornamento similar a las hojas de las ramas maduras, generalmente cóncavas; pedúnculo y raquis glabros o pubérulos, lisos, rugosos, estriados o sulcados, frecuentemente lenticelados; **nectarios reproductivos extraflorales** presentes (generalmente con colores llamativos para el ojo humano, desde verdes, blancos,

amarillos, anaranjados hasta rojos; secretores de néctares frecuentemente fragantes), de tamaño, número, disposición (unas veces ubicados en la base del cáliz, otras en los pedicelos o en el raquis) y formas muy variables (tubulares, sacciformes, cilíndricos, clavados, cocleariformes, galeados, gibosos, subglobosos, ciatiformes, cimbiformes, cocleariformes, cuculados, cupuliformes, urceolados, ventricosos), pediculados (pedículo conspicuo o apenas perceptible a inexistente), con dos aurículas opuestas y aladas en la mayoría de las especies de *Souroubea* y ausentes en los restantes siete géneros; lisos, rugosos, estriados o verruculosos, sólidos a más frecuentemente huecos; muy raramente algunos nectarios reproductivos pueden presentar una flor vestigial e, incluso, una flor completa y fértil en la porción terminal de la urna (esta condición solo se halla en algunos nectarios reproductivos de varias especies de *Marcgravia*); bractéolas 2 (muy raramente ausentes), sepaloideas, persistentes, subopuestas o alternas a más comúnmente opuestas, subyacentes al cáliz o alejadas de este, orbiculares, suborbiculares, ovadas, obtusas a menos frecuentemente emarginadas o deltoides, muy raramente apiculadas, generalmente carnosas y rugosas. **Flores** perfectas, actinomorfas, autógamas a raramente cleistógamas, protándricas o simultáneas, sésiles o poco a notoriamente pediceladas, erectas sobre los pedicelos o conspicuamente oblicuas a estos; cáliz dialisépalo, persistente, sépalos 4 (en *Marcgravia*) o cinco (en los restantes siete géneros), imbricados en dos series, quincunciales o decusados, delgados o carnosos, lisos, rugosos o papilosos, generalmente orbiculares, reflexos, ocasionalmente con las márgenes cartáceas o escariosas; pétalos 4 (en *Marcgravia*) o cinco (en los restantes siete géneros; raramente 3 o 6 en algunas especies de *Souroubea*), imbricados, reflexos, carnosos o coriáceos, ocasionalmente con las márgenes membranáceas, con venación visible o hifódroma, libres o parcial y proximalmente connatos e incluso totalmente connatos en una caliptra caduca en anthesis (esta última condición exclusiva de *Marcgravia*); androceo con estambres dispuestos en una o dos series, tres o cinco estambres por flor en *Ruyschia* y *Souroubea* (muy raramente cuatro en *Souroubea loczyi*), cinco en *Schwartzia jimenezii*, más comúnmente en mayor número [6–80 (–120) en los demás géneros], filamentos libres o proximalmente connatos o adnatos en la base de los pétalos, filiformes, triangulares, lineares a generalmente planos, lisos o verruculosos, anteras dítecas, introrsas, longitudinalmente dehiscentes, basifijas, sub-basifijas a sagitadas o subcordatas, falcadas, triangulares, lineares, ovadas a oblongas; granos de polen tricolporados (colpos cortos), prolato-esferoidales, oblato-esferoidales a esferoidales, exina semitectada y microrreticulada; gineceo sincárpico; ovario súpero, ovado, globoso, turbinado, cónico o piriforme, liso, rugoso, estriado o acostillado, completa o incompletamente 2–20-locular, los lóculos de disposición ascendente u horizontal, placentación parietal (la placenta introducida en los lóculos), óvulos anátropos, tenuinucelados, bitegumentados, escasos a numerosos; estilo 1, apenas perceptible a cónico o cilíndrico; estigma seco, sésil o subsésil, mamiforme, radiado, lobulado, capitado o umbonado, de superficie rugosa a levemente plegada y no papilosa. **Frutos** en bayas, indehiscentes o con 1–4 rupturas irregulares por presión mecánica interna (dehiscencia anomalícida), globosas, generalmente apiculadas (por persistencia del estilo y el estigma), con cáliz y estigma persistentes, mesocarpo generalmente coriáceo, raramente carnosos, epicarpo liso o tuberculado; semillas curvas, reniformes, semilunares, falcadas, ovoides, elípticas u oblongas, translúcidas, amarillentas, rojas, purpúreas o cobrizas a más comúnmente negras, brillantes, reticuladas, funículo muy corto, endosperma craso con embrión curvo y eje alargado, cotiledones cortos y plano-convexos; semillas escasas a más frecuentemente numerosas, dispuestas en una placenta frecuentemente jugosa, dulce y roja o anaranjada.

**Etimología.** El nombre de esta familia se le adjudicó en honor al naturalista y astrónomo alemán Georg Marggraf (también escrito como Marcgrave o Markgraf; 1610–1644), conocido por sus viajes en Brasil (*Christenhusz et al.*, 2017).

**Distribución y composición.** La familia es neotropical y se distribuye desde el centro de México hasta Bolivia y el sur de Brasil, en algunas islas del Pacífico tropical americano de Colombia, Costa Rica y Panamá, así como en las islas del Caribe, tanto en las Antillas

Mayores como en las Antillas Menores, siendo Colombia, Brasil, Ecuador y Perú los países con la mayor riqueza (con 57, 39, 36 y 31 especies, respectivamente) (**Giraldo-Cañas, 2018**); la riqueza específica de esta familia se reduce a medida que se asciende latitudinalmente, y su número va disminuyendo en Mesoamérica y México así: Costa Rica (con 29 spp.), Panamá (24), Nicaragua (10), Guatemala (9), Honduras (8), México (8), Belice (7) y El Salvador (1) (**Giraldo-Cañas, 2018**). Se reconocen ocho géneros de esta familia (**Giraldo-Cañas, 2018**) y 138 especies (**Giraldo-Cañas, 2023; Giraldo-Cañas et al., 2024**), de los cuales tres géneros y ocho especies se han registrado en México, aunque ninguna es endémica del territorio mexicano. No obstante, se espera que el número de Marcgraviaceae en México aumente un poco más cuando haya más inventarios florísticos, principalmente en el estado de Chiapas (**Palmas-Pérez et al., 2013**). Cabe destacar que **Utley (1976)** había registrado cinco especies en la flora mexicana. Las Marcgraviaceae se encuentran más diversificadas en las tierras bajas y medias (0–1500 metros de altitud), aunque unas pocas especies se pueden hallar entre los 2500 y los 3000 m, siendo su principal centro de diversidad el noroeste de Sudamérica (Colombia, Ecuador y Perú), seguido por Brasil. Por otra parte, muchas especies de esta familia exhiben densidades poblacionales muy bajas (**Giraldo-Cañas, 2011a**), lo que implica que sus polinizadores se movilizan y desplazan a distancias muy grandes o amplias (**Simon et al., 2011**).

#### Clave para reconocer los géneros de Marcgraviaceae presentes en México

1. Hojas dísticas; nectarios reproductivos extraflorales dispuestos de manera independiente de las flores; cáliz tetrámero; pétalos connatos totalmente en una caliptra caduca; más de 18 estambres por flor..... **Marcgravia**

1'. Hojas espiraladas; nectarios reproductivos extraflorales ubicados en la base del cáliz o muy próximos a esta; cáliz pentámero; pétalos libres o cortamente connatos en su porción proximal; estambres 3 o 5 por flor (muy raramente 4).

2. Ovario 2-locular; nectarios reproductivos extraflorales semiglobosos a gibosos con la urna sólida; láminas foliares con venación hifódroma..... **Ruyschia**

2'. Ovario 3–5-locular; nectarios reproductivos extraflorales cilíndricos a tubulares con la urna hueca; láminas foliares con venación conspicua..... **Souroubea**

**Marcgravia L.**, Sp. Pl. 1: 503. 1753.

**Especie tipo:** *Marcgravia umbellata* L. (*non Marcgravia umbellata* Griseb.).

Arbustos lianescentes a más comúnmente lianas, terrestres, epífitas o hemiepífitas, trepadoras; ramas dimorfas (los tallos juveniles rastreros, adheridos al sustrato por medio de raíces adventicias, con hojas dísticas sésiles muy reducidas y adheridas al sustrato, la venación hifódroma; tallos adultos fértiles, escandentes, divergentes con respecto a los sustratos, con hojas dísticas pecioladas o subsésiles y bien desarrolladas); corteza frecuentemente lenticelada, las lenticelas variables en forma, distribución y densidad. Hojas dísticas; láminas enteras a raras veces diminutamente crenadas; con glándulas laminales abaxiales muy variables en número, posición y forma, sólidas o poriformes; venación conspicua o hifódroma en una o en ambas caras. Inflorescencias terminales (raramente laterales, condición solo observada en *Marcgravia stonei*), umbeladas, raras veces cortamente racemosas, péndulas (raras veces ligeramente horizontales), densas, ocasionalmente con algunas brácteas foliáceas no nectaríferas, cóncavas, similares en textura, color y forma a las hojas de las ramas adultas; raquis frecuentemente lenticelado, glabro o pubescente, en su extremo distal generalmente claviforme; nectarios reproductivos extraflorales muy desarrollados, conspicuos, apicales y dispuestos en pedicelos independientes de las flores fértiles y que salen del centro distal de la inflorescencia, ocasionalmente con rudimentos florales (una flor vestigial en la porción terminal de la urna del nectario) o muy raramente con alguna flor completa, los nectarios reproductivos extraflorales muy diversos en tamaños, formas, colores, ornamentos y número, corta a largamente pediculados; bractéolas muy cercanas o subyacentes al cáliz, muy raramente ausentes. Flores conspicuamente pediceladas, los pedicelos glabros o pubescentes, frecuentemente lisos, rugosos, lenticelados o papilosos-verrucosos; inserción de la flor al pedicelo erecta en el mismo plano, oblicua o

perpendicular; sépalos 4, decusados; pétalos 4, connatos en toda su extensión y constituyendo una caliptra caduca en antesis; estambres 6–65, filamentos libres, filiformes, aplanados, anteras basifijas, cordadas, subsagitadas, sagitadas, lineares, ovadas a triangulares; ovario 3–20-ocular, óvulos numerosos por lóculo; estilo apenas perceptible o de hasta algunos pocos mm de largo; estigma capitado a umbonado. Frutos en bayas, indehiscentes o con rupturas irregulares por presión mecánica interna (dehiscencia anormalicida), globosas, de textura lisa a más comúnmente tuberculada, ligera a conspicuamente apiculadas; semillas reticuladas, translúcidas, cobrizas, rojas, purpúreas a más comúnmente negras, brillantes, numerosas, inmersas en una pulpa generalmente roja y carnosa.

**Distribución y composición.** Este género se distribuye desde México hasta Bolivia y el sur de Brasil, así como en las islas del Caribe, tanto en las Antillas Mayores como en las Antillas Menores; también se le ha encontrado en algunas islas del Pacífico tropical americano de Colombia, Costa Rica y Panamá. De *Marcgravia* se han registrado cinco especies en México (Giraldo-Cañas, 2018).

**Comentarios.** *Marcgravia* L., con 64 especies, es el género más diversificado de la familia (Giraldo-Cañas, 2018) y el más complejo desde el punto de vista morfológico y taxonómico-nomenclatural. Es el único género en la familia que presenta ramas dimorfas, ya que los tallos juveniles (estériles) son rastreros, adheridos al sustrato por medio de raíces adventicias, con hojas muy reducidas y adheridas al sustrato y con venación hifódroma, razón por la cual se confunden con algunas Araceae trepadoras (e. g. *Monstera* Adans. y *Philodendron* Schott), en tanto que los tallos adultos (fértils) son escandentes, divergentes con respecto a los sustratos, con hojas bien desarrolladas e inflorescencias generalmente péndulas (Giraldo-Cañas, 2011a).

La presencia de heterofilia, la contracción del raquis de la inflorescencia, la diferenciación entre flores fértiles y estériles o atrofiadas, los pétalos completamente fusionados entre sí, que constituyen una caliptra caduca en antesis, el gran número de estambres por flor (hasta 65 estambres), un mayor número de lóculos por ovario (3–20-ocular), la reducción del número de sépalos (4) y de pétalos (4), el sistema de polinización por vertebrados (principalmente murciélagos y aves), así como la anatomía más especializada de la madera, sugieren que *Marcgravia* es el género más avanzado entre las Marcgraviaceae (Delpino, 1869; Dressler, 2004a; Giraldo-Cañas, 2011a, 2018), además de ser el más rico en especies y el de más amplia distribución geográfica (Giraldo-Cañas, 2018).

*Marcgravia* está dividido en dos subgéneros, *M.* subgénero *Marcgravia* (= *M.* subgénero *Plagiothalamium* Wittm., en el cual las flores son oblicuas con relación a los pedicelos) y *M.* subgénero *Orthothalamium* Delpino (en el que las flores se disponen de manera erecta sobre los pedicelos) (Dressler, 2004b).

**Nota.** Dado que no se conocen las ramas juveniles ni sus hojas para todas las especies de *Marcgravia*, en las descripciones de las especies tratadas que aquí se presentan solo se mencionan las características de las hojas de las ramas adultas.

### Clave para reconocer las especies de *Marcgravia* presentes en México

1. Inflorescencias racemosas.
2. Flores erectas sobre los pedicelos..... *M. mexicana*
- 2'. Flores oblicuas sobre los pedicelos
3. Raquis de 6–10 cm de largo; nectarios reproductivos extraflorales galeados, comprimidos lateralmente, de color rojo intenso o anaranjados; 18–25 estambres; venación foliar conspicua en ambas caras..... *M. stonei*
- 3'. Raquis de 1,7–2,2 cm de largo; nectarios reproductivos extraflorales tubulares-sacciformes, de color verde intenso; 12–14 estambres; venación foliar hifódroma en la haz, apenas perceptible en el envés..... *M. pittieri*
- 1'. Inflorescencias en umbelas
4. Flores erectas sobre los pedicelos; nectarios reproductivos extraflorales tubulares-sacciformes, cortamente pediculados, el pedículo de 0,2–0,6 cm de largo; venación hifódroma o apenas perceptible..... *M. brownei*

4°. Flores oblicuas sobre los pedicelos; nectarios reproductivos extraflorales cocleariformes-galeiformes, conspicuamente pediculados, el pedículo de 1,5–4,0 cm de largo; venación conspicua en ambas caras..... *M. nepenthoides*

*Marcgravia brownei* (Triana & Planch.) Krug & Urb., Symb. Antill. 1: 367. 1899. *Marcgravia rectiflora* Triana & Planch. var. *brownei* Triana & Planch., Ann. Sci. Nat. Bot. Sér. 4. 17: 365. 1862. **Sintipo:** Jamaica. Sin localidad, sin fecha, *Purdie s. nro.* [BM! (pro parte), K!, MPU!]. **Lectotipo** (aquí designado): Jamaica. Sin localidad, sin fecha, *Purdie s. nro.* [MPU-013920!; isolectotipos: BM! (pro parte), K-000528238!] (**Figura 1**).



**Figura 1.** *Marcgravia brownei* (Triana & Planch.) Krug & Urb. A y B. Hábito (nótese los tallos ramificados y las hojas dísticas). C. Inflorescencia con flores en antesis (nótese que ésta es péndula y que los nectarios reproductivos extraflorales están ubicados en el extremo distal de la inflorescencia y carecen de flores fértiles). D. y E. Inflorescencias en preantesis (nótese que la caliptra aún persiste en las flores). F., G., H. e I. Infrutescencias y sus detalles (nótese en F. que la dehiscencia es anómala, ya que la ruptura es por presión mecánica y no por fisuras o hendiduras regulares anatómicas).

*Marcgravia ampulligera* Woodson, Ann. Missouri Bot. Gard. 27: 319. 1940. **Tipo:** Panamá. Chiriquí. Trail from Paso Ancho to Monte Lirio, upper valley of Río Chiriquí Viejo, 1500–2000 m, 16 enero 1939, *P. H. Allen 1488* (holotipo: MO!; isotipos: NY!, US!).

*Marcgravia fosbergiana* J. Ewan, Nat. Hist. Misc. 88: 2–4 . 1951. **Tipo:** Colombia. Nariño. Río San Juan at pueblo of San Antonio, 1370 m, 3 septiembre 1944, *J. A. Ewan 16053* (holotipo: US!; isotipos: BM!, NO!).

Lianas terrestres, epífitas o hemiepífitas; ramas adultas con tallos profusamente ramificados, angulosos a cilíndricos, lenticelados. Hojas subsésiles a cortamente pecioladas, el pecíolo de 0,1–0,5 × 0,2–0,3 cm, acanalado; láminas oblongas a lanceoladas, coriáceas, de 6,2–14,0 (15) × 2,0–5,5 cm, asimétricas, agudas, atenuadas a subredondeadas proximalmente, agudas a acuminadas distalmente; vena media conspicua, venación secundaria hifódroma en ambas caras o apenas perceptible en la haz en materiales deshidratados; glándulas laminales conspicuas, numerosas, submarginales, poriformes, dispuestas en filas diagonales. Inflorescencias terminales, péndulas, pedúnculo lenticelado-tuberculado, umbelas, (7) 12–25 (35) flores por inflorescencia; nectarios reproductivos extraflorales (2) 3–7 por inflorescencia, tubulares-sacciformes, verdes, algunas veces con tintes castaños o violáceos, levemente arqueados, ensanchados conspicuamente en su extremo distal, pediculados (el pedicelo de 0,2–0,6 cm de largo), urna claviforme, de 2,4–4,5 × 0,5–0,9 cm, el orificio redondeado y apiculado, muy raramente algunos nectarios reproductivos pueden presentar una flor vestigial en la porción terminal de la urna; bractéolas triangulares, ovadas a suborbiculares, de 2–3 × ca. 2 mm. Flores erectas sobre los pedicelos, pedicelos reflexos a usualmente patentes, conspicuamente tuberculados, (3) 3,7–5,2 (5,8) cm de largo; sépalos suborbiculares, 4,0–5,2 × 7,0–8,0 mm; caliptra cónica-ovada, (10) 12–14 (16) × 7–8 mm; estambres 18–35, filamentos filiformes, aplanados, sinuosos en antesis, blancos, de 10–15 mm de largo en antesis, anteras lineares, castaña-claras, de 2–3 × ca. 0,5 mm; ovario subgloboso a cónico, 6–9-locular, de 4–6 mm de diámetro, ligeramente estriado longitudinalmente o liso; estilo conspicuo, de 2–3 (4) mm de largo; estigma mamiforme, débilmente radiado, de 1–2 mm de diámetro. Frutos en bayas globosas, ligeramentes estriadas longitudinalmente, proximalmente tuberculadas, apiculadas, (9) 12–16 (19) mm de diámetro; semillas numerosas, reniformes, reticuladas, brillantes, rojizas, cobrizas o negruzcas, las cobrizas translúcidas, ca. 1,0 × 0,5 mm, inmersas en una pulpa roja y carnosa.

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta especie es la de más amplia distribución altitudinal y latitudinal entre las Marcgraviaceae, toda vez que se distribuye desde el nivel del mar hasta ca. 3000 m de altitud y desde México hasta Bolivia (**Giraldo-Cañas, 2018**), así como en Jamaica (**Triana & Planchon, 1862**). Quizás también sea la especie más frecuente (una mayor cantidad de individuos por área) (Giraldo-Cañas, obs. pers.). Esta especie fue citada por primera vez en México por **Giraldo-Cañas & Picca (1999)**. *Marcgravia brownei* prefiere las áreas boscosas de montañas húmedas a pluviales, incluidos los bosques de niebla.

**Comentarios.** **Triana & Planchon (1862: 365)** consignaron lo siguiente “*Stirps jamaicensis, e speciminibus Purdieanis cum icone Browniana perfecte congruentibus hic descripta.*”, razón por la cual el ejemplar *Purdie s. nro.* (MPU-013920!) de Jamaica debe ser elegido como lectotipo; además, es el más completo y no presenta mezclas de materiales de especies diferentes, como sí sucede con el duplicado depositado en BM. La lectotipificación de esta especie había sido propuesta, aunque de manera inédita, por S. Dressler en el año 1994 (Fl. Mesoamer. 2: inédito, fuente: <https://www.tropicos.org/name/19800100>). Lleva más de 31 años sin publicarse (según se desprende de la información consignada en los ejemplares K-000528238 y MPU-013920), y por ello aquí se formaliza. Por otra parte, *M. brownei* debe ser ubicada en *M.* subgénero *Orthothalamium* Delpino, ya que esta posee flores erectas sobre los pedicelos y, además, presenta nectarios reproductivos tubulares-sacciformes.

### Material adicional examinado

**México. CHIAPAS:** La Trinitaria, 1300 m, 16°04'N–91°37'O, 23 enero 1973, *D. E. Breedlove & A. R. Smith 32190* (MEXU, MO). La Trinitaria, 1300 m, 16°04'N–91°39'O, 13 mayo 1973, *D. E. Breedlove 35125* (MEXU, MO). La Trinitaria, 1450 m, 16°05'N–91°38'O, 19 octubre 1974, *D. E. Breedlove 38788* (MEXU, MO). La Trinitaria, E of Laguna Tziscaco, Monte Bello National Park, 1380 m, 16°04'N–91°40'O, 18 diciembre 1890, *D. E. Breedlove 48747* (MO). Rayón, 1700 m, 17°12'N–92°58'O, 10 enero 1981, *D. E. Breedlove & B. T. Keller 49328* (MEXU, MO). Tila, 1700 m, 17°10'N–92°24'O, 28 marzo 1981, *D. E. Breedlove 50461* (MEXU, MO). 5 km al oeste del lago Tziscaco, en el parque nacional Lagos de Montebello, 23 junio 1982, *E. Cabrera et al. 2943* (MEXU). La Independencia, 1330 m, 16°06'N–91°36'O, 28 enero 1979, *T. B. Croat 46701* (MO). La Trinitaria, carretera Tziscaco-Benito Juárez, 4 km al nororiente de desvío Tziscaco, 1480 m, 16°05'29"N–91°38'08"O, 7 noviembre 1995, *H. Mejía & A. Luna 940* (MEXU). 10 julio 1984, *A. Méndez Girón 7746* (MEXU, MO). La Trinitaria, 15°49'N–91°57'O, 15 marzo 1986, *A. Méndez Girón 8890* (MEXU, MO). Selva Negra, Rincón Chamula a Rayón, 30 diciembre 1959, *F. Miranda 9184* (MEXU). Tila, al pie del cerro Ak'bana, 800 m, 17°22'N–92°28'O, 10 mayo 1983, *A. S. Ton 5983* (MEXU, MO). Tila, al pie del cerro Acavaina, 5 marzo 1984, *A. S. Ton 7346* (MEXU).

*Marcgravia mexicana* Gilg, Bot. Jahrb. Syst. 25 (Beibl. 60): 26. 1898. **Tipo:** México. Veracruz. Mirador, julio 1897, *H. Wawra 1132* (holotipo: W; fotografía en F!) (**Figura 2**).

Lianas epífitas o hemiepífitas; ramas adultas con tallos angulosos, lenticelados. Hojas cortamente pecioladas, peciolo de 0,16–0,20 × ca. 0,25 cm; láminas lanceoladas a elípticas, de 7–10 × 1,7–3,2 cm, cuneadas a subobtusas proximalmente, acuminadas distalmente;



**Figura 2.** *Marcgravia mexicana* Gilg. **A.** y **B.** Inflorescencias en preantesis (nótese que aún persisten las caliptras, excepto en dos flores de **B.**, en las cuales ya están expuestos el androceo y el gineceo). **C.**, **D.** y **E.** Infrutescencias (nótese que la dehiscencia es anomalocida).

glándulas laminales abaxiales diminutas, punctiformes-poriformes, submarginales a marginales, dispuestas uniformemente, con dos glándulas más grandes, opuestas y ubicadas en la base de la lámina abaxial; venación pinnada, la vena media conspicua, el resto de las venas apenas perceptibles. Inflorescencias muy cortamente racemosas (umbeliformes), terminales, péndulas, pedúnculo liso a lenticelado, 14–36 (40) flores por inflorescencia; nectarios reproductivos extraflorales 1–4 por inflorescencia, tubulares-sacciformes, verde-amarillentos o verdes con tintes vináceos, pediculados (pedículo de 0,6–0,8 cm de largo), urna urceolada, rugosa, de 1,2–1,8 (2,0) cm de largo, algunos nectarios reproductivos muy raramente pueden presentar una flor vestigial en la porción terminal de la urna; bractéolas redondeadas, fimbriadas o enteras, de 1,3–1,5 × 2,8–3,0 mm. Flores erectas sobre los pedicelos, los pedicelos lenticelados-tuberculados, de 3,3–6,0 cm de largo; sépalos suborbiculares, de 1,5–2,0 × 3–5 mm; caliptra cónica-ovada, roja y opaca, de 6–8 × 4–5 mm; estambres 22–26, filamentos aplanados, más angostos distalmente, verdes muy claros, anteras subsagitadas, blancas; ovario globoso a ovado, de 4–6 mm de diámetro; estilo apenas perceptible; estigma mamiforme, ca. 1 mm de diámetro. Frutos en bayas globosas, apiculadas, lisas a tuberculadas, rojizas a vináceas, de 8–12 mm de diámetro; semillas numerosas, de contorno ligeramente irregular, alargadas, reticuladas, de 0,9–1,1 × 0,5–0,6 mm, pulpa roja, carnosas.

**Distribución geográfica y ecológica.** *Marcgravia mexicana* se distribuye en Costa Rica, Guatemala, México y Nicaragua, entre el nivel del mar y los 1200 metros de altitud. Esta especie es propia de bosques húmedos a muy húmedos, tanto primarios como secundarios.

**Comentarios.** Si bien presenta inflorescencias muy cortamente racemosas, *Marcgravia mexicana* no pertenece al grupo *Galeatae* Wittm. de *M.* subgénero *Marcgravia*, ya que esta especie posee flores erectas sobre los pedicelos y, además, presenta nectarios reproductivos tubulares-sacciformes, nunca galeados. Por ello esta especie debe ser ubicada en *M.* subgénero *Orthothalamium* Delpino.

#### Material adicional examinado

**México. CHIAPAS:** Ocosingo, 300 m, 17°07'N–91°25'O, 5 enero 1981, *D. E. Breedlove 49175* (MO, NY). **OAXACA:** Municipio Santiago Choapán, río Tercero, Santo Domingo Lataní, 1150 m, 17°24'00"N–95°54'40"O, 5 diciembre 1996, *G. Ibarra Manríquez et al. 4048* (MEXU, MO). **PUEBLA:** Hueytamalco, campo experimental "Las Margaritas", Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), 480 m, 20°00'40"N–97°18'36"O, 26 abril 2008, *G. Ibarra Manríquez et al. 5616* (MEXU, MO). **VERACRUZ:** Municipio Catemaco, lado NE del lago Catemaco en cerro al E de Coyame, 550 m, 29 octubre 1971, *J. H. Beaman 5210* (MEXU, US). San Andrés Tuxtla, estación de biología tropical Los Tuxtlas, 18°35'N–95°05'O, 27 marzo 1974, *J. I. Calzada 1174* (F, MEXU). San Andrés Tuxtla, estación de biología tropical Los Tuxtlas, 200 m, 18°34'N–95°04'O, 16 noviembre 1984, *G. Ibarra Manríquez et al. 2145* (MEXU, MO). Ejido de Sihuapán, San Andrés Tuxtla, *F. Ponce 148* (MEXU, MO). Near San Martín Tlaotepec Zacuapán, abril 1917, *C. A. Purpus 7792* (US). Tenampa, El Copalito, 850 m, 23 marzo 1973, *F. Ventura 8055* (MO). Sin estado, sin localidad y sin fecha: *M. Sessé & J. M. Mociño 2266* (F, MA, dos pliegos).

***Marcgravia nepenthoides* Seem., J. Bot. 8: 245. 1870. Tipo:** Nicaragua. Mountain forest of Chontales, diciembre 1867, *B. Seemann 9* (holotipo: K!; isotipos: BM!, K!) (**Figura 3**).

***Marcgravia tonduzii* Gilg, Bot. Jahrb. Syst. 42: 125. 1908. Tipo:** Costa Rica. Forêts de Las Vueltas, Tucurriques, 635–700 m, enero 1899, *A. Tonduz 12965* [holotipo: B (destruido); isotipos: CR, F-fotografía!, G!, M!, US!, dos pliegos]. **Lectotipo** (aquí designado): Costa Rica. Forêts de Las Vueltas, Tucurriques, 635–700 m, enero 1899, *A. Tonduz 12965* (US-00517075!; isolectotipos: CR, G-00353414!, M-0213154!, US-00113848!).

Lianas epífitas o terrestres; ramas adultas con tallos flexuosos, angulosos, lenticelados, escamosos. Hojas pecioladas, el peciolo canaliculado, robusto, retorcido, de 0,3–0,9 × 0,2–0,4 cm; láminas oblongas, elípticas o lanceoladas, coriáceas, raramente cartáceas,



**Figura 3.** *Marcgravia nepenthoides* Seem. **A.** y **B.** Inflorescencias en antesis. **C.** y **D.** Detalle de las inflorescencias y los nectarios reproductivos extraflorales

de 9–16 (20) × 2,8–6,2 (7,1) cm, obtusas, redondeadas o subagudas proximalmente, acuminadas distalmente; vena media conspicua, el resto de la venación también conspicua en ambas caras; glándulas laminales abaxiales diminutas, poriformes, dispuestas en una fila submarginal a cada lado de la lámina. Inflorescencias terminales, péndulas, umbelas, densas, 18–42 flores por inflorescencia, pedúnculo lenticelado-tuberculado; raquis capitado-globoso; nectarios reproductivos extraflorales (2) 3–6 (8) por inflorescencia, cocleariformes-galeiformes, verdes, purpúreos, rojizos o castaño-oscuros, conspicuamente pediculados (pedículo de 1,5–4,0 cm de largo, canaliculado y lenticelado), urna de 1,3–3,5 × 0,5–2,0 cm, muy raramente algunos nectarios reproductivos pueden presentar una flor vestigial en la porción terminal de la urna; bractéolas suborbiculares, de 1,5–3,4 × 3,0–5,0 mm. Flores oblicuas sobre los pedicelos, los pedicelos lenticelados-tuberculados, de 2,2–3,6 cm de largo; sépalos suborbiculares a orbiculares, de 2,5–4,0 × 4,0–6,3 mm, desiguales en tamaño; caliptra cónica, de 6,0–10,0 × 3,0–5,0 mm; estambres 24–30, filamentos lineares, libres, aplanados, más angostos hacia su porción distal, verdes o blancos, de 3,2–7,8 mm de largo, anteras de 1,9–2,1 mm de largo, blanquecinas, amarillentas a rosas muy claras o castañas claras; ovario subgloboso, verde, 10–11-locular, de 2,9–3,1 mm de diámetro; estilo de 1–2 mm de largo; estigma mamiforme, débilmente radiado, de 1–2 mm de diámetro. Frutos en bayas globosas, de 12–15 mm de diámetro, apiculadas; semillas numerosas, reticuladas, rojizas, dispuestas en una pulpa roja y carnosas.

**Nombre popular.** Bejuco de canasta (Veracruz)

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta especie se distribuye desde México hasta el norte de Colombia, muy cerca de la frontera con Panamá, entre el nivel del mar y los 1000 m de altitud, principalmente en bosques muy lluviosos y bien conservados. *Marcgravia nepenthoides* fue citada por primera vez en México por **Giraldo-Cañas & Picca** (1999).

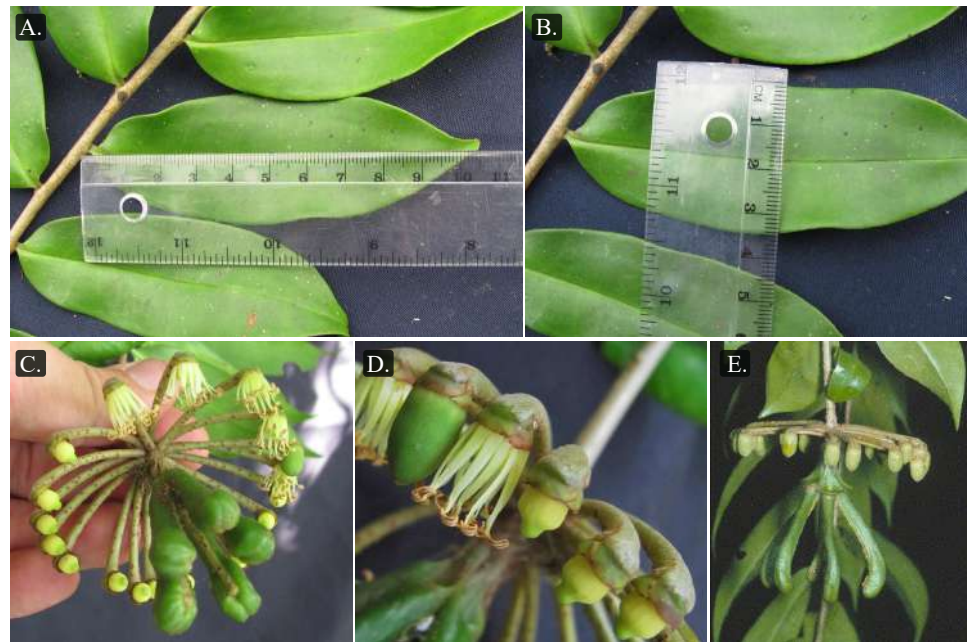
**Comentarios.** Dado que el holotipo de *Marcgravia tonduzii* Gilg, depositado en el herbario de Berlín (B), fue destruido durante los bombardeos de la Segunda Guerra

Mundial, se propone aquí su lectotipificación. *Marcgravia nepenthoides* es fácilmente reconocible por sus nectarios reproductivos cocleariformes-galeiformes y conspicuamente pediculados, cuyo pedículo es de 1,5–4,0 cm de largo, siendo uno de los más largos entre los miembros de esta familia. Esta especie debe ser ubicada en *M.* subgénero *Marcgravia*, ya que esta posee flores oblicuas sobre los pedicelos.

#### Material adicional examinado

**México. CHIAPAS:** Ocosingo, 3 km al S de Lacanja-Chanzayab, o 5 km al O de Bonampak, 350 m, 16°42'00"N–91°06'36"O, 11 agosto 1984, *E. M. Martínez 6964* (MEXU, MO, NY). Ocosingo, Nuevo Guerrero, sobre el camino Palenque-Boca Lacantum, 340 m, 16°59'24"N–91°17'24"O, 14 abril 1986, *E. M. Martínez 18145* (MEXU, MO). **OAXACA:** Santa María Chimalapa, distrito de Juchitán, campamento maderero principal de la compañía Foresta Industrial, cerca del límite de Oaxaca-Veracruz, 45 km al NE de Real de Sarabia, 280 m, 4 marzo 1978, *C. H. Perino 3196* (MEXU). Santa María Chimalapa, distrito de Juchitán, San Antonio Nuevo Paraíso (en los alrededores), Chaparrera, cañada a orillas del río, 220 m, 17°09'38"N–94°21'08"O, 27 junio 1999, *J. Rivera H. et al. 1411* (MEXU). Municipio Matías Romero, ca. 22 km al S de Esmeralda, ca. 9 km al S del aserradero La Floresta, lomas al sur del río Verde, 290 m, 17°01'N–94°49'O, 26 marzo 1981, *T. Wendt et al. 3069* (MEXU, XAL). **VERACRUZ:** Municipio Las Choapas, rancho "El Milagro", 5 km en línea recta al suroeste (202°) de la colonia Nueva Tabasqueña, colectada en arroyo, 115 m, 17°31'18"N–94°01'48"O, 28 abril 2002, *C. Gallardo H. et al. 2827* (MEXU).

*Marcgravia pittieri* Gilg, Bot. Jahrb. Syst. 42 (1): 124–125. 1908. **Tipo:** Costa Rica. Río La Unión, vallée du Diquís, 200 m, 28 marzo 1898, *H. Pittier 12118* [holotipo: B (destruido); isotipos: BR!, US!]. **Lectotipo** (aquí designado): Costa Rica. Río La Unión, vallée du Diquís, 200 m, 28 marzo 1898, *H. Pittier 12118* (US-00113842!; isolectotipo: BR!) (**Figura 4**).



**Figura 4.** *Marcgravia pittieri* Gilg. **A.** y **B.** Hojas (nótese que las hojas son muy cortamente pecioladas y, además, la venación es hifódroma en la haz). **C.** Inflorescencia con cinco flores con el androceo conspicuamente desarrollado, las demás flores solo exhiben el ovario y el estigma. **D.** Detalle de las flores, una con caliptra, otras con androceo expuesto y otras con el ovario y el estigma expuestos. **E.** Inflorescencia en preantesis (nótese que las caliptras aún no se han desprendido de las flores)

*Marcgravia guatemalensis* Standl, Contr. U.S. Natl. Herb. 20 (6): 220. 1919. **Tipo:** Guatemala. Alta Verapaz. Near the finca Sepacuité, 28 marzo 1902, *O. F. Cook & R. F. Griggs 230* (holotipo: US!; isotipo: US!).

Lianas terrestres o epífitas; ramas adultas con tallos generalmente angulosos o subcilíndricos, lenticelados. Hojas cortamente pecioladas, pecíolo canaliculado, ligeramente aplanado, de 0,2–0,4 × ca. 0,2 cm; láminas lanceoladas a más comúnmente elípticas u oblongas, cartáceas o coriáceas, de 8,3–14,8 × 1,8–3,7 cm, base aguda, obtusa a redondeada, ápice abrupta y conspicuamente acuminado, margen entera; vena media conspicua, el resto de la venación hifódroma en la haz y apenas perceptible en el envés; glándulas laminales abaxiales escasas, ligeramente perceptibles, poriformes. Inflorescencias terminales, péndulas, muy cortamente racemosas (pseudoumbelas), con (12) 15–25 flores por inflorescencia; raquis claviforme-irregular, de 1,7–2,2 cm de largo, generalmente lenticelado; nectarios reproductivos extraflorales 3–6 por inflorescencia, de color verde intenso, apicales, pediculados (pedículo de 0,3–0,9 cm de largo), urna tubular-sacciforme con su extremo distal claviforme, ligeramente asimétrica y curva en su extremo distal, tuberculada, de (2,2) 3,2–4,0 × 0,3–0,5 cm; bractéolas opuestas, sepaloideas, suborbiculares a orbiculares, de 0,9–1,1 × ca. 1 mm. Flores oblicuas sobre los pedicelos, los pedicelos levemente sinuosos, lenticelados-tuberculados, ocasionalmente puberulentos, de 2,7–5,7 cm de largo; sépalos orbiculares a ovados, cartáceos, de 1,4–1,6 × 1,5–1,7 mm; caliptra ovoide a cónica, obtusa, verde muy clara a verde intenso, de 7–10 × 6–7 mm; estambres 12–14, filamentos aplanados, blanquecinos a verdes muy claros, anteras cremas; ovario cónico-globoso, verde-amarillento, de 3,0–3,3 × ca. 3,0 mm; estilo apenas perceptible; estigma mamiforme, de color verde intenso, de 0,7–0,8 mm de diámetro. Frutos en bayas globosas, de 9–12 mm de diámetro, tuberculadas, ligeramente apiculadas; semillas cobrizas, brillantes, reticuladas, dispuestas en una pulpa roja y carnosa.

**Distribución geográfica y ecológica.** *Marcgravia pittieri* se distribuye en Costa Rica, Guatemala, México, Nicaragua y Panamá, entre el nivel del mar y los 1000 m de altitud; es escasa y prefiere los hábitats boscosos muy húmedos.

**Comentarios.** Dado que el holotipo de *Marcgravia pittieri* Gilg, depositado en el herbario de Berlín (B), fue destruido durante los bombardeos de la segunda guerra mundial, aquí se propone su lectotipificación. La lectotipificación de esta especie había sido propuesta, pero de manera inédita, por S. Dressler en el año 1994 (Fl. Mesoamer. 2: inédito, fuente: <https://www.tropicos.org/name/19800084>), y lleva más de 31 años sin publicarse (según se desprende de la información consignada en el ejemplar US-00113842), razón por la cual aquí se formaliza. *Marcgravia pittieri* debe ser ubicada en *M.* subgénero *Marcgravia*, ya que esta posee flores oblicuas sobre los pedicelos. Esta especie fue citada por primera vez en México por **Giraldo-Cañas & Picca** (1999, *sub Marcgravia guatemalensis*).

### Material adicional examinado

**México. OAXACA:** Región Istmo, distrito Juchitán, municipio de Santa María Chimalapa, arroyo Seco, camino a La Cabaña, selva alta perennifolia, 180 m, 20 marzo 1995, *S. Salas M. 975* (OAX).

*Marcgravia stonei* Utley, Brenesia 9: 52. 1976. **Tipo:** México. Chiapas. On trail from Pueblo Nuevo Solistahuacán to Simojovel, just over ridge Pueblo Nuevo Solistahuacán, 17°09'00"N–92°53'24"O, 4 febrero 1971, *D. E. Stone & C. R. Broome 2827* (holotipo: DUKE!; isotipos: F!, MEXU!, MICH!, MO!, US!) (**Figura 5**).

Lianas epífitas o hemiepífitas; ramas adultas con tallos angulosos a subcilíndricos o cilíndricos, profusamente ramificados, lenticelados. Hojas pecioladas, pecíolo canaliculado, de 0,3–0,5 × 0,2–0,3 cm; láminas elípticas, lanceoladas, oblongas u ovadas, coriáceas a cartáceas, de 4,2–12,3 × 2,0–4,4 cm, base cuneada a obtusa, ápice agudo a acuminado, margen entera; venación pinnada, vena media conspicua, venación secundaria conspicua en ambas caras; glándulas laminales abaxiales diminutas, muy próximas entre sí, las medias y las distales submarginales a marginales, las proximales cercanas a la vena media.



**Figura 5.** *Marcgravia stonei* Utley. **A, B y C.** Inflorescencias (nótese el raquis conspicuo, así como el gran número de flores y nectarios reproductivos extraflorales por inflorescencia; además, los nectarios reproductivos extraflorales son galeados, rostrados, lateralmente comprimidos y rojos o anaranjados).

Inflorescencias racemosas, laterales o terminales, densas, péndulas, 45–108 flores fértiles por inflorescencia; pedúnculo lenticelado, ocasionalmente con 1 o 2 brácteas foliáceas, cóncavas, similares en textura, color y forma a las hojas de las ramas adultas; raquis de 6–10 cm de largo, lenticelado; nectarios reproductivos extraflorales 7–27 por inflorescencia, galeados, comprimidos lateralmente, rostrados, pediculados (el pedicelo de 0,4–0,9 cm de largo, anguloso), carnosos, de color rojo intenso o anaranjados, raramente de color rosa muy claro, urna angular, aquillada, con venación conspicua, urnas muy grandes, de 4,0–5,8 × 3,0–4,0 cm; bractéolas subopuestas a más comúnmente opuestas (algunas veces ausentes), sepaloideas, de 1,5–2,5 × 1,5–2,0 mm, subtriangulares a rotundas u ovadas, agudas a redondeadas, 6–12 mm alejadas del cáliz. Flores oblicuas sobre los pedicelos, los pedicelos lisos o lenticelados y de hasta 5,6 cm de largo; sépalos suborbiculares a ovados, cartáceos, de 2,2–4,5 × 4,0–6,0 mm; caliptra ovoidea, obtusa, verde clara a amarillenta, de 8–10 × 5–9 mm; estambres 18–25, filamentos libres, planos, lineares a obovados, distalmente agudos, blancos, de 3,0–4,2 × ca. 1 mm, anteras triangulares, obtusas a emarginadas, subsagitadas a sub-basifijas, de color crema, de 2,5–4,5 × 8,0–1,3 mm; ovario subgloboso, 9–10-locular, de 4–5 mm de diámetro; estilo de 1–2 mm de largo; estigma radiado, obtuso, ca. 1 mm de diámetro. Frutos en bayas subglobosas a globosas, umbonadas, tuberculadas, de 11–13 mm de diámetro; semillas numerosas, rojas, reticuladas, ca. 1,1–1,4 mm de largo.

**Nombre popular.** Gallitos (Oaxaca)

**Distribución geográfica y ecológica.** Dressler (2000), Villaseñor (2016) y Giraldo-Cañas (2018) consideraron a *M. stonei* endémica de México, pero esta especie también se encuentra en Honduras [departamento de Comayagua, *T. Hawkins et al. 632* (MEXU-tres duplicados!, MO!), especímenes determinados por J. F. Utley]. Dada su distribución en Honduras y México, a esta especie también se le podría encontrar en Guatemala y Belice, pero su presencia en estos dos países no ha sido confirmada. *Marcgravia stonei* prefiere los bosques húmedos a pluviales de montaña, así como los bosques de niebla, generalmente bien conservados, aunque también se le puede hallar en bosques secundarios, ubicados entre los 1300 y los 2100 m de altitud.

**Comentarios.** Esta especie es fácilmente reconocible por sus inflorescencias conspicuamente racemosas (raquis 6–10 cm de largo), por sus grandes nectarios reproductivos galeados, rostrados, lateralmente comprimidos y rojos o anaranjados (raramente de color rosa muy claro), los cuales, además, son muy numerosos (7–27 nectarios reproductivos por inflorescencia). Ésta es, quizás, la especie que más flores y más

nectarios reproductivos presenta por inflorescencia entre todas las *Marcgravia* conocidas. También es necesario destacar que esta especie es, junto con *Schwartzia jimenezii* (Standl.) Bedell (de Costa Rica), las únicas que presentan inflorescencias laterales entre todas las Marcgraviaceae conocidas (Giraldo-Cañas, 2011a). *Marcgravia stonei* debe ser ubicada en el grupo *Galeatae* de *M.* subgénero *Marcgravia*, ya que ésta posee inflorescencias racemosas, nectarios reproductivos galeados y flores oblicuas sobre los pedicelos (véanse Dressler, 2000; Giraldo-Cañas, 2002).

#### Material adicional examinado

**México. CHIAPAS:** Vicinity of Pueblo Nuevo Solistahuacán, 125 km NE of Tuxtla Gutiérrez, cloud forest at edge of road on steep N side of mountain ridge, 2 km from top at Puerto del Viento, 12 km NW of Pueblo Nuevo, 1700 m, 22–30 junio 1963, S. S. Tillett 636-68 (US, paratipo). **OAXACA:** Municipio de Comaltepec, distrito Ixtlán, 11,1 km SO de La Esperanza, carretera Oaxaca-Tuxtepec, entrada al camino de San Isidro Yolox, 1950 m, 17°36'N–96°23'O, 17 diciembre 1987, A. Campos V. & R. Torres 900 (MEXU). Distrito de Ixtlán, 13 km al norte de La Esperanza, 1900 m, 9 abril 1987, A. García M. et al. 3040 (MEXU). Rancho Grande, 27 diciembre 1940, F. Miranda 1116 (MEXU). Municipio de Totontepec, distrito Mixe Río Toro, 6 km al N de Totontepec, 11 abril 1988, E. Ramírez G. 743 (MEXU). Montebello, 1300 m, 6 marzo 1919, B. P. Reko 4140 (MEXU, US). 1 km al N de La Esperanza, sierra de Juárez, 1500 m, 2 marzo 1974, M. Sousa et al. 4402 (MEXU, MO). Ixtlán, 12 km al SO de La Esperanza, en la entrada al camino a San Isidro Yolox, carretera Tuxtepec-Oaxaca, 2020 m, 17°36'00"N–96°23'00"O, 23 octubre 1987, R. Torres C. & L. Cortés 10220 (MEXU, MO). **VERACRUZ:** Municipio de Xico, arriba de Xico, rumbo al Cofre de Perote, ca. 1400–1500 m, M. Cházaro 1253 (F, MEXU, XAL).

**Ruyschia Jacq.**, Enum. Syst. Pl. 2, 17. 1760. **Especie tipo:** *Ruyschia clusiifolia* Jacq. *Caracasia* Szyszyl., Nat. Pflanzenfam. 3(6a): 162, 164. 1894. **Especie tipo:** *Caracasia tremadena* (Ernst) Szyszyl.

*Vargasia* Ernst, Vargas, Considerado Botánico 21–23. 1877, nom. illeg. hom. [*non Vargasia* Bertero ex Spreng. (Sapindaceae), *non Vargasia* DC. (Asteraceae)]. **Especie tipo:** *Vargasia tremadena* Ernst

Dado que en la flora mexicana sólo se ha encontrado una especie de *Ruyschia*, aquí no se presenta su descripción genérica.

**Distribución y composición.** Este género se distribuye desde México hasta Bolivia, así como en las Antillas Menores (Dominica, Guadalupe, Martinica, Trinidad y Tobago); para este género se reconocen nueve especies, una de las cuales se ha registrado en México (Giraldo-Cañas, 2018).

**Comentarios.** Dressler (2004a) considera a este género y a *Souroubea* como los más basales de la familia, dada la naturaleza de la morfología de su inflorescencia y sus síndromes de polinización por insectos en *Ruyschia* o por insectos y aves en *Souroubea*. Los dos constituyen la tribu Ruyschieae de la subfamilia Noranteoideae (Giraldo-Cañas, 2018) y quizás, deban combinarse en un único género, *Ruyschia* –género válido más antiguo–, toda vez que ambos poseen hojas espiraladas, inflorescencias largamente racemosas, nectarios reproductivos ubicados en la base de la flor (muy próximos al cáliz), flores pentámeras (muy raramente 3–6-meras en algunas especies de *Souroubea*), ovario 2–(3–4)-locular en *Ruyschia* y 3–5-locular en *Souroubea*, así como un número reducido de estambres (3 o 5 por flor en ambos géneros, muy raramente 4 en *Souroubea*) (Giraldo-Cañas, 2011a, 2018). Además, según Punt (1971), los granos de polen de *Ruyschia* y *Souroubea* no pueden diferenciarse. Quizás la diferencia que tradicionalmente más se ha usado para separar estos dos géneros es el desarrollo de dos apéndices auriculares en la boca de cada nectario reproductivo en *Souroubea* (ausentes en *Ruyschia*), aunque dichos apéndices pueden estar atrofiados en algunas especies de *Souroubea*. Por otra parte, las especies de *Ruyschia* y *Schwartzia peruviana* Giraldo-Cañas (Giraldo-Cañas,

2023) presentan los nectarios reproductivos extraflorales más pequeños entre todas las Marcgraviaceae conocidas.

***Ruyschia enervia* Lundell**, Phytologia 1 (7): 245–246. 1937. **Tipo:** Belice: El Cayo. Valentín-Retiro road, in advanced forest, limestone valley, 16°45'59"N–89°09'45"O, junio-agosto 1936, C. L. Lundell 6308 (holotipo: MICH!; isotipos: LL!, MICH!, MO, NY!, US!).

***Ruyschia longistylis* Standl. & Steyerl.**, Publ. Field Mus. Nat. Hist., Bot. Ser. 23 (4): 175. 1944. **Tipo:** Guatemala. Huehuetenango. Cafetal of Finca Soledad, 5 miles southeast of Barillas, Sierra de Los Cuchumatanes, 1150 m, 26 julio 1942, J. A. Steyermark 49545 (holotipo: F!; isotipos: NY!, US!).

Arbustos lianescentes, epífitos, profusamente ramificados, tallos teretes a ligeramente angulosos, corteza lisa o levemente rugosa, glabra. Hojas espiraladas; pecíolos conspicuamente robustos, canaliculados, generalmente aplanados, de 0,5–0,8 × 0,2–0,3 cm; láminas coriáceas, oblongas, obovadas, elípticas a lanceoladas, de 7,4–13,7 × 2,2–5,7 cm, ápice obtuso, apiculado, base obtusa, redondeada a cuneada, márgenes revolutas; vena media conspicua en ambas caras, el resto de la venación hifódroma; glándulas laminales abaxiales irregulares en forma, crateriformes, de 0,8–1,3 mm de diámetro, escasas, 4–10 glándulas por hoja y dispuestas en una fila submarginal. Inflorescencias terminales, racemosas con apariencia espiciforme, multifloras, erectas; raquis de 7–18 × 0,3–0,6 cm, rugoso, sulcado, glabro, verde claro; pedicelos de 0,3–0,6 × 0,10–0,15 cm, verde claros; nectarios reproductivos extraflorales ubicados en la base del cáliz, semiglobosos a gibosos, cóncavos abaxialmente, simétricos o no, de color verde claro y opaco, pedículo apenas perceptible (ca. 0,05 mm de largo), urna de 0,3–0,5 × 0,3–0,4 cm, apiculada, sólida; bractéolas 2, sepaloideas, suborbiculares a ovadas, adpresas al cáliz, de 1,5–2,0 × 2,8–3,0 mm. Flores 5-meras; sépalos 5, imbricados, ligeramente desiguales (los dos sépalos externos un poco más largos y anchos que los tres internos), suborbiculares, de 2–3 × 3,8–4,0 mm, verde claros; pétalos 5, elípticos, naviculares en preantesis, reflexos en antesis, de 6–9 × 4–5 mm, verde claros; estambres 5, filamentos libres entre sí, aplanados, expandidos distalmente para constituir un conectivo amplio, de 2,1–5,0 × 0,9–1,0 mm ( más angostos en su extremo distal), anteras ovoides, subsagitadas a sagitadas, de 1,8–2,0 × 0,8–1,0 mm; ovario 2-locular, subgloboso, acostillado, de 2,9–3,1 (4,0) × 1,8–2,0 (3,4) mm; estilo cilíndrico, conspicuo, de hasta 3 mm de largo, estigma 4–5 lobulado. Frutos en bayas, globosas, rojizas, conspicuamente apiculadas, de 6–8 mm de diámetro, indehiscentes o con rupturas irregulares por presión mecánica interna (dehiscencia anomalicida); semillas ligeramente curvas, negras, brillantes, reticuladas, inmersas en una pulpa roja.

**Iconografía.** Utley (1976, p. 59; 1984, p. 9); Palmas-Pérez *et al.* (2013, p. 172)

**Nombres populares.** Sakil tzakumal, tzacum at, tsakumtzat (Tzeltal) (Chiapas)

**Distribución geográfica y ecológica.** *Ruyschia enervia* se distribuye en Belice, Costa Rica, Guatemala, Honduras y México, en donde prefiere los bosques muy húmedos, entre los 100 y los 1200 m de altitud.

**Comentarios.** Esta especie es fácilmente reconocible entre todas las especies mexicanas de Marcgraviaceae por la combinación de las siguientes características: láminas foliares con venación hifódroma, presencia de glándulas laminales abaxiales submarginales irregulares en forma y ligeramente sobreelevadas con respecto a la epidermis (crateriformes), inflorescencias racemosas de apariencia espiciforme y con un conspicuo raquis (de 7–18 cm de largo), nectarios reproductivos diminutos, cóncavos abaxialmente y con urnas sólidas y apiculadas, cinco estambres por flor y ovario 2-locular.

#### Material adicional examinado

**México. CHIAPAS:** Steep-walled canyon along a fast moving stream, 2–4 km below Ixhutatán along road to Pichucalco, 1200 m, 17°16'12"N–93°01'12"O, 23 septiembre 1981, D. E. Breedlove 53025 (MEXU, MO). Ejido M. Hidalgo, camino de terracería de Yajalon Tumbala, municipio de Tumbala, 650 m, 18 agosto 1977, J. I. Calzada *et al.* 3360

(MEXU). Ocosingo, 5 km SW of Santo Domingo, 120 km SE of Palenque on road to Bonampak, 600 m, 16°59'24"N-91°24'36"W, 13 mayo 1982, *G. Davidse et al. 20415* (MEXU, MO). Municipio de Berriozábal, a 12 km al N de Berriozábal, 600 m, 16 mayo 1989, *E. Martínez S. & M. A. Soto M-24242* (MEXU). Municipio Tenejapa, en la cueva de "Ne chen cruz pilal", 900 m, 16°54'N-92°26'O, 10 mayo 1982, *A. S. Ton 4271* (en esta misma ficha de herbario también aparece el recolector como *A. Méndez Ton*) (MEXU, MO). Municipio Yajalón, localidad Bawitz, 1000 m, 25 septiembre 1982, *A. S. Ton 4662* (en esta misma ficha de herbario también aparece el recolector como *A. Méndez Ton*) (MEXU). Municipio de Yajalón, localidad arroyo Azufre, 700 m, 6 septiembre 1986, *A. S. Ton 6606* (en esta misma ficha de herbario también aparece el recolector como *A. Méndez Ton*) (MEXU). Cerros al NE de Rancho Ocote, 30 km al NO de Ocozocuantla, 29 mayo 1950, *F. Miranda 6326* (MEXU). VERACRUZ: Municipio San Andrés Tuxtla, estación de biología tropical Los Tuxtlas, localidad El Chichinal, 16 km al N de San Andrés Tuxtla, 15 junio 1985, *R. Cedillo Trigós 3252* (MEXU). Municipio San Andrés Tuxtla, localidad Chininiapan, 22 julio 1985, *R. Cedillo Trigós 3290* (MEXU). Municipio Catemaco, localidad camino a Bastonal, NW de Tebanca, 3 agosto 1985, *R. Cedillo Trigós 3304* (MEXU). Along dirt road 5.5 km E of Tebanca, 5,5 km E of east side of Lago Catemaco, 800 m, 5 julio 1980, *M. Nee & B. F. Hansen 18847* (MEXU). Municipio San Andrés Tuxtla, estación de biología tropical Los Tuxtlas, lote 73, 700 m, 18°34'N-95°04'O, 10 septiembre 1986, *S. Sinaca Colín 922* (MEXU, MO, XAL). Municipio San Andrés Tuxtla, estación de biología tropical Los Tuxtlas, lote 73 Pedregal, 18°34'N-95°04'O, 23 septiembre 1986, *S. Sinaca Colín et al. 974* (MEXU). Municipio Jesús Carranza, 2,8 km al S de la terracería La Laguna-Sarabia, por la brecha maderera al río Alegre, 110 m, 17°13'N-94°41'O, 9 julio 1985, *T. Wendt et al. 4894* (F, MEXU, XAL).

***Souroubea* Aubl.**, Hist. Pl. Guiane 1: 244, t. 97. 1775. **Especie tipo:** *Souroubea guianensis* Aubl.

Arbustos lianescentes, epífitos o hemiepífitos, tallos teretes a ligeramente angulosos, cortezas lisas o estriadas. Hojas espiraladas, conspicuamente pecioladas, pecíolos canaliculados; láminas coriáceas o subcoriáceas, asimétricas o simétricas, obovadas, oblongas, oblanceoladas a elípticas-oblongas, ápice obtuso o redondeado o rematando en una punta o un mucrón (el mucrón frecuentemente caduco), base cuneada o atenuada, venación conspicua, reticulada; glándulas laminales abaxiales variables en número y tamaño, generalmente dispuestas en una fila submarginal a cada lado de la lámina. Inflorescencias terminales, racemosas, multifloras, densas, erectas, raquis glabro o diminutamente pubérulo, rugoso, estriado o sulcado, frecuentemente lenticelado; pedicelos rugosos, glabros o diminutamente pubérulos; nectarios reproductivos extraflorales ubicados en la base del cáliz o muy próximo a su base, cilíndricos a tubulares, huecos, curvos o rectos, con dos aurículas o sin ellas; bractéolas 2, sepaloides, ovadas, suborbiculares a orbiculares. Flores 3-5-meras, fragantes; sépalos suborbiculares, coriáceos; pétalos connatos proximalmente, soldados hasta los 3,5 mm de su longitud y constituyendo un tubo, lóbulos reflexos, ápice obtuso a redondeado; estambres 3-5, filamentos anchos (muy angostos en su extremo distal), proximalmente connatos o libres entre sí, libres con respecto a la corola o adnatos proximalmente a ésta, anteras ovoides, subglobosas o globosas; ovario 3-5-locular, ovoide a ovoide-cilíndrico; estigma subsésil, 3-5-radiado. Frutos en bayas, globosas, ligeramente apiculadas, indehiscentes o con rupturas irregulares por presión mecánica interna (dehiscencia anomálica); semillas reniformes, negras o rojizas, brillantes, conspicuamente reticuladas.

**Distribución y composición.** Este género se distribuye desde México hasta Bolivia y Brasil (*Giraldo-Cañas*, 2018) y en él se conocen 21 especies (*Giraldo-Cañas et al.*, 2024), de las cuales dos han sido registradas en México (*Giraldo-Cañas*, 2018).

**Comentarios.** *Souroubea* presenta una notable variación en cuanto a la morfología de sus nectarios reproductivos extraflorales, dado que muchas de sus especies los presentan con dos aurículas, aunque estas pueden estar ausentes o mínimamente desarrolladas en unas pocas especies. Quizás las flores de las diferentes especies de *Souroubea* sean las

más fragantes entre los miembros de las Marcgraviaceae. Al igual que *Ruyschia*, este género puede presentar un número reducido de estambres y pétalos, constituyendo los dos géneros de la familia con las máximas reducciones en el androceo y la corola. Como se indicó anteriormente, **Dressler** (2004a) considera este género, junto con *Ruyschia*, como los más basales de la familia, dada la naturaleza de la morfología de su inflorescencia y sus síndromes de polinización por insectos en *Ruyschia* o por insectos y aves en *Souroubea* (véanse más atrás los comentarios dados para *Ruyschia*).

#### Clave para reconocer las especies de *Souroubea* presentes en México

1. Flores 5-meras; estigma 5-radiado; 5 estambres por flor..... *S. exauriculata*

1'. Flores 3-4-meras; estigma 3-4-radiado; 3 (-4) estambres por flor..... *S. loczyi*

***Souroubea exauriculata* Delpino**, Atti Soc. Ital. Sci. Nat. 12: 180, 200. 1869. **Tipo:** México. Veracruz. Etat de Mirador, julio 1838, *J. Linden 875* (holotipo: FI!; isotipos: G!, LE!) (**Figura 6**).

*Ruyschia mexicana* Baill., Adansonia 10: 241-242. 1872. **Tipo:** México. Veracruz. Tlapacoyan, años 1865-1866, *H. Hahn 421* (holotipo: P!; isotipos: F!, P!).

*Souroubea puberula* Standl. & Steyerl., Publ. Field Mus. Nat. Hist., Bot. Ser. 23 (4): 175. 1944. **Tipo:** Guatemala. Suchitepéquez. Upper forested slopes of barranco by Loma Grande, above finca El Naranjo, volcán de Santa Clara, ca. 2000 m, 2 junio 1942, *J. A. Steyermark 46862* (holotipo: F!; isotipo: US!).

*Souroubea carcerea* Standl. & L. O. Williams, Ceiba 1 (2): 87-88. 1950. **Tipo:**



**Figura 6. *Souroubea exauriculata* Delpino.** A. Ramas floríferas y fructíferas (nótese que las hojas son espiraladas y la inflorescencia es erecta). B. Detalle de una porción de una inflorescencia (nótese que los nectarios reproductivos extraflorales están ubicados por debajo del cáliz). C. Detalle de unos pocos frutos (nótese que el estigma es persistente).

Honduras. Francisco Morazán. Área de pinos-roble, faldas del Cerro Uyuca, mountains above San Juancito, 1500–2000 m, 16 junio 1948, *A. Molina R. 987* (holotipo: EAP; isotipos: F!, US!).

*Souroubea jinotegensis* Standl. & L. O. Williams, *Ceiba* 1 (2): 88. 1950. **Tipo:** Nicaragua. Jinotega. Vecindad de la finca San Roque, sierra al este de Jinotega, en bosque húmedo, 1300–1500 m, 5 julio 1947, *P. C. Standley 10848* (holotipo: F!; isotipo: EAP!).

Arbustos lianescentes, epífitos o hemiepífitos, tallos teretes, cortezas lisas. Hojas espiraladas; pecíolos canaliculados, de 0,5–0,9 × 0,2–0,3 cm; láminas subcoriáceas, asimétricas, obovadas a oblongas, de 5,5–14,0 × 3,1–6,7 cm, ápice obtuso o redondeado y base cuneada o atenuada, venación conspicua, reticulada; glándulas laminales abaxiales variables en número y tamaño, generalmente dispuestas en una fila submarginal. Inflorescencias terminales, racemosas, multifloras, erectas, raquis de 9,0–21 × 0,4–0,5 cm, glabro o diminutamente pubérulo, rugoso, verde opaco; pedicelos rojizos o amarillos, rugosos, glabros o diminutamente pubérulos, de 0,58–1,42 × 0,10–0,15 cm; nectarios reproductivos ubicados en la base del cáliz o hasta ca. de 2 mm de esta, tubulares-curvos o en forma de cuerno, rugosos, rojizos, anaranjados, amarillos, o amarillos con matices rojizos, urna de 0,7–1,3 cm de largo, pedículo apenas perceptible, aurículas de 2–4 mm de largo; bractéolas ovadas a suborbiculares, anaranjadas, de 1,6–2,0 × 2,1–3,0 mm. Flores 5-meras; sépalos suborbiculares, anaranjados o amarillos, de 2–3 × 3–4 mm; pétalos connatos proximalmente, soldados hasta los 3,5 mm de su longitud y constituyendo un tubo, lóbulos de 3,1–5,0 × 2,2–3,5 mm, anaranjados en las dos caras o anaranjados adaxialmente y rojizos abaxialmente, ápice obtuso a redondeado; estambres 5, filamentos rojizos, de 3–5 × 2–3 mm, anchos (muy angostos en su extremo distal), proximalmente connatos, anteras cobrizas o castañas, ovoides a subglobosas, de 1,0–2,0 × 1,5–2,0 mm; ovario verde o anaranjado, ovoide-cilíndrico, de 2,1–2,9 × 1,5–2,0 mm; estigma subsésil, 5-radiado. Frutos en bayas globosas, rojizas, de 6,8–7,2 mm de diámetro, mesocarpo carnoso, anaranjado; semillas rojizas exteriormente, blancas en transcorte, dispuestas en una placenta roja.

**Iconografía.** *Palmas-Pérez et al.* (2013, p. 172), *Lozada-Pérez* (2020, p. 19)

**Nombre popular.** Flor de San Juan (Veracruz)

**Distribución geográfica y ecológica.** Esta especie se ha encontrado en Guatemala, Honduras, México y Nicaragua (quizás también se encuentre en Belice), entre los 500 y los 2600 m de altitud, principalmente en bosques húmedos a pluviales, tanto primarios como secundarios.

**Comentarios.** *Souroubea exauriculata* se reconoce por sus nectarios reproductivos tubulares-curvos o en forma de cuerno y auriculados, así como por sus flores péntameras, por sus cinco estambres por flor y por su estigma 5-radiado.

#### Material adicional examinado

**México. CHIAPAS:** La Trinitaria, 10 km ENE of Dos Lagos, above Santa Elena, 1170 m, 16°06'02"N–91°33'38"W, 18 noviembre 1980, *D. E. Breedlove & F. Almeda 47570* (MO). Monte Ovando, 9–12 abril 1937, *E. Matuda 1853* (MICH, NY). Boquerón, near Motozintla, 2540 m, 15°14'N–92°17'O, 3 mayo 1945, *E. Matuda 5354* (CR, MO). Escuintla, Cacatata, 12 junio 1947, *E. Matuda 16439* (BR). Acacoyagua, Libertad, upper course of Río Cacaluta, 500 m, 15°24'00"N–92°42'00"W, 25 junio 1948, *E. Matuda 17964* (MEXU, MO). **OAXACA:** San Pedro Pochutla, cerro Espino, 1100 m, 12 abril 1917, *C. Conzatti 3068* (MEXU, US). Cafetal San Rafael, 800 m, 9 abril 1926, *E. Makrinus 644* (US). **PUEBLA:** Hueytamalco, campo experimental “Las Margaritas” (INIFAP), 550 m, 20°00'08"N–97°18'59"W, 18 junio 2008, *B. Gómez Chagala 730* (MEXU, MO). Hueytamalco, campo experimental “Las Margaritas” (INIFAP), 550 m, 20°00'20"N–97°19'13"W, 15 septiembre 2008, *B. Gómez Chagala & M. E. Sinaca Colín 837* (MEXU, MO). **VERACRUZ:** Actopán, El Descabezadero, camino de Jilotepec a Actopán, 2 julio 1977, *J. J. Fay et al. 779* (COL, BR, CR, MEXU, US, XAL). Rancho Camarón, 19°14'N–96°41'O, año 1921, *C. A. Purpus 8631* (MO, NY, US).

***Souroubea loczyi* (V. A. Richt.) de Roon**, Acta Bot. Neerl. 15: 587. 1967. *Norantea loczyi* V. A. Richt., Mat. Természettud. Értés. 34: 816–818, t. 6, f. 29. 1916. **Tipo:** Guatemala. Alta Verapaz. Cubilgüitz, 350 m, julio 1904, *H. von Türckheim* 8746 ó 1030 (holotipo: BP; isotipos: BR!, E!, F!, PRC!, W) (**Figura 7**).

*Souroubea triandra* Lundell, Phytologia 1 (7): 244–245. 1937. **Tipo:** Belice. Cayo. Cohune Ridge, in advanced forest on limestone hill, junio-agosto 1936, *C. L. Lundell* 6492 [holotipo: MICH!; isotipos: ARIZ!, C!, CAS!, F!, GH!, LL!, MEXU!, MO!, NY!, S! (dos pliegos), TEX!, U, US!, WIS!].

*Souroubea micrantha* Standl. & Steyerl., Publ. Field Mus. Nat. Hist., Bot. Ser. 23 (2): 62–63. 1944. **Tipo:** Guatemala. Izábal. Near Puerto Barrios, in *Manicaria* swamp, at sea level, abril-mayo 1939, *P. C. Standley* 72793 (holotipo: F!).

Arbustos lianescentes, epífitos o hemiepífitos, profusamente ramificados, tallos teretes a ligeramente angulosos, cortezas lisas o estriadas. Hojas espiraladas; pecíolos delgados y canaliculados, de 0,38–0,95 × ca. 0,15 cm; láminas coriáceas, obovadas, oblongas, oblanceoladas a elípticas-oblongas, generalmente brillantes, de 4–12,8 × 2,2–



**Figura 7.** *Souroubea loczyi* (V. A. Richt.) de Roon. A. Ramas floríferas (nótese que las inflorescencias son erectas). B. y C. Inflorescencias inmaduras. D. y E. Infrutescencias

6,3 cm, de ápice redondeado u obtuso y base ligeramente cuneada, venación conspicua, reticulada, márgenes ligeramente revolutas; glándulas laminales abaxiales variables en número, dispuestas en una fila submarginal, castaño claras. Inflorescencias terminales, racemosas, multifloras, erectas, raquis (6) 8–17 (18) × 0,2–0,3 cm, glabro, rugoso, verde opaco, estriado o sulcado, frecuentemente lenticelado; pedicelos (0,40) 0,56–1,00 × ca. 0,01 cm, glabros, rugosos, verdes o amarillentos; nectarios reproductivos ubicados por debajo del cáliz, cilíndricos-tubulares, verdes, amarillos, rojizos o anaranjados, urna de 0,5–1,0 × 0,14–0,2 cm, pedículo de 0,1–0,3 cm de largo, aurículas de 1,3–2,4 mm de largo; bractéolas ovadas a orbiculares, amarillentas o rojizas, de 1,0–1,4 × 1,2–1,4 mm. Flores 3–4-meras; sépalos suborbiculares, amarillentos o rojizos, de 1,4–1,5 × 1,7–1,9 mm; pétalos connatos proximalmente, soldados hasta los 3 mm de su longitud y constituyendo un tubo, lóbulos reflexos, ovados, de 1,7–2,0 mm de largo, amarillos o rojizos, de ápice obtuso a redondeado; estambres 3 (–4), filamentos de 2–3 × 1,4–1,5 mm, anchos (muy angostos en su extremo distal), basalmente connatos o libres entre ellos, adnatos proximalmente al tubo de la corola, anteras ovoides a globosas, de 1,1–1,5 mm de largo; ovario ovoide, de 1,6–2,0 × 1,0–1,5 mm; estigma subsésil, 3–4-radiado. Frutos en bayas globosas, de 4,8–6,1 mm de diámetro, verdes, anaranjadas a rojizas o verdes con matices rojizos, mesocarpo carnoso; semillas rojizas, brillantes, dispuestas en una pulpa roja.

**Iconografía.** Utley (1984, p. 13); Endañú-Huerta *et al.* (2012, p. 35); Palmas-Pérez *et al.* (2013, p. 172).

**Distribución geográfica y ecológica.** *Souroubea loczyi* se ha documentado en Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua y Panamá, donde prefiere los bosques húmedos a pluviales, tanto primarios como secundarios, entre el nivel del mar y los 2500 m de altitud, aunque en México se le encuentra en tierras bajas (0–200 m).

**Comentarios.** Esta especie se reconoce fácilmente por sus nectarios reproductivos cilíndricos-tubulares muy cortamente auriculados, por sus flores 3–4-meras, por sus tres o cuatro estambres por flor y por su estigma 3–4-radiado.

#### Material adicional examinado

**México. CHIAPAS:** Municipio Ocosingo, 5 km al N de Crucero Corozal, 170 m, 14 junio 1985, *E. Martínez 12470* (MEXU, NY). Ruina Palenque, 10 julio 1939, *E. Matuda 3679* (F, K, MEXU, MICH). La Trinitaria, km 18 al N de Col. Cuauhtemoc, carretera Monte Bello-Santa Elena, 15°48'00"N–91°57'36"O, 20 septiembre 1984, *A. Méndez Girón 7932* (MO). 3–4 miles E of highway to Palenque-La Libertad road and 0.5 miles S of gravel road, ca. 70 m, 22 julio 1989, *J. Utley & K. Utley 8440* (NY). **TABASCO:** Municipio Huimanguillo, en un arroyo en el km 13,2 de la desviación de la carretera de Huimanguillo Fco. Rueda, 12 junio 1981, *M. A. Magaña & S. Zamudio 263* (MEXU, XAL). Municipio Tacotalpa, rancho Javier Mina, 50 m, 14 julio 1983, *F. Ventura 20420* (MEXU, XAL). **VERACRUZ:** Catemaco, Playa Escondida, hills overlooking Caribbean N of Sontecomapán, 50–60 m, 24 mayo 1981, *A. H. Gentry & E. J. Lott 32285* (MEXU, MO). Entre Coatzacoalcos y el río Tonala, 31 mayo 1957, *F. Miranda 8509* (MEXU, US). A 2 km del campamento Hnos. Cedillo, hacia La Escuadra, Hidalgotitlán, 31 julio 1974, *P. E. Valdivia 1200* (MO). Sin estado, sin localidad, años 1787–1804, *M. Sessé & J. M. Mociño 4907* (MA).

#### Agradecimientos

Quiero manifestar mi profundo reconocimiento y agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá D.C., Colombia) por todas las facilidades brindadas para la preparación de este trabajo. A la Dra. Guadalupe Munguía Lino (Universidad de Guadalajara, México), por la invitación a participar de la iniciativa “eFloraMex”. A todos los curadores y al personal científico y técnico de los herbarios visitados por su grata colaboración durante la visita a sus instalaciones. A Juan Diego Antonio (COL), Alejandro Llanos (COL), Ann Bogaerts (BR), Barry Hammel (MO), Federico Oviedo-Brenes (OET-Ecos del Bosque), Rosa Ortiz (MO), Filip Verloove (BR), Cristian Pinzón (XAL), Remedios Aguilar (OAX), Marco Tschapka (University of Ulm, Alemania), Klaus Mehltrater (INCOL), Lucio

Lozada Pérez (UNAM) y Dalila Frago Tejas (Revista *Botanical Sciences* - Sociedad Botánica de México) por el obsequio de la valiosa bibliografía y las fotografías, varias de las cuales acompañan este trabajo. Al Comité Editorial de la revista y a los evaluadores anónimos, por sus acertados comentarios.

## Conflictos de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

## Referencias

- Cerón-Martínez, C. E.** (2015). *Bases para el estudio de la flora ecuatoriana*. Editorial Universitaria, Universidad Central del Ecuador.
- Christenhusz, M. J. M., Fay, M. F., Chase, M. W.** (2017). *Plants of the world. An illustrated encyclopedia of vascular plants*. Kew Publishing, Royal Botanic Gardens.
- Cronquist, A.** (1981). *An integrated system of classification of flowering plants*. Columbia University Press.
- Delpino, F.** (1869). Rivista monografica della famiglia delle Marcgraviaceae precipuamente sotto l'aspetto della biologia ossia delle relazione di vita esteriore. *Nuovo Giornale Botanico Italiano*, 1, 257-290. [https://openlibrary.org/authors/OL158871A/Federico\\_Delpino](https://openlibrary.org/authors/OL158871A/Federico_Delpino)
- de Roon, A. C.** (1970). Marcgraviaceae. Flora of Panama. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 57, 29-50.
- Dressler, S.** (2000). A new species of *Marcgravia* (Marcgraviaceae) from Amazonia with some notes on the *Galeatae* group including a key. *Willdenowia*, 30, 369-374. <https://doi.org/10.3372/wi.30.30214>
- Dressler, S.** (2001). Marcgraviaceae. *Flora of the Venezuelan Guayana*, 6, 248-260.
- Dressler, S.** (2004a). Marcgraviaceae. En: N. Smith, S. A. Mori, A. Henderson, D. W. Stevenson & S. V. Heald (eds.), *Flowering plants of the Neotropics*: 236-238. Princeton University Press.
- Dressler, S.** (2004b). Marcgraviaceae. En: K. Kubitzki (ed.), *The families and genera of vascular plants. Celastrales, Oxalidales, Rosales, Cornales, Ericales* 6, 258-265. Springer.
- Endañú-Huerta, E., López-Contreras, J. E., Duno de Stefano, R., Carnevali Fernández-Concha, G.** (2012). *Souroubea loczyi* (Marcgraviaceae) un registro nuevo para la porción mexicana de la península de Yucatán. *Polibotánica*, 33, 33-39. <https://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n33/n33a2.pdf>
- Font Quer, P.** (1964). *Botánica pintoresca*. Ed. Ramón Sopena, S. A.
- Font Quer, P.** (1993). *Diccionario de Botánica*. Ed. Labor, S. A.
- Gilg, E. & Werdermann, E.** (1925). Marcgraviaceae. En: A. Engler y K. Prantl (Eds.), *Die Natürlichen Pflanzenfamilien, ed. 2*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Giraldo-Cañas, D.** (2002). Una nueva especie de *Marcgravia*, grupo *Galeatae* (Marcgraviaceae) de la Cordillera Oriental y catálogo del género para Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 26, 367-371. [https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.26\(100\).2002.2683](https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.26(100).2002.2683)
- Giraldo-Cañas, D.** (2011a). *Estudios morfológicos y taxonómicos en el complejo Norantea (Marcgraviaceae): Revisión de Norantea, Pseudosarcopera y Schwartzia*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82358>
- Giraldo-Cañas, D.** (2011b). Las Marcgraviaceae de Colombia: Inventario, diversidad, endemismo y distribución. *Bioetnia*, 8, 28-39. <https://doi.org/10.51641/bioetnia.v8i1.11>
- Giraldo-Cañas, D.** (2018). Circunscripción morfológica, diversidad, patrones de distribución y catálogo de la familia neotropical Marcgraviaceae (Ericales). *Biota Colombiana*, 19, 49-69. <https://doi.org/10.21068/c2018.v19n01a04>
- Giraldo-Cañas, D.** (2023). Una nueva especie de *Schwartzia* (Marcgraviaceae, Ericales) de Perú. *Cinchonia*, 18, 184-194. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/CINCHONIA/article/view/4538/5637>
- Giraldo-Cañas, D. & Picca, P.** (1999). Tres nuevos registros de *Marcgravia* (Marcgraviaceae) para la flora mexicana. *Hickenia*, 62, 289-292. <https://www.hickenia.darwin.edu.ar/index.php/hickenia/article/view/215>
- Giraldo-Cañas, D., Trujillo-Trujillo, E., Parra-O, C.** (2024). Una nueva especie de *Souroubea* (Marcgraviaceae, Ericales) de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 48, 298-306. <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.2243>

- Goldberg, A.** (1986). Classification, evolution, and phylogeny of the families of Dicotyledons. *Smithsonian Contributions to Botany*, 58, 1-314. file:///C:/Users/All%20in%20One%2022-B207LA/Downloads/scb-0058.pdf
- Gonçalves, E. G. & Lorenzi, H.** (2007). *Morfología vegetal*. Instituto Plantarum de Estudos da Flora.
- González, M. F. & Betancur, J.** (2013). *Un recorrido por la flora del sendero Hyca-Quye. Serie Guías de Campo*, 12, 1-485. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Hammel, B. E.** (2007). Marcgraviaceae, pp. 374-391. En: B. E. Hammel, M. H. Grayum, C. Herrera & N. Zamora (eds.), Manual de plantas de Costa Rica Vol. VI. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden*, 111, 1-933.
- Heald, S. V., de Roon, A. C., Dressler, S.** (2002). Marcgraviaceae. En: S. A. Mori, G. Cremers, C. A. Gracie, J.-J. de Granville, S. V. Heald, M. Hoff & J. D. Mitchell (eds.), Guide to the Vascular Plants of Central French Guiana, Part 2. *Dicotyledons. Memoirs of the New York Botanical Garden*, 76, 431-437. <https://www.biodiversitylibrary.org/part/26223>
- Heywood, V. H.** (1985). *Las plantas con flores*. Editorial Reverté.
- Lozada-Pérez, L.** (2020). Marcgraviaceae. *Flora de Guerrero*, 87, 15-19.
- Mabberley, D. J.** (2017). *Mabberley's plant book. A portable dictionary of plants, their classification and uses*. 4<sup>th</sup> edition. Cambridge University Press.
- McDade, L. A.** (1995). Species concepts and problems in practice: insight from botanical monographs. *Systematic Botany*, 20, 606-622. <https://doi.org/10.2307/2419813>
- Metcalfe, C. R. & Chalk, L.** (1950). *Anatomy of the dicotyledons*, volume I. Clarendon Press.
- Moreno, N. P.** (1984). *Glosario botánico ilustrado*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Biológicos.
- Palmas-Pérez, S., Krömer, T., Dressler, S., Arévalo-Ramírez, J. A.** (2013). Diversidad y distribución de Marcgraviaceae en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84, 170-183. <https://doi.org/10.7550/rmb.29666>
- Punt, W.** (1971). Pollen morphology of the genera *Norantea*, *Souroubea*, and *Ruyschia* (Marcgraviaceae). *Pollen et Spores*, 13, 199-232. <https://repository.naturalis.nl/pub/534856/MBMHU1971365001001.pdf>
- Reveal, J. L. & Chase, M. W.** (2011). APG III: Bibliographical information and synonymy of Magnoliidae. *Phytotaxa*, 19, 71-134. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.19.1.4>
- Rudall, P.** (2007). *Anatomy of flowering plants. An introduction to structure and development*. 3<sup>d</sup> edition, Cambridge University Press.
- Schmid, R.** (1988). Reproductive versus extra-reproductive nectaries: Historical perspective and terminological recommendations. *The Botanical Review*, 54, 179-232. <https://doi.org/10.1007/BF02858528>
- Schönenberger, J., Anderberg, A. A., Sytsma, K. J.** (2005). Molecular phylogenetics and patterns of floral evolution in the Ericales. *International Journal of Plant Sciences*, 166, 265-288. <https://doi.org/10.1086/427198>
- Simon, R., Holderied, M. W., Koch, C. U., von Helversen, O.** (2011). Floral acoustic: Conspicuous echoes of a dish-shaped leaf attract bat pollinators. *Science*, 333, 631-633. <https://doi.org/10.1126/science.1204210>
- Sosef, M. S. M., Degreef, J. Engledow & Meerts, P.** (2021). *Clasificación botánica y nomenclatura, una introducción*. Meise Botanic Garden. [https://shopbotanicgarden.be/Clasificacion-botanica-y-nomenclatura-una-introduccion-PDF-p-314-c-21\\_18.html](https://shopbotanicgarden.be/Clasificacion-botanica-y-nomenclatura-una-introduccion-PDF-p-314-c-21_18.html)
- Spjut, R. W.** (1994). A systematic treatment of fruit types. *Memoirs of the New York Botanical Garden*, 70, 1-182. <https://www.biodiversitylibrary.org/part/370558>
- Stevens, P.** (2025). Angiosperm Phylogeny Website. <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>
- Thiers, B.** (2025). *Index Herbariorum: a global directory of public herbaria and associated staff*. <https://sweetgum.nybg.org/ih/>
- Thompson, J. N.** (2003). *El proceso coevolutivo*. Fondo de Cultura Económica.
- Triana, J. J. & Planchon, J.** (1862). Prodomus florum novo-granatensis: Ternstroemiaceae trib. Marcgraviaceae. *Annales des Sciences Naturelles; Botanique, sér. 2*, 4, 17, 359-379. <https://ia800504.us.archive.org/2/items/prodromusfloraen00tria/prodromusfloraen00tria.pdf>
- Utlley, J. F.** (1976). A synopsis of the Mexican Marcgraviaceae. *Brenesia*, 9, 51-59.
- Utlley, J. F.** (1984). Marcgraviaceae. *Flora de Veracruz*, 38, 1-15.
- Utlley, J. F.** (2001). Marcgraviaceae. *Flora de Nicaragua*, 85, 1335-1338.
- van Roosmalen, M. G. M.** (1985). *Fruits of the Guianan flora*. Institute of Systematic Botany, Utrecht University.

- Villaseñor, J. L.** (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 559-902. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>
- Villaseñor, J. L. & Meave, J. A.** (2022). Floristics in Mexico today: Insights into a better understanding of biodiversity in a megadiverse country. *Botanical Sciences*, 100 (Special Issue), S14-S33. <https://doi.org/10.17129/botsci.3050>
- von Balthazar, M. & Schönenberger, J.** (2013). Comparative floral structure and systematics in the balsaminoid clade including Balsaminaceae, Marcgraviaceae and Tetrameristaceae (Ericales). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 173, 325-386. <https://doi.org/10.1111/boj.12097>
- Ward, N. M. & Price, R. A.** (2002). Phylogenetic relationships of Marcgraviaceae: Insights from three chloroplast genes. *Systematic Botany*, 27, 149-160. <https://www.jstor.org/stable/3093902>
- Weber, H.** (1956). Über die Blütenstände und die Hochblätter von *Norantea* Aubl. (Marcgraviaceae). *Beitrage zur Biologie der Pflanzen*, 32, 313-329.
- Weberling, F.** (1992). *Morphology of flowers and inflorescences*. Cambridge University Press.
- Wiens, J. J. & Servedio, M. R.** (2000). Species delimitation in systematics: inferring diagnostic differences between species. *Proceedings of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 267, 1444, 631-636. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1049>
- Zotz, G., Almeda, F., Bautista-Bello, A. P., Eskov, A., Giraldo-Cañas, D., Hammel, B., Harrison, R., Köster, N., Krömer, T., Lowry II, P. P., Moran, R. C., Plunkett, G. M., Weichgrebe, L.** (2021). Hemiepiphytes revisited. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 51, 125620. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2021.125620>

Original article

## Marine diatoms from the Colombian Pacific: A list of species with some taxonomic annotations

### Diatomeas marinas del Pacífico colombiano: Una lista de especies con algunas anotaciones taxonómicas

✉ Humberto Luis Quintana-Manotas<sup>1,\*</sup>, ✉ Jesús Javier Hoyos-Acuña<sup>2</sup>,  
✉ Juan José Gallego-Zerrato<sup>3</sup>, ✉ José Antolín Aké-Castillo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Grupo de investigación en Oceanografía Operacional, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, Cartagena, Colombia

<sup>2</sup>Colección Hidrobiológica Colombiana, Grupo de Investigación en Hidrobiología Colombiana, MerGlen S.A.S., Magangué, Bolívar, Colombia

<sup>3</sup>Grupo de Investigación Ciencia Oceanográfica, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad del Valle, Cali, Colombia

<sup>4</sup>Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Universidad de Veracruz, Veracruz, México

#### Abstract

This study compiles a list of diatom species recorded in the Colombian Pacific, based on a bibliographic review aimed at providing an updated reference for future research on Colombian diatoms. We analyzed 34 works comprising mainly undergraduate, Master's, and PhD papers, as well as scientific articles. We documented 340 taxa comprising 334 species, five varieties, and one form. Bacillariophyceae showed the highest species richness (151 species, 44.5%), followed by Mediophyceae (110 species, 32.3%), and Coscinodiscophyceae (79 species, 23.2%). Most records of these microorganisms concentrate in the oceanic zone of the Colombian Pacific and Tumaco Bay. Further sampling efforts are needed along the Colombian Pacific coast to improve biodiversity assessments.

**Keywords:** Review; Phytoplankton; Bacillariophyceae; Niskin; Biodiversity.

#### Resumen

Este estudio compila un listado actualizado de especies de diatomeas en el Pacífico colombiano a partir de una revisión bibliográfica exhaustiva, con el objetivo de servir como referencia para futuras investigaciones. Se analizaron 34 trabajos, principalmente tesis de pregrado, maestría y doctorado, complementados con publicaciones científicas. Se registraron 340 taxones, distribuidos en 334 especies, cinco variedades y una forma. La clase Bacillariophyceae presentó la mayor riqueza específica (151 especies, 44,5 %), seguida de Mediophyceae (110 especies, 32,3 %) y Coscinodiscophyceae (79 especies, 23,2 %). Hasta ahora los estudios se han concentrado en la zona oceánica y la bahía de Tumaco, lo que amerita ampliar los esfuerzos de muestreo en áreas costeras para una mejor comprensión de la biodiversidad diatomológica en la región.

**Palabras clave:** Revisión; Fitoplancton; Bacillariophyceae; Niskin; Biodiversidad.

#### Introduction

Diatoms are a group of autotrophic eukaryotic microorganisms characterized by a silica-based cell wall divided into an upper part (epitheca) and a lower one (hypotheca), with a series of intermediate bands called the cingulum (**Round et al.**, 1990). Their classification relies primarily on the shape, ornamentation, and arrangement of the frustule (**Round et al.**, 1990; **Hasle & Fryxell**, 1995). They are globally distributed across all aquatic environments, particularly in marine phytoplankton, with 16,158 species recorded worldwide (**Al-Yamani & Saburova**, 2019). Diatoms play a crucial ecological role in

**Citation:** Quintana-Manotas HL, et al. Marine diatoms from the Colombian Pacific: A list of species with some taxonomic annotations. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):797-804, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3258>

**Editor:** Juan Manuel Díaz Merlano

**\*Corresponding autor:**  
Humberto Luis Quintana-Manotas;  
[humberto19quintana@gmail.com](mailto:humberto19quintana@gmail.com)

**Received:** August 28, 2025

**Accepted:** October 5, 2025

**Published on line:** November 14, 2025



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

marine systems, contributing 40–45% of oceanic primary productivity—equivalent to 20% of global carbon fixation and oxygen production (Falkowski *et al.*, 1998; Malviya *et al.*, 2016). Additionally, they facilitate the export of carbon dioxide and silica to the ocean floor (Benoiston *et al.*, 2017).

Diatom research in Colombia began with the works of Arosemena *et al.* (1973), Caycedo (1977), and Vidal and Carbonell (1977), which focused on phytoplankton characterization in the Colombian Caribbean. Subsequent studies expanded to species inventories (Lozano-Duque *et al.*, 2010) and new records for the country (Arbeláez & Vidal, 2014; Medina-Tombé *et al.*, 2019). In contrast, research on diatoms in the Colombian Pacific Basin (CPB) started with species records from neritic phytoplankton in Tumaco Bay (Calderón, 1979). The 1980s saw the initiation of the Regional Study of El Niño (ENSO: El Niño-Southern Oscillation), which generated much of the available data (Corchuelo & Moreno, 1983; Constán & Delgado, 1985; Castillo & Vizcaíno, 1993; Medina, 1998; Uribe-Palomino, 2003; Ramírez *et al.*, 2006). Over the past two decades, research efforts in the CPB have intensified (Peña & Pinilla, 2002; Lozano-Triana, 2009; Giraldo-López & Ramírez, 2010; Osorio-Cardoso, 2019). The most recent phytoplankton inventory for the Colombian Pacific reported 262 diatom species in Tumaco Bay (Hoyos-Acuña *et al.*, 2021).

Species inventories are valuable tools for monitoring biodiversity changes and developing conservation strategies at local, regional, and national levels. They help identify critical trends, such as species extinctions and the spread of invasive organisms (Gilman *et al.*, 2009), and serve as essential databases for ecological, taxonomic, and biogeographical studies. In this sense, our study aimed to compile existing literature to generate a detailed list of marine diatom species in the Colombian Pacific and to assess the historical progress and current state of research in this field.

## Materials and methods

We conducted a bibliographic review of studies identifying phytoplankton and diatom species in the coastal and oceanic waters of the Colombian Pacific. The review included theses and publications from documentation centers such as the Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), the Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP), and the libraries of Valle, Jorge Tadeo Lozano, Javeriana, and Mississippi Universities. We also searched through databases, scientific journals, and online resources using the following keywords: algae, diatoms, plankton, phytoplankton, Colombian Pacific, Panama Basin, and Eastern Tropical Pacific.

We included only those studies reporting identifications to the species level, though some genera were also noted due to their limited records or taxonomic significance. The taxonomic classification follows Guiry and Guiry (2025) for higher-level categories (classes), while orders, families, and genera were arranged alphabetically, with corrections based on Guiry and Guiry (2025). Scientific names and authorship were also updated according to these authors. For species with revised nomenclature, the current valid name is presented first, followed by the original recorded synonym (indicated by the symbol “=”).

To assess spatial research coverage, a map was created to highlight areas with concentrated sampling efforts as well as understudied or unexplored zones. This spatial analysis was performed using ArcGIS® (version 18.2).

## Results

We recorded 340 marine diatom taxa comprising 334 species, five varieties, and one form distributed across three classes, 41 orders, 71 families, and 131 genera (Table S1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3258/5329>). Bacillariophyceae was the most species-rich class with 151 taxa (44.5%), followed by Mediophyceae (110 taxa, 32.3%) and Coscinodiscophyceae (79 taxa, 23.2%). Three orders accounted for 40.6% of

the total diversity: Chaetocerales (54 species), Naviculales (50 species), and Bacillariales (29 species). At the family level, Chaetocerotaceae showed the highest species richness (51 species), followed by Bacillariaceae (29 species) and Rhizosoleniaceae (23 species). We excluded *Actinoptychus mediterraneum* reported by **Rojas and Ortiz** (2007) due to its absence in both the World Register of Marine Species (WoRMS) and AlgaeBase databases. *Proboscia alata* var. *curvirostris*, mentioned by **Uribe** (2003), was omitted for the same reason.

Our review identified 34 publications on Colombian Pacific diatoms spanning from 1979 to 2021. Half of these were thesis works (including one PhD, one MSc, and 17 undergraduate theses), while the remainder consisted of scientific articles (14 in national and three in international journals, **Table 1**) Universidad del Valle contributed most significantly, with seven undergraduate theses, followed by Universidad Jorge Tadeo Lozano, with one master's thesis and five undergraduate theses.

Research efforts have been unevenly distributed geographically. The oceanic zone of the Colombian Pacific, sampled during the “Estudio Regional del Fenómeno El Niño” (ERFEN) program, accounted for 20 studies. Other biologically significant areas included Tumaco Bay (eight studies), Ensenada de Utría (two studies), Gorgona Island (one study), Cabo Marzo and Punta Cruces (one study), Bahía Málaga (one study), and a combined study of Solano Bay, Buenaventura, and Tumaco.

Regarding methodologies, phytoplankton sampling primarily employed water collection using Nansen or Niskin bottles at standard depths (1, 10, 30, 50, and 100 m; 48.5% of studies) and surface trawls with 50-64  $\mu\text{m}$  mesh phytoplankton nets (42.4% of studies). For diatom identification, aliquot dilution with microscopic observation dominated (81.8% of studies), while the Utermöhl method was used in the remaining 18.2%.

## Discussion

The total number of diatom species recorded in this study exceeds that reported in comparable regional studies. While **Lozano-Duque et al.** (2010) documented 337 taxa in the Colombian Caribbean, this lower figure likely reflects the fewer studies conducted in that region (17 versus 34 in the Colombian Pacific; **Table 1**). However, our results show lower species richness than other tropical eastern Pacific regions, including the southern Gulf of Mexico (413 taxa; **Licea et al.**, 2016) and southeastern Mexican Pacific (498 species; **Torres-Ariño et al.**, 2019). These disparities may stem from methodological limitations in the Colombian Pacific studies, which primarily employed Niskin or Van Dorn bottles (5-10 L samples) that capture limited water volumes, and 50-64  $\mu\text{m}$  mesh nets that fail to retain smaller microorganisms. Additionally, the scarcity of high-resolution techniques, particularly the use of high-refractive-index mounting media (e.g., Naphrax) and scanning electron microscopy (SEM), has hindered the identification of small or taxonomically challenging genera such as *Minidiscus*, *Thalassiosira*, *Cyclotella*, and *Pseudo-nitzschia*.

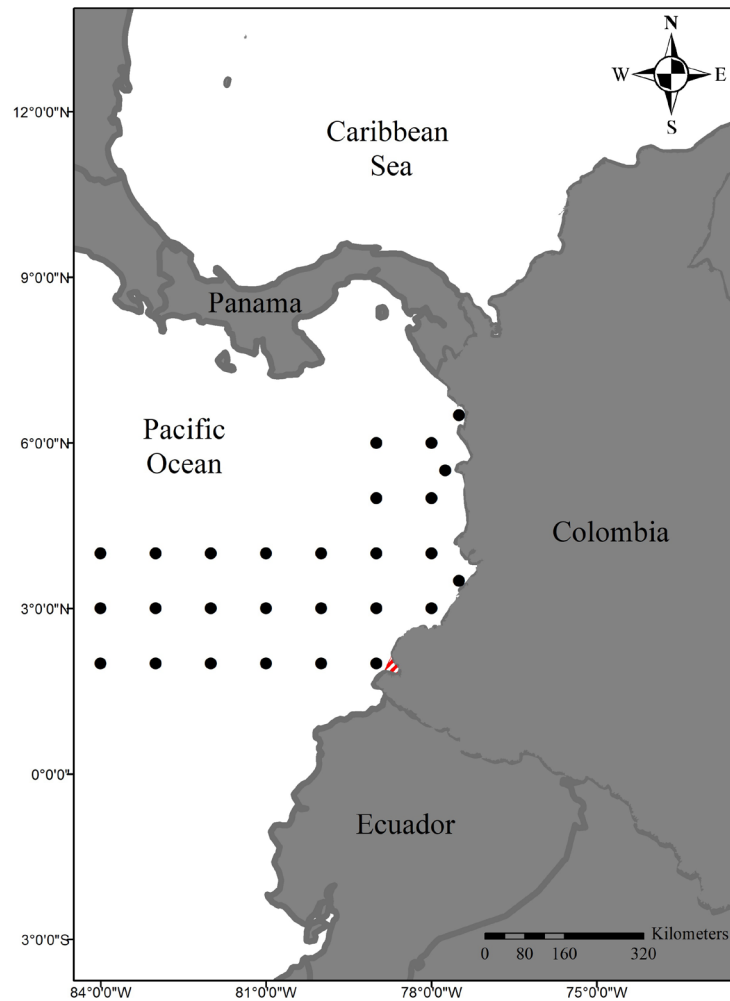
Research efforts in the Colombian Pacific have predominantly focused on oceanic zones through the ERFEN program conducted by the CCCP since 1983, while coastal and transitional areas remain understudied. The exception is Tumaco Bay, which has received relatively more attention (**Calderon**, 1979; **Hoyos-Acuña et al.**, 2021; **Figure 1**) due to the CCCP's local presence, which facilitates sampling. This geographic bias has created significant knowledge gaps along most of Colombia's Pacific coastline.

Most of the studies surveyed (primarily unpublished theses) suffer from methodological limitations that constrain their scientific value. Many of these works lack drawings, photographs, and descriptions to support identification. Many identifications rely on fresh mounts without frustule cleaning, obscuring diagnostic features. These limitations reflect both historical technical constraints (particularly pre-2000 printing costs for illustrated diatom catalogs) and a chronic shortage of taxonomic specialists in the region.

**Table 1.** Records of published and unpublished bibliographic references (PhD, MSc, and undergraduate theses) on diatoms in the Colombian Pacific

Author	Year	Type of document
Calderón	1979	Undergraduate thesis
Corchuelo & Moreno	1983	Undergraduate thesis
Castillo-González	1984	Scientific article
Calderon	1986	Undergraduate thesis
Oviedo-Parra	1989	Undergraduate thesis
Castillo & Vizcaino	1992	Scientific article
Collazos	1992	Undergraduate thesis
Castillo & Vizcaino	1993	Scientific article
Vizcaíno-Bravo	1993	Undergraduate thesis
Mendoza	1996	Undergraduate thesis
Sánchez	1996	Undergraduate thesis
Garcés y Medina	1997	Undergraduate thesis
Medina	1997	Scientific article
Medina	1998	Scientific article
Quiñonez	2000	Undergraduate thesis
García-Hansen & Malikov	2002	Scientific article
Peña y Pinilla	2002	Scientific article
Torres-Salazar	2003	Undergraduate thesis
Uribe	2003	Undergraduate thesis
Ramírez <i>et al.</i>	2006	Scientific note
Ramírez-Roa	2006	Undergraduate thesis
Ramírez & Giraldo	2006	Scientific article
Rojas & Ortiz	2007	Scientific article
Arteaga-Sogamoso <i>et al</i>	2008	Scientific article
Galeano	2008	PhD thesis
Lozano	2009	Undergraduate thesis
García-Hansen	2009	Doctoral theses
Galeano-Chavarría & Arteaga-Sogamoso	2010	Scientific article
Giraldo & Ramírez	2010	Scientific article
Giraldo A <i>et al.</i>	2014	Scientific article
Guzmán <i>et al.</i>	2014	Scientific article
Arteaga-Sogamoso & Perdomo-Trujillo	2016	Scientific article
Osorio	2019	Master's thesis
Hoyos-Acuña <i>et al.</i>	2021	Scientific article

The genus *Pseudo-nitzschia* deserves special attention due to its ecological significance in harmful algal blooms (HABs) and domoic acid production (Bates *et al.*, 2018). While five morphotypes (representing the *delicatissima* and *seriata* complexes) have been tentatively identified in Colombian waters, these records require confirmation using modern techniques (electron microscopy or molecular methods). The presence of confirmed toxigenic species in the broader South American Pacific (*P. australis*, *P. pseudodelicatissima*, etc.) (Álvarez *et al.*, 2009; Tenorio *et al.*, 2021) suggests Colombia's current records likely represent actual occurrences, though only *P. lineola* has been definitively documented.



**Figure 1.** Most studied sites regarding diatoms in the Colombian Pacific. Black dots indicate stations visited during ERFEN cruises; the red striped area shows Tumaco Bay.

To advance diatom research in the Colombian Pacific, we strongly recommend: 1) expanding sampling to understudied coastal areas; 2) implementing integrative taxonomy for species validation; 3) including comprehensive morphological descriptions (with measurements, habitat data, and cleaned-frustule micrographs); 4) incorporating benthic diatom studies (epiphytic and epipsammic taxa), and 5) depositing voucher specimens in biological collections, particularly for new records.

### Supplementary material

See the supplementary material in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3258/5329>

### Acknowledgments

We thank Juan Manuel Díaz for reviewing and correcting the writing style.

### Authors' contributions

**HLQM, JJHA, and JGS** gathered the information; **HLQM** prepared the tables; **JGZ** made the map; **JAAC** revised the nomenclature and the manuscript. All authors contributed to the writing of the paper.

## Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest of any kind that could affect the publication or the results of this research process.

## References

- Álvarez, G., Uribe, E., Quijano-Scheggia, S., López-Rivera, A., Mariño, C., Blanco, J. (2009). Domoic acid production by *Pseudo-nitzschia australis* and *Pseudo-nitzschia calliantha* isolated from North Chile. *Harmful Algae*, 8, 938-945.
- Al-Yamani, F. Y. & Saburova, M. A. (2019). *Marine phytoplankton of Kuwait's waters. Volume II Diatoms*. Kuwait Institute for Scientific Research, Kuwait. 337 pp.
- Arbeláez, N. & Vidal, L. A. (2014). Primer registro de *Plagiodiscus nervatus* Grunow (Bacillariophyceae) en la región costera del Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 43(2), 415-419.
- Arosemena, D., Cárdenas, H., Garzón, F., Ibáñez, F., Moreno, C., Sierra, J. (1973). *Algunos dinoflagelados y diatomeas de la bahía de Cartagena y sus alrededores*. Informe Museo Marino 8, 11 p.
- Arteaga-Sogamoso, E., Rodríguez-Rubio, E., Galeano, A. M. (2008). Distribución, abundancia y composición del fitoplancton y condiciones ambientales en la cuenca Pacífica colombiana, durante enero-febrero de 2007. *Boletín Científico CCCP*, 15, 105-122.
- Arteaga-Sogamoso, E. & Perdomo-Trujillo, L. V. (2016). NOTA: Distribución, Frecuencia y Abundancia del Fitoplancton y Potencialmente Toxígeno en la Cuenca Pacífica Colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 45(1), 135-148.
- Bates, S. S., Hubbard, K. A., Lundholm, N., Montresor, M., Leaw, C. P. (2018). *Pseudo-nitzschia*, *Nitzschia*, and domoic acid: New research since 2011. *Harmful Algae*, 79, 3-43.
- Bejarano, A. C., VanDola, F. M., Gulland, F. M., Rowles, T. K., Schwacke, L. H. (2008). Production and toxicity of the marine biotoxin domoic acid and its effects on wildlife: a review. *Human and Ecological Risk Assessment*, 14(3), 544-567.
- Benoiston, A. S., Ibarbalz, F. M., Bittner, L., Guidi, L., Jahn, O., Dutkiewicz, S., Bowler, C. (2017). The evolution of diatoms and their biogeochemical functions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1728), 20160397.
- Calderón, S. E. (1986). *Las diatomeas en el plancton de los esteros de la rada de Tumaco (Pacífico colombiano), con observaciones ecológicas y biogeográficas*. Tesis de pregrado. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Calderón, S. E. (1979). *Contribución al conocimiento del fitoplancton nerítico de Tumaco y alrededores*. Tesis de pregrado. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Castillo, F. A. & Vizcaino, Z. V. (1993). Observación del fitoplancton del Pacífico colombiano durante 1991-1992 en condiciones El Niño. *Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, 22(1), 179-190.
- Castillo, F. A. & Vizcaino, Z. (1992). Los indicadores biológicos del fitoplancton y su relación con el fenómeno de El Niño 1991-92 en el Pacífico colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 12, 13-22.
- Castillo-González, F. A. (1984). Fitoplancton del Pacífico Colombiano como indicador de masas de agua (ERFEN IV). *Biología pesquera*, 13, 67-70.
- Caycedo, I. E. (1977). Fitoplancton de la bahía de Nenguange (Parque Nacional Tayrona), mar Caribe, Colombia. *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín*, 9, 17-44.
- Collazos, A. (1992). *Contribución al estudio del fitoplancton en la ensenada de Tumaco (Pacífico colombiano)*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle.
- Corchuelo, M. C. & Moreno, G. C. (1983). *Contribución al conocimiento del fitoplancton y algunos tintinidos del Pacífico colombiano*. Tesis de pregrado. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Falkowski, P. G., Barber, R. T., Smetacek, V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281(5374), 200-206.
- Galeano, A. M. (2008). *Caracterización espacial de la abundancia, composición y diversidad del fitoplancton de la zona oriental del Pacífico colombiano durante el evento el Niño 2006-2007*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle.
- Galeano-Chavarría, M. A. & Arteaga-Sogamoso, E. (2010). Distribución y abundancia de diatomeas del género *Pseudo-nitzschia* en condición de El Niño 2007 sobre la cuenca pacífica colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 39(1), 25-39.




- García-Hansen, I. & Málíkov, I.** (2002). Comportamiento de las diatomeas y dinoflagelados en la bahía de Tumaco bajo la influencia de cambios climáticos durante el periodo de 1995-2000. *Boletín Científico CCCP*, 9, 19-28.
- Garcés, M. C. & Medina, L.** (1997). *Evaluación de las especies fitoplanctónicas reportadas como indicadores biológicos para el fenómeno El Niño en el Pacífico colombiano cruceros ERFEN 1978-1994*. Tesis de pregrado. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- García-Hansen, I.** (2009). *The effects of climate variability on the structure of the phytoplankton community in Tumaco bay, Colombia*. 252 pp. Tesis de doctorado. University of Southern Mississippi.
- Gilman, E., King, N., Peterson, T., Chavan, V., Hahn, A.** (2009). *Building the biodiversity data commons: the global biodiversity information facility (GBIF)*.
- Giraldo, A. & Ramírez, D. G.** (2010). Fitoplancton costero en Cabo Marzo y Punta Cruces, margen nororiental del Océano Pacífico colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 28, 173-203.
- Giraldo, A., Valencia, B., Acevedo, J. D., Rivera, M.** (2014). Fitoplancton y zooplancton en el área marina protegida de Isla Gorgona, Colombia, y su relación con variables oceanográficas en estaciones lluviosa y seca. *Revista de Biología Tropical*, 62, 117-132.
- Guiry, M.D. & Guiry, G.M.** (2025). AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway.
- Gúzman, A. I., Zambrano-Ortiz Mónica, M., Casanova-Rosero, R. F., Selvaraj, J. J., Martínez, A.** (2014). La condición ecológica de la bahía de Tumaco (Pacífico colombiano): evaluación de la calidad del agua y del fitoplancton. *Boletín Científico CIOH*, 32, 3-16.
- Hasle, G. R. & Fryxell, G. A.** (1995). Taxonomy of diatoms. 339-364. In: Hallegraeff, G. M., Anderson, D. M., Cembella, A. D. (Eds.) *Manual of harmful marine microalgae*. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO.
- Hoyos-Acuña J. J., Quintana-Manotas H. L., Bermúdez-Rivas C., Molina-Triana A. F., Castrillón F. A., Parada J. L.** (2021). Listado de especies de fitoplancton de la bahía de Tumaco, Pacífico colombiano. *Intropica*, 16(2) 214-231.
- Licea, S., Moreno-Ruiz, J. L., Luna, R.** (2016). Checklist of diatoms (Bacillariophyceae) from the Southern Gulf of Mexico: Data-base (1979-2010) and new records. *Journal of Biodiversity & Endangered Species*, 4(3), 1-7.
- Lozano-Duque, Y., Vidal, L. A., Navas, G. R.** (2010). Listado de diatomeas (Bacillariophyta) registradas para el Mar Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 39(1), 83-116.
- Lozano-Triana, M.** (2009). *Distribución, abundancia y composición de la comunidad fitoplanctónica en las bahías de Buenaventura y Málaga*. Universidad del Tolima.
- Lundholm, N., Moestrup, Ø., Kotaki, Y., Scholin, C., Miller, P.** (2006). Inter- and intraspecific variation of the *Pseudo-nitzschia delicatissima* complex (Bacillariophyceae) illustrated by rRNA probes, morphological data and phylogenetic analyses. *Journal of Phycology*, 42, 464-481.
- Malviya, S., Scalco, E., Audic, S., Vincent, F., Veluchamy, A., Poulain, J., Wincker, P., Ludicone, D., De Vargas, C., Bittner, L., Zingone, A., Bowler, C.** (2016). Insights into global diatom distribution and diversity in the world's ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(11), E1516-E1525.
- Medina, L.** (1997). Composición y comportamiento del fitoplancton en el área del Pacífico colombiano, años 1995-1997. *Boletín Científico CCCP*, 6, 95-108.
- Medina, L.** (1998). Cambios en la composición y abundancia de la comunidad microalgal del Pacífico colombiano, en relación con el evento El Niño 97-98. *Boletín Científico CCCP*, 7, 58-66.
- Medina-Tombé, M. F., Vouilloud, A. A., Sala, S. E.** (2019). *Terpsinoë musica* Ehrenberg (Bacillariophyceae), primer registro del género para Colombia. *Actualidades Biológicas*, 41(110), 1-9.
- Mendoza, A. E.** (1996). *Fitoplancton del área comprendida entre la caleta Caracas y la Muerte, Bahía de Málaga, Pacífico colombiano*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle.
- Osorio, J. S.** (2019). *Comunidad fitoplanctónica de tres áreas portuarias del Pacífico colombiano y su relación con algunas variables ambientales, inclusive el tráfico marino*. Tesis de maestría. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Oviedo-Parra O, L.** (1989). *Distribución y abundancia de las diatomeas del Pacífico colombiano durante los cruceros Pacífico XI-XII ERFEN VIII-IX*. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana.
- Peña, V. & Pinilla, G.A.** (2002) Composition, Distribution and Abundance of the Utría Inlet Phytoplankton Community, Colombian Pacific. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 37(1), 67-81.

- Quiñones, B. M.** (2000). *Identificación, composición, distribución y abundancia del fitoplancton presente en los principales bancos de pesca en el Pacífico colombiano durante noviembre de 1998*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle.
- Ramírez, D. G. & Giraldo López, A.** (2006). Estructura comunitaria del fitoplancton de la cuenca Pacífica colombiana durante la campaña oceanográfica Pacífico XXXIX-ERFEN XXXVII. *Boletín Científico CCCP*, 13, 5-84.
- Ramírez, D. G., Giraldo, A., Tovar, J.** (2006). Producción primaria, biomasa y composición taxonómica del fitoplancton costero y oceánico en el Pacífico colombiano (septiembre-octubre 2004). *Investigaciones marinas*, 34(2), 211-216.
- Ramírez-Roa, D. G.** (2006). *Aspectos ecológicos de la comunidad fitoplanctónicas del océano Pacífico colombiano durante septiembre-octubre de 2024: producción primaria, biomasa y composición taxonómica*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle.
- Rivera, P.** (1985). Las especies del género *Nitzschia* Hassall, sección *Pseudonitzschia* (Bacillariophyceae), en las aguas marinas chilenas. *Gayana Botanica*, 42(3-4), 9-38.
- Rojas, P. J. & Ortíz, J.** (2007). Comportamiento del fitoplancton durante el evento ENOS en el océano Pacífico colombiano. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 6, 5-15.
- Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G.** (1990) *The diatoms: biology and morphology of the genera*. Cambridge University Press.
- Sánchez, E. E.** (1996). *Caracterización espacial del fitoplancton nerítico en el Pacífico colombiano, durante julio-agosto de 1994*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle.
- Tenorio, C., Uribe, E., Gil-Kodaka, P., Blanco, J., Álvarez, G.** (2016). Morphological and toxicological studies of *Pseudo-nitzschia* species from the central coast of Peru. *Diatom Research*, 31(4): 331-338.
- Tenorio, C., Álvarez, G., Quijano-Scheggia, S., Perez-Alania, M., Arakaki, N., Araya, M., Álvarez, F., Blanco, J., Uribe, E.** (2021). First Report of Domoic Acid Production from *Pseudo-nitzschia multistriata* in Paracas Bay (Peru). *Toxins*, 13(6), 408.
- Torres-Ariño, A., Okolodkov, Y. B., Herrera-Herrera, N. V., Hernández-Barrera, B. L., González-Resendiz, L., León-Tejera, H., Gárate-Lizárraga, I.** (2019). Un listado del fitoplancton y microfítobentos del sureste del Pacífico mexicano. *Cymbella: Revista de Investigación y Difusión Sobre Algas*, 5(1), 1-97.
- Torres-Salazar, V. A.** (2003). *Comparación de la distribución temporal de comunidades fitoplanctónicas de diatomeas y dinoflagelados en la bahía de Tumaco (Pacífico colombiano) entre un año afectado por el fenómeno de El Niño y uno normal*. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana.
- Uribe, H. J.** (2003). *Relación entre las condiciones ambientales y la comunidad fitoplanctónica (Diatomeas y Dinoflagelados) de la cuenca del Pacífico colombiano (1996-2001)*. Tesis de pregrado. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Vizcaíno-Bravo, Z.** (1993). *Fitoplancton del Pacífico colombiano como indicador biológico del fenómeno El Niño*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle.
- Vidal, L. A. & Carbonell, M. C.** (1977). *Diatomeas y dinoflagelados en la bahía de Cartagena*. Tesis de Biología Marina. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Yool, A. & Tyrrell, T.** (2003). Role of diatoms in regulating the ocean's silicon cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), 1103.

Original article

## Estimating density and occupancy of *Penelope perspicax* (Cauca Guan) and *Alouatta seniculus* (Colombian Red Howler Monkey) in the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary, Colombia

### Estimación de densidad y ocupación de *Penelope perspicax* (Pava caucana) y *Alouatta seniculus* (Mono aullador rojo colombiano) en el Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya, Colombia

 Néstor Roncancio-Duque<sup>1,\*</sup>,  María Girleza Ramírez-González<sup>2</sup>,  
 Jose Manuela Vallejo-López<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Parques Nacionales Naturales de Colombia, Cali, Colombia,

<sup>2</sup>Parques Nacionales Naturales de Colombia, Pereira, Risaralda,

<sup>3</sup>Universidad de Caldas, Manizales, Caldas

#### Abstract

Estimating population density and habitat use of wildlife is useful to assess population trends and to identify critical areas for survival and reproduction. This knowledge is fundamental for informed management decisions. Protected areas are one of the primary mechanisms of biodiversity conservation and often select target species as surrogate indicators of broader ecological processes and management challenges. In the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary - OQFFS, *Penelope perspicax* (Cracidae) and *Alouatta seniculus* (Primates) has been selected as target species. From March 2015 to December 2016, we estimated population density with conditional occupancy, in terms of site covariates, and dispersion to explain the variation in encounter rates. The density of *P. perspicax* in OQFFS was estimated at 44.57 individuals/km<sup>2</sup> (95% CI = 33.95 – 58.5), while that of *A. seniculus* was 15 individuals/km<sup>2</sup> (95% CI = 9.39 – 23.38). Both species used most of the sanctuary (97% and 79%, respectively), although dispersion patterns suggest preferences for specific sectors. Neither forest covers nor distance to management zones significantly affected occupancy. Our results provide one of the most robust population estimates available for *P. perspicax*, categorized as Vulnerable in Colombia, and contribute to the understanding of spatial use by *A. seniculus*. However, larger sample sizes are needed for *A. seniculus* to increase statistical power, and higher-resolution habitat quality assessments are required to detect differential habitat use. Despite data limitations, these findings highlight the importance of the sanctuary for the long-term persistence of both species and illustrate their relevance as focal species for conservation beyond protected area boundaries.

**Keyword:** Cracidae; Dispersion; Distance sampling; Occupancy models; Primates; Protected area.

#### Resumen

Contar con estimaciones de densidad poblacional y uso de hábitat de la fauna silvestre es fundamental para evaluar tendencias poblacionales e identificar áreas críticas para la supervivencia y reproducción. Este conocimiento constituye la base para tomar decisiones de manejo informadas. Las áreas protegidas son uno de los principales mecanismos de conservación de la biodiversidad y con frecuencia seleccionan especies focales como indicadores sustitutos de procesos ecológicos más amplios y de retos de manejo. En el Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya (SFFOQ), *Penelope perspicax* y *Alouatta seniculus* han sido seleccionadas como especies focales. Entre marzo de 2015 y diciembre de 2016, estimamos la densidad poblacional, la ocupación, en función de covariables de

**Citation:** Roncancio-Duque N, *et al.* Estimating density and occupancy of *Penelope perspicax* (Cauca Guan) and *Alouatta seniculus* (Colombian Red Howler Monkey) in the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):805-817, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3216>

**Editor:** Martha Patricia Ramírez Pinilla

**\*Corresponding autor:**

Néstor Roncancio-Duque;  
[nroncanciod@gmail.com](mailto:nroncanciod@gmail.com)

**Received:** April 29, 2025

**Accepted:** October 9, 2025

**Published on line:** October 27, 2025



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

sitio, y la dispersión para explicar la variación en las tasas de encuentro. La densidad de *P. perspicax* en el SFFOQ fue de 44.57 individuos/km<sup>2</sup> (IC 95% = 33.95–58.5), mientras que la de *A. seniculus* fue de 15 individuos/km<sup>2</sup> (IC 95% = 9.39–23.38). Ambas especies utilizaron la mayor parte del santuario (97% y 79%, respectivamente), aunque los patrones de dispersión indicaron preferencias por sectores específicos. Ninguna de las covariables de cobertura boscosa ni la distancia a zonas de manejo tuvo un efecto significativo sobre la ocupación. Nuestros resultados proveen una de las estimaciones poblacionales más sólidas disponibles para *P. perspicax*, especie categorizada como Vulnerable en Colombia, y contribuyen a entender el uso espacial de *A. seniculus*. Sin embargo, para *A. seniculus* se requieren tamaños de muestra mayores que incrementen el poder estadístico, así como evaluaciones de calidad de hábitat a mayor resolución para detectar diferencias en el uso del espacio. A pesar de las limitaciones de los datos, estos hallazgos destacan la importancia del santuario para la persistencia a largo plazo de ambas especies y evidencian su relevancia como especies focales de conservación más allá de los límites del área protegida.

**Palabras clave:** Área protegida; Crácidos; Dispersión; Muestreo a distancia; Modelos de ocupación; Primates.

## Introduction

Estimating population parameters in wildlife is essential for monitoring population trends and guiding conservation management (Buckland *et al.*, 2015; Field *et al.*, 2007; Possingham *et al.*, 2000). Protected areas are key tools for biodiversity conservation, but it is necessary to evaluate whether target species are actually using these areas as expected. Estimating habitat use helps identify critical zones for survival and reproduction and adjust management practices accordingly (Giehl *et al.*, 2017). In addition, these estimates allow the assessment of human activities and provide cost-effective strategies to reduce conflicts between development and conservation (Lindenmayer *et al.*, 2011). Finally, population and habitat data improve understanding of ecological processes such as predator–prey dynamics, resource competition, and responses to environmental change (Armstrong & McGehee, 1976; Dhondt, 2012; Lundberg *et al.*, 2000).

The Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary (OQFFS) is a 489-ha protected area in the Central Andes of Colombia. It is structurally connected to other reserves in the region and has designated the Cauca Guan (*Penelope perspicax*) and the Red Howler Monkey (*Alouatta seniculus*) as conservation target species that represent the ecological integrity of the area. To evaluate the effectiveness of management, the monitoring plan recommends estimating the population density of both species every three years (Ramírez-González, 2015).

The Cauca Guan is endemic to Colombia and restricted to the Cauca River Valley. It is classified globally as Vulnerable and nationally as Endangered, mainly due to habitat reduction and hunting pressure (BirdLife International, 2021; Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible *et al.*, 2024). Four core populations have been identified, with densities ranging from 9 to 60 ind/km<sup>2</sup> (Kattan *et al.*, 2014; Ríos *et al.*, 2008; Valencia Velasco *et al.*, 2022). The largest population occurs in the OQFFS, recognized as the most important nucleus for the species (Ríos & Muñoz, 2014). However, connectivity with surrounding protected areas is likely limited by altitudinal range preferences, resulting in isolated populations and increased vulnerability (Ramírez-González, 2015).

The Red Howler Monkey is categorized as Least Concern, but its populations are declining due to habitat loss, fragmentation, hunting, and trafficking (Link *et al.*, 2021). In the Middle Magdalena region, the species faces a 45% probability of local extinction (Roncancio-Duque, 2021). In the Cauca River Valley, only a few forest remnants remain, and the landscape surrounding the OQFFS represents one of the largest continuous areas still occupied by the species (Gómez-Posada, Roncancio-Duque, *et al.*, 2009; Gómez-Posada & Londoño, 2012; Roncancio-Duque & Gómez-Posada, 2009).

In this article, we present the first formal survey of the monitoring program for these two species in the OQFFS. Specifically, we estimated population density and abundance,

assessed habitat use and spatial dispersion to identify patterns of area use, and compared our findings with previous surveys and provided design recommendations to improve the statistical power of future monitoring.

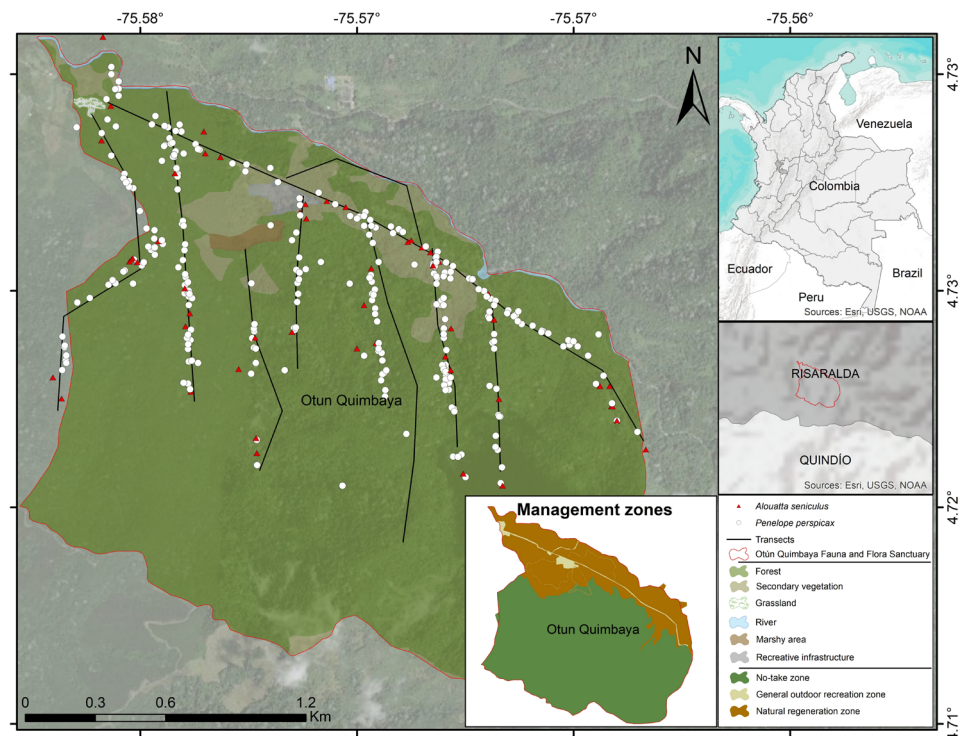
## Methods

### Study site

The OQFFS is located on the western slope of the Central Andes, within the jurisdiction of the La Florida district, Pereira municipality, Risaralda department (**Figure 1**). Its area is 489 ha, ranging from 1750 to 2276 m a.s.l, with an annual mean temperature of 16.8°C and an average precipitation of 2638.5 mm/year (**Fick & Hijmans, 2017**). The preserved sub-Andean forest is part of the conservation corridor of the Regional System of Protected Areas of the Eje Cafetero. The national, regional, and municipal conservation areas that integrate it include the Los Nevados National Natural Park (58,300 ha), Ucumari Regional Natural Park (3986 ha), Campo Alegre Soil Conservation District (20,420 ha), La Marcada (1874 ha), Alto del Nudo (2671 ha), and Barbas Bremen (9651.90 ha) (**RUNAP Registro Unico Nacional de Áreas Protegidas, 2023**). In addition to these areas, there are other forested zones within private properties belonging to the Municipal Water Company of Pereira, Sierra Morena, La Carmencita, and Fundación Amparo San Marcos.

### Data collection

The sampling was carried out from March 2015 to December 2016, usually twice per week, surveying one transect per day until all transects were completed before starting again. To estimate the density of *P. perspicax* and *A. seniculus*, the distance sampling method with line transects was used. This method involves recording animals detected



**Figure 1.** Study area, Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary. The records obtained during the surveys of the cracid and the primate are shown. The south zone of Otún Quimbaya without transects is unwalked hills.

by an observer walking along a transect line, measuring the perpendicular distance to the point where the animal was observed or to the geographic center of the observed group (**Buckland *et al.*, 2015**).

Transects were located systematically every 400 m from a randomly selected starting point within the OQFFS and placed randomly with respect to the position of the target species, aiming to cover as much area as possible. In total, 29 transects were established, with a total length of 11.47 km and a mean length of 383 m (range: 252–420; mode: 400 [15]; SD  $\pm$  40.14 m); some transects followed existing paths, provided they satisfied the assumption that at 0 m perpendicular distance, detection probability was 1 and observations were independent, meaning that was no probability of counting animals more than once on the same route (straightness of the transect).

Each transect was surveyed on average 33 times, accumulating a mean survey distance of 12.9 km per transect and a total sampling effort of 359.4 km. Transects were walked silently while scanning the vegetation, at an average speed of 370 m/h. Observers were previously trained in the method, data collection protocols and species identification. Surveys were conducted between 7:20 AM and 4:40 PM. Only visual records were included. Transects and times of day were proportionally distributed among observers to avoid potential biases from the same observer repeatedly sampling the same transect or always at the same time. To ensure constant detection probability along a transect, observers maintained the same walking speed. Once a group was detected, the observer remained with it for a maximum of 10 minutes (**Buckland *et al.*, 2010**), to prevent oversampling some transect segments and undersampling others. For each group detected, observers recorded the time, number of individuals, perpendicular distance to the transect (measured with a tape), coordinates, and altitude. Surveys were not conducted during rain to avoid bias from reduced detectability (**Buckland *et al.*, 2010**). To evaluate population trends in OQFFS, we also compiled previous estimates for the guan (**Kattan *et al.*, 2006**; **Nadachowski, 1994**; **Ríos *et al.*, 2008**) and the monkey (**Gómez-Posada *et al.*, 2007**).

### ***Data analysis***

Population density was estimated using the DISTANCE 7.5 (**Thomas *et al.*, 2010**). The goal of distance sampling analysis is to fit a detection function to the perpendicular distances of observations and use this function to estimate the proportion of objects missed during the survey. To find the best-fitting detection function. We compared the frequency distribution of the perpendicular distances against six models: 1. Half-normal with Cosine series expansion, 2. Half-normal with Hermite polynomial, 3. Uniform with Cosine, 4. Uniform with Simple polynomial, 5. Hazard-rate with Cosine, and 6. Hazard-rate with Simple polynomial (**Buckland *et al.*, 2015**). The model with the lowest Akaike Information Criterion (AIC) value was selected. To compare population density over different time periods, a confidence interval (CI) graph was used. When the CIs of two density estimates overlapped by more than 25%, it was considered that there was no evidence that the population densities at both times were significantly different, with a 95% confidence level (**Cumming *et al.*, 2007**) (Supplementary material, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/3216/4608>).

Detection–non-detection records were collected during each transect visit to estimate the proportion of area used (**MacKenzie *et al.*, 2002**). Here, we interpret occupancy ( $\psi$ ) not strictly as the proportion of sites occupied, but as the proportion of area used by the species, which is appropriate for mobile animals with large home ranges. Each confirmed record was coded as 1, and no detection as 0. We assumed that changes in site use were random (**MacKenzie & Royle, 2005**).

We analyzed the effect of local features on occupancy (site covariates) but not to the detectability (detectability covariates). As site covariates, we initially considered eight variables, based on available cartographic information: Elevation, Location in No-take management zone, Distance to river, Location in three vegetation types (High dense forest, High fragmented forest, and High secondary vegetation), Distance to pastures and Distance to general outdoor recreation zone (**IDEAM, 2021**; **Instituto Geográfico**

Agustín Codazzi (Igac), 2023; Ramírez-González, 2015). Covariates were measured from the central point of each transect using and Euclidean distance. All covariates were standardized and tested for collinearity using Spearman correlation (Cushman *et al.*, 2008). When two covariates were correlated (Spearman's  $\rho$ ,  $p < 0.05$ ), one was eliminated based on biological relevance and viability of measurement precision (Sokal & Rohlf, 1995). As a result, two out of the eight site covariates (Location in High dense forest and Distance to general outdoor recreation zone) were retained. Analyses were conducted with the PerformanceAnalytics package in the R (Peterson *et al.*, 2018).

We estimated occupancy ( $\psi$ ) with the RPresence package (MacKenzie & Hines, 2018). The model with the lowest AIC was chosen. First, we ran the null model (constant  $\psi$  and  $p$ ). Then, site-covariates were tested in a stepwise process: both covariates were included initially and then tested separately by removing one at a time and comparing AIC values. Multiplicative effects between covariates were also considered. After selecting the most parsimonious model, we refined estimates of  $\psi$  and  $p$  using a Bayesian approach with an uninformative uniform prior (0–1) (McCarthy, 2007; Royle & Dorazio, 2008). The occupancy posterior distribution ( $\psi$ ) and detection probability ( $p$ ) were modeled as Bernoulli variables. For estimation, we ran one Markov chain with 100,000 iterations, discarding the first 10,000 as burn-in. The analyses were conducted in the OpenBugs 3.2.2 (Spiegelhalter *et al.*, 2018).

The degree of dispersion (aggregated, random, or uniform) of both species was evaluated using the standardized Morisita dispersion index (Morisita, 1959, 1962). The Morisita index ranges from -1 to 1 with 95% confidence limits between -0.5 and 0.5. Values within the limits indicate random distribution, values  $>0.5$  indicate aggregation, and values  $<-0.5$  indicate uniformity. The analyses were conducted in R using Vegan package (Oksanen *et al.*, 2013).

## Results

For *P. perspicax*, we obtained 298 visual records. Perpendicular distance distribution fitted best to the Uniform model with cosine series expansion (Figure 2, Table 1). The effective detection width was 17.59 m (95% CI = 16.32–18.96). Detection probability

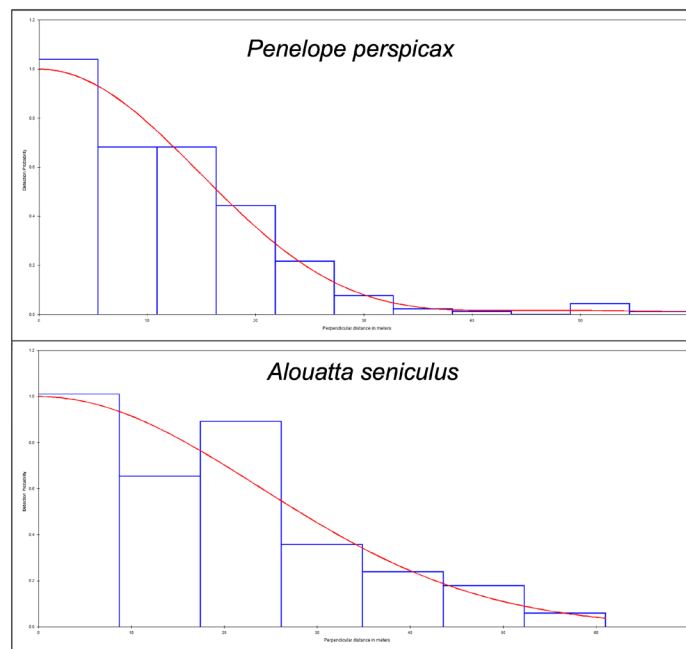


Figure 2. Detection probability functions and histogram of perpendicular distances

was 0.29 (95% CI = 0.27–0.32). The population density of *P. perspicax* in the OQFFS was 44.57 individuals/km<sup>2</sup> (95% CI = 33.95 – 58.5) and 23.59 groups/km<sup>2</sup> (95% CI = 18 – 31), with coefficients of variation of 13.5% and 13.0%, respectively. Based on this density, the estimated total abundance in the OQFFS was 218 individuals (95% CI = 166–286). The average flock size was 1.89 individuals (95% CI = 1.76 – 2.03). The variance decomposition showed that the encounter rate contributed the most to the total variance in density (85.2%), followed by detection probability (7.9%) and group size (6.9%) (Table 2). No differences in the population density of *P. perspicax* were detected compared to previous surveys in the OQFFS with 95% confidence (Figure 3).

For *A. seniculus*, we obtained 64 visual records, but the data were right truncated beyond 61 m, and the seven largest distances were excluded. The frequency distribution of the perpendicular distances showed a better fit to the Half-normal model without series expansion (Figure 2, Table 3). However, all models were statistically similar. The effective detection width was 29.52 m (95% CI = 24.24 – 35.96) with a detection probability of 0.48 (95% CI = 0.40 – 0.59). The population density of *A. seniculus* in the OQFFS was 15 individuals/km<sup>2</sup> (95% CI = 9.38 – 23.38) and 2.69 groups/km<sup>2</sup> (95% CI = 1.74 – 4.15), with coefficients of variation of 23.04% and 21.80% respectively. The average group size was 5.32 individuals (95% CI = 4.75 – 5.95). With this density, the estimated total abundance in the OQFFS is 72 individuals (95% CI = 46–114). The encounter rate was also the largest contributor to variance in density (71.2%), followed by detection probability (18.3%) and group size (10.5%) (Table 2). Results suggest a decrease in the population density of the primate compared to 2007 (Figure 3).

Occupancy analysis showed that what we interpret as the “proportion of area used” by *P. perspicax* had an occupancy probability of 0.97 (95% PI = 0.88–1.0) with a detection probability of 0.23 (95% PI = 0.21–0.26). *A. seniculus* had an occupancy probability of

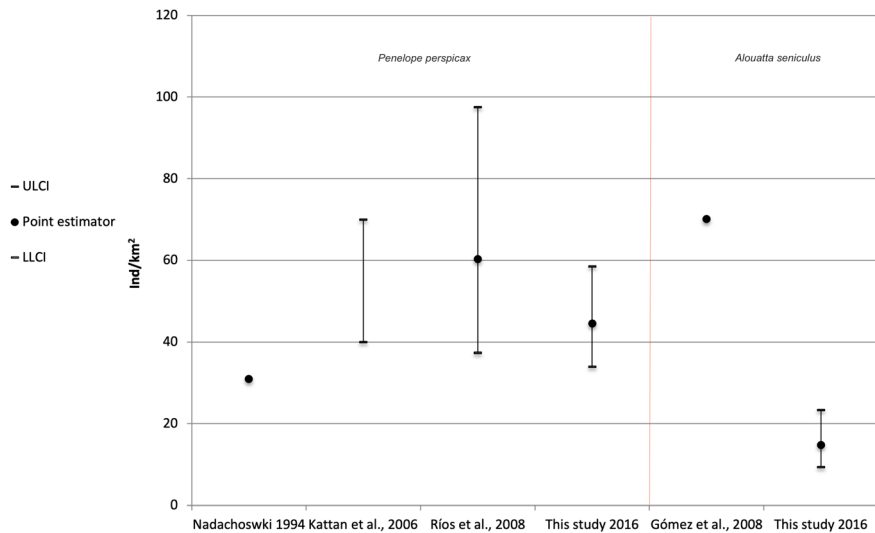
**Table 1.** Model selection results for density estimation of *Penelope perspicax* in the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary, based on Distance Sampling. Models are ordered by ΔAIC.

Model	ΔAIC	AIC	ESW	P	D	D LCL	D UCL	D CV	CS
Uc	0.00	2032.17	17.59	0.29	44.57	33.95	58.50	0.14	1.92
HRc	1.47	2033.64	18.35	0.31	42.65	32.06	56.74	0.14	1.92
HNc	1.67	2033.83	19.15	0.32	40.78	30.47	54.57	0.15	1.92
HRsp	6.82	2038.99	20.74	0.35	37.50	28.46	49.41	0.14	1.92
HNhp	15.77	2047.94	18.79	0.31	41.73	31.88	54.62	0.13	1.92
Usp	32.33	2064.49	23.21	0.39	33.66	25.54	44.35	0.14	1.92

ΔAIC: Difference in Akaike Information Criterion relative to the best model; AIC: Akaike Information Criterion, ESW (m): Effective strip width (meters), p: Detection probability, D (ind./km<sup>2</sup>): Estimated density (individuals per km<sup>2</sup>), LCL / UCL: Lower and upper 95% confidence limits, CV: Coefficient of variation, CS: Cluster size (average group size). Uc, HRc, HNc, HRsp, HNhp, Usp: Candidate key function models (Uniform with cosine adjustment, Hazard-rate with cosine adjustment, Half-normal with cosine adjustment, Hazard-rate with simple polynomial, Half-normal with hermite polynomial, Uniform with simple polynomial).

**Table 2.** Variance components in density estimation for *Penelope perspicax* and *Alouatta seniculus* in the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary

Density variance component/Species	<i>Penelope perspicax</i>	<i>Alouatta seniculus</i>
Encounter rate	85.2	71.2
Detection probability	7.9	18.3
Group size	6.9	10.5



**Figure 3.** Comparison of estimated population densities in the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary for *Penelope perspicax* and *Alouatta seniculus* (LLCI = Lower limit of confidence interval, UPCI = Upper limit of confidence interval)

**Table 3.** Model selection results for density estimation of *Alouatta seniculus* in the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary, based on Distance Sampling. Models are ordered by  $\Delta AIC$

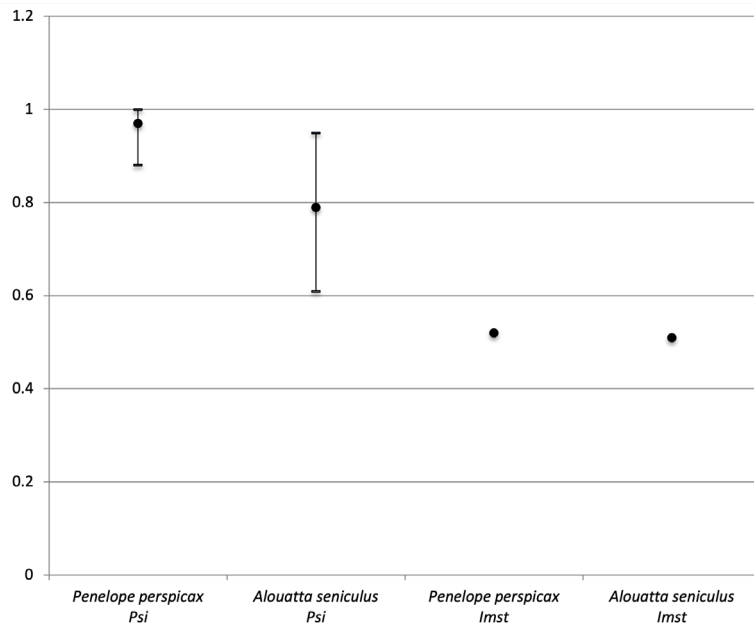
Model	$\Delta AIC$	AIC	ESW	P	D	D LCL	D UCL	D CV	CS
HNhp	0.00	440.50	29.52	0.48	14.81	9.39	23.38	0.23	5.32
HNc	0.00	440.50	29.52	0.48	14.81	9.39	23.38	0.23	5.32
Uc	0.21	440.71	32.11	0.53	13.46	8.79	20.62	0.21	5.32
HRsp	0.76	441.26	31.87	0.52	13.09	7.96	21.52	0.25	5.32
HRc	0.76	441.26	31.87	0.52	13.65	8.41	22.15	0.25	5.32
Usp	1.52	442.02	31.79	0.52	13.56	8.68	21.17	0.22	5.32

$\Delta AIC$ : Difference in Akaike Information Criterion relative to the best model; AIC: Akaike Information Criterion, ESW (m): Effective strip width (meters), p: Detection probability, D (ind./km<sup>2</sup>): Estimated density (individuals per km<sup>2</sup>), LCL / UCL: Lower and upper 95% confidence limits, CV: Coefficient of variation, CS: Cluster size (average group size). Uc, HRc, HNc, HRsp, HNhp, Usp: Candidate key function models (Uniform with cosine adjustment, Hazard-rate with cosine adjustment, Half-normal with cosine adjustment, Hazard-rate with simple polynomial, Half-normal with hermite polynomial, Uniform with simple polynomial).

0.79 (95% PI = 0.61-0.95) with a detection probability of 0.08 (95% PI = 0.06-0.10). The standardized Morisita dispersion index indicated that both species exhibit an aggregated spatial distribution (*P. perspicax*:  $Imst = 0.51$ ,  $p = 5.99e-38$ ; *A. seniculus*:  $Imst = 0.52$ ,  $p = 1.12e-26$ ) (Figure 4).

### Discussion

The population density of *P. perspicax* in the OQFFS was 44.57 individuals/km<sup>2</sup> (95% CI = 33.95 – 58.5), while that of *A. seniculus* was 15 individuals/km<sup>2</sup> (95% CI = 9.38 – 23.38). For both species, despite a sample of 29 transects, the encounter rate was the component that contributed most to the coefficient of variation (85% for the guan and 75% for the primate). This indicates that, beyond sampling error, both species might be exhibiting differential habitat use. Encounter rate variability is often associated with patchy distributions or preferences for particular resources, suggesting that both species do not use the area homogeneously.



**Figure 4.** Occupancy probability and Standardized Morisita dispersion index

Both *P. perspicax* and *A. seniculus* occupied nearly the entire OQFFS (97% and 79%, respectively), although dispersion analyses revealed preferences for specific sectors (**Figure 1**). This aggregated distribution implies that suitable microhabitats—such as fruiting trees, sleeping sites, or favorable forest cover—are concentrated in certain portions of the Sanctuary. Aggregation is expected in species with specific ecological requirements, as resources are rarely evenly distributed (**Getzin *et al.*, 2014; Morisita, 1962**). No site covariates were significantly related to occupancy, highlighting the need to incorporate finer-scale variables such as floristic composition, canopy structure, or fruit availability (**Riedler & Lang, 2018; Vaz *et al.*, 2015**).

For *P. perspicax*, the population appears stable in recent decades. The first study conducted at OQFFS in 1991 estimated a density of 31 ind/km<sup>2</sup> (**Nadachowski, 1994**). Another survey between 1999 and 2001 reported values similar to those found here (**Kattan *et al.*, 2006**). Although those studies used fixed-width transects, which may underestimate densities by not accounting for detectability (**Buckland *et al.*, 2015**). The higher density found here suggests an increase related to forest protection or stable food supply provided by ash plantations (**Kattan *et al.*, 2006**). Compared with the 2008 estimate (**Ríos *et al.*, 2008**), current results are not significantly different, although the 2008 value was imprecise due to limited transects. Nonetheless, Otún Quimbaya currently supports one of the highest densities reported for a Cracid, making the Sanctuary one of the most important strongholds for the species. Additional large populations may occur in Farallones National Natural Park and surrounding areas (**Fierro-Calderón *et al.*, 2018**).

In contrast, the sympatric Sickle-winged Guan (*Chamaepetes goudotii*) and Wattled Guan (*Aburria aburri*) remain rare, with only 24 and one records, respectively, in this survey. The density of *P. perspicax* reported here is higher than those previously documented for this species (**Fierro-Calderón *et al.*, 2018; Kattan *et al.*, 2014; Valencia Velasco *et al.*, 2022**), as well as for related species such as *P. jacuaco* (**Begazo & Bodmer, 1998**), *P. purpurascens* (**Roncancio, submitted**), and several other Cracids including *Crax allector* (**Thiollay, 1994**), *C. daubentoni* (**Bertsch & Barreto, 2008**), *Mitu tuberosa* and *Pipile cumanensis* (**Begazo & Bodmer, 1998**). It even exceeds reported densities of *Ortalis* species, which due to allometric expectations are generally denser (**Gaston *et al.*, 2000**), with the exception of *O. vetula* (**Peña-Alvarez, 2014**).

For *A. seniculus*, the estimated density of 15 ind/km<sup>2</sup> is below the ranges commonly reported. Populations vary widely from 4 to 377 ind/km<sup>2</sup>, but usually fluctuate between 25 and 55 ind/km<sup>2</sup>. Densities similar to those found here have been reported in continuous forests, while higher values occur in isolated montane fragments and *Guadua* stands (Crockett, 1998; Gómez-Posada *et al.*, 2007; Gómez-Posada, Roncancio-Duque, *et al.*, 2009; Gómez-Posada, Álvarez, *et al.*, 2009; Gómez-Posada & Londoño, 2012; Marsh *et al.*, 2016; Morales-Jiménez, 2002; Roncancio-Duque & Gómez-Posada, 2009). The result from OQFFS matches the 15 ind/km<sup>2</sup> found in the lower Apaporis (Defler, 2010). In the Magdalena Medio, densities range from 0.2 to 75 ind/km<sup>2</sup> depending on fragment shape and forest maturity (Roncancio Duque, 2021). Although past surveys suggested higher density (70 ind/km<sup>2</sup> in 2007), those estimates came from complete counts in small area and are not directly comparable. Thus, while a decline cannot be confirmed, a conservative management approach should be maintained.

The contrast between aggregated dispersion in OQFFS and random dispersion reported in Bosques de Yotoco (Roncancio-Duque, 2023) suggests differences in resource distribution, fragment size, or interspecific interactions. In Yotoco, *P. perspicax* coexists with *O. columbiana* and still dominates space use. In Otún, aggregation may result from group foraging, preferences for high canopy cover, or reduced human disturbance. For *A. seniculus*, aggregation likely reflects social structure and patchy resource use, as commonly observed in primates (Chapman & Chapman, 1999; Stevenson *et al.*, 2000).

The OQFFS management plan emphasizes the need to evaluate ecotourism impacts (Ramírez-González, 2015). For these two species, tourism currently appears harmless, although subtle effects cannot be ruled out. Moreover, neither species seems particularly sensitive to disturbance, limiting their utility as indicators. Other taxa with smaller ranges, greater sensitivity, or nesting requirements near trails may serve as better indicators of tourism pressure.

For *P. perspicax*, the coefficient of variation allows detection of changes as small as 4.4 ind/km<sup>2</sup> with 80% power and 5% significance. For *A. seniculus*, a reduction of 2.5–2.8 ind/km<sup>2</sup> could be detected. The relatively low CV for the guan reflects both adequate design (25–30 transects) and high encounter rates, resulting in strong statistical power. In contrast, the primate data meet minimum requirements but still risk Type II errors. Improved designs should increase sample size, extend sampling to adjacent strata while calculating detectability globally, and space transects closer together, especially considering the wider detection distance for the primate (35 m).

Another limitation is that sampling spanned over two years, reducing temporal resolution and potentially violating closure assumptions. Distance sampling and occupancy models assume constant density and site use during surveys. If individuals move in or out of the area, estimates can be biased (MacKenzie *et al.*, 2002; Royle & Nichols, 2003). Closure violations may overstate stability and underestimate temporal variability (Nichols & Williams, 2006). Approaches that incorporate dynamics, such as dynamic occupancy models, yield more robust inferences (Kéry & Royle, 2015). To minimize this risk, each monitoring cycle should be completed in less than four months, with sufficient personnel, equipment, and logistical resources.

Otún Quimbaya is currently one of the most important strongholds for *P. perspicax*, supporting one of the highest densities reported for a Cracid. For *A. seniculus*, density is relatively low but occupancy remains high, emphasizing the importance of maintaining habitat quality and ensuring long-term monitoring. Future monitoring should prioritize shorter sampling periods (<4 months) and expanded transect coverage to ensure robust estimates and timely detection of population changes.

## Supplementary material

See the supplementary material in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3216/4608>

## Acknowledgments

This research was done in the framework of the implementation of the monitoring plan of Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary, National Natural Parks of Colombia. We thank to Andrés Felipe Cardona-Toro, Daniela Buitrago, Diego Monsalve, Juan Manuel Hoyos, Juliana Guerrero, Álvaro Ríos, Lina Marcela Ángel, Lilina E. Cuastumal, Raúl Pacheco, Carolina Castaño, Sarai Gómez, Héctor Sánchez, Maria Camila Gonzales, Juan Miguel Arévalo by support the data collection.

## Declaration of interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Authors' contribution statement

JMVL: supported the collection and organization of the data; MGRG: supported the formulation, coordinated the collection and organization of the data and NRD: was responsible for the conceptualization, formulation, analysis of the data and writing and editing of the manuscript.

## References

- Armstrong, R. A., McGehee, R. (1976). Coexistence of species competing for shared resources. *Theoretical Population Biology*, 9(3), 317-328.
- Begazo, A. J., Bodmer, R. E. (1998). Use and conservation of Cracidae (Aves: Galliformes) in the Peruvian Amazon. *Oryx*, 32(4), 301-309.
- Bertsch, C., Barreto, G. R. (2008). Abundancia y área de acción del paují de copete (*Crax daubentoni*) en los llanos centrales de Venezuela. *Ornitología Neotropical*, 19, 287-293.
- BirdLife International. (2021). *Penelope perspicax*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021: E.T22678379A188319595. <https://www.iucnredlist.org/species/22678379/188319595>
- Buckland, S. T., Plumptre, A. J., Thomas, L., Rexstad, E. A. (2010). Design and analysis of line transect surveys for primates. *International Journal of Primatology*, 31(5), 833-847.
- Buckland, S. T., Rexstad, E. A., Marques, T. A., Oedekoven, C. S. (2015). Distance Sampling: Methods and Applications. In *Bird Study* (Vol. 63, Issue 1). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19219-2>
- Chapman, C. A., Chapman, L. J. (1999). Implications of small scale variation in ecological conditions for the diet and density of red colobus monkeys. *Primates*, 40(1), 215. <https://doi.org/10.1007/BF02557712>
- Crockett, C. M. (1998). Conservation biology of the genus *Alouatta*. *International Journal of Primatology*, 19(3), 549-578.
- Cumming, G., Fidler, F., Vaux, D. L. (2007). Error bars in experimental biology. *Journal of Cell Biology*, 177(1), 7-11. <https://doi.org/10.1083/jcb.200611141>
- Cushman, S. A., McGarigal, K., Neel, M. C. (2008). Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency. *Ecological Indicators*, 8(5), 691-703. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.12.002>
- Defler, T. R. (2010). *Historia natural de los primates colombianos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Dhondt, A. A. (2012). *Interspecific competition in birds* (Vol. 2). Oxford University Press.
- Fick, S. E., Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Field, S. A., O'Connor, P. J., Tyre, A. J., Possingham, H. P. (2007). Making monitoring meaningful. *Austral Ecology*, 32(5), 485-491. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2007.01715.x>
- Fierro-Calderón, E., Gutiérrez-Chacón, C., Caro, L., Ramírez, D., Parra, J., Zamudio, J., Saavedra-Rodríguez, C. (2018). Plan de manejo para la pava caucana (*Penelope perspicax* Bangs 1911). *Asociación Calidris y Wildlife Conservation Society*.
- Gaston, K. J., Blackburn, T. M., Greenwood, J. J., Gregory, R. D., Quinn, R. M., Lawton, J. H. (2000). Abundance–occupancy relationships. *Journal of Applied Ecology*, 37, 39-59.
- Getzin, S., Wiegand, T., Hubbell, S. P. (2014). Stochastically driven adult–recruit associations of tree species on Barro Colorado Island. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1790), 20140922. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0922>

- Giehl, E. L. H., Moretti, M., Walsh, J. C., Batalha, M. A., Cook, C. N.** (2017). Scientific evidence and potential barriers in the management of Brazilian protected areas. *PLoS ONE*, *12*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169917>
- Gómez-Posada, C., Álvarez, Z., Giraldo-Chavarriaga, P.** (2009). Densidad y estatus poblacional de monos aulladores rojos en un guadual, fragmento aislado, La Tebaida, Quindío, Colombia. *Universitas Scientiarum*, *14*(1), 8-15.
- Gómez-Posada, C., Londoño, J. M.** (2012). Alouatta seniculus: Density, Home Range and Group Structure in a Bamboo Forest Fragment in the Colombian Andes. *Folia Primatologica*, *83*(1), 56-65. <https://doi.org/10.1159/000339803>
- Gómez-Posada, C., Martínez, J., Giraldo, P., Kattan, G. H.** (2007). Density, habitat use, and ranging patterns of red howler monkeys in a Colombian Andean forest. *Neotropical Primates*, *14*(1), 2-10.
- Gómez-Posada, C., Roncancio-Duque, N., Hincapié, P., Betancourt, A.** (2009). Densidad y composición de grupos en tres poblaciones de mono aullador rojo (*Alouatta seniculus*) en Valle y Cauca, Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, *14*(1), 79-91.
- IDEAM.** (2021). *Mapa de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100 000 (Periodo 2018)* [Map]. IDEAM-Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac).** (2023). *Datos abiertos Igac*.
- Kattan, G. H., León, A., Corredor, G., Beltrán, W., Parada, M.** (2006). Distribution and population density of the Endangered Cauca Guan *Penelope perspicax*. *Bird Conservation International*, *16*(4), 299-307. <https://doi.org/10.1017/S0959270906000475>
- Kattan, G. H., Roncancio, N., Banguera, Y., Kessler-rios, M., Londoño, G. a, Humberto, O., Muñoz, M. C.** (2014). Spatial variation in population density of an endemic and endangered bird , the Cauca Guan ( *Penelope perspicax* ) Species with small geographic ranges are particularly vulnerable to threats such as habitat transformation . *Tropical Conservation Science*, *7*(1), 161-170.
- Kéry, M., Royle, J. A.** (2015). Applied Hierarchical Modeling in Ecology: Analysis of distribution, abundance and species richness in R and BUGS. In *Applied Hierarchical Modeling in Ecology: Analysis of distribution, abundance and species richness in R and BUGS* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04070-9>
- Lindenmayer, D. B., Likens, G. E., Haywood, A., Miezi, L.** (2011). Adaptive monitoring in the real world: Proof of concept. *Trends in Ecology and Evolution*, *26*(12), 641-646. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.002>
- Link, A., Palacios, E., Cortés-Ortiz, L., Stevenson, P., Cornejo, F., Mittermeier, R., Shanee, S., de la Torre, S., Guzmán Caro, D., Moscoso, P., Urbani, B., Seyjagat, J.** (2021). *Alouatta seniculus: The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T198676562A198687134* [Data set]. International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-2.RLTS.T198676562A198687134.en>
- Lundberg, P., Ranta, E., Ripa, J., Kaitala, V.** (2000). Population variability in space and time. *Trends in Ecology & Evolution*, *15*(11), 460-464.
- MacKenzie, D., Hines, J.** (2018). RPresence: R interface for program PRESENCE. *R Package Version*, *2*(9).
- MacKenzie, D. I., Nichols, J. D., Lachman, G. B., Droege, S., Andrew Royle, J., Langtimm, C. A.** (2002). Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one. *Ecology*, *83*(8), 2248-2255.
- Mackenzie, D. I., Royle, J. A.** (2005). Designing occupancy studies: General advice and allocating survey effort. *Journal of Applied Ecology*, *42*(6), 1105-1114. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01098.x>
- Marsh, C., Link, A., King-Bailey, G., Donati, G.** (2016). Effects of Fragment and Vegetation Structure on the Population Abundance of *Ateles hybridus*, *Alouatta seniculus* and *Cebus albifrons* in Magdalena Valley, Colombia. *Folia Primatologica*, *87*(1), 17-30. <https://doi.org/10.1159/000443929>
- McCarthy, M. A.** (2007). *Bayesian Methods for Ecology*. Cambridge University Press.
- Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible, Dirección De Bosques, B. Y. S. E., Sistema De Información Sobre Biodiversidad De Colombia, Dirección De Asuntos Marinos Costeros Y Recursos Acuáticos, Instituto De Ciencias Naturales, Instituto De Investigaciones Marinas Y Costeras Jose Benito Vives De Andrés, Conservación Internacional**

- Colombia, Instituto De Investigaciones Ambientales Del Pacífico John Von Neumann, Instituto Amazónico De Investigaciones Científicas, Instituto De Investigación De Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Pontificia Universidad Javeriana.** (2024). *Lista de especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica continental y marino-costera de Colombia—Resolución 0126 de 2024 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible* (Version 1.2, p. 2104 records) [Data as a Darwin Core Archive file, Metadata as an EML file, Metadata as an RTF file]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. <https://doi.org/10.15472/FROWZ3>
- Morales-Jimenez, A. L.** (2002). Densidad de los monos aulladores (*Alouatta seniculus*) en un bosque subandino, Risaralda, Colombia. *Neotropical Primates*, 10(December), 141-143.
- Morisita, M.** (1959). Measuring of the dispersion of individuals and analysis of the distributional patterns. *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., Ser. E (Biol.)*, 2, 215-235.
- Morisita, M.** (1962). I  $\sigma$ -Index, a measure of dispersion of individuals. *Researches on Population Ecology*, 4(1), 1-7.
- Nadachowski, E.** (1994). Observaciones sobre la ecología de cuatro especies de paujiles (Cracidae) en el Parque Regional Natural Ucumari. In *J. O. Rangel (ed.). Ucumari: Un caso típico de la diversidad biótica andina. Pereira, Colombia* (pp. 329-342). Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- Nichols, J. D., Williams, B. K.** (2006). Monitoring for conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 21(12), 668-673. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.08.007>
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'hara, R., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Wagner, H.** (2013). Package 'vegan'. *Community Ecology Package, Version*, 2(9), 1-295.
- Peña-Alvarez, B.** (2014). *Distribución y abundancia de crácidos en paisajes de la Reserva de la Biósfera Calakmul, Campeche* [PhD, El Colegio de la Frontera Sur]. <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-retrieve-file.pl?id=f8489ca33db8186428583e4597a4f5d8>
- Peterson, B. G., Carl, P., Boudt, K., Bennett, R., Ulrich, J., Zivot, E., Cornilly, D., Hung, E., Lestel, M., Balkissoon, K.** (2018). Package 'performanceanalytics'. *R Team Cooperation*, 3, 13-14.
- Possingham, H. P., Andelman, S. J., Noon, B. R., Trombulak, S. C., Pulliam, H. R.** (2000). Making Smart Conservation Decisions. *Research Priorities for Nature Conservation, September 2000*, 1-18.
- Ramírez-González, M.** (2015). *Programa de monitoreo del Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya. Plan de Manejo 2015-2019 del Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya. Dirección Territorial Andes Occidentales* (Pereira, Colombia). Parques Nacionales Naturales de Colombia.
- Riedler, B., Lang, S.** (2018). A spatially explicit patch model of habitat quality, integrating spatio-structural indicators. *Ecological Indicators*, 94, 128-141. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.027>
- Ríos, M. M., Londoño, G. A., Muñoz, M. C., Kattan, G.** (2008). Abundancia y endemismo en la Pava Caucana (*Penelope perspicax*): ¿Ecología o historia? *Ornitología Neotropical*, 19(SUPPL.), 295-303.
- Ríos, M., Muñoz, M.** (2014). *Penelope perspicax*. In *Renjifo, L. M., Gómez, M. F., Velásquez-Tibatá, J., Amaya-Villarreal, A. M., Kattan, G. H., Amaya-Espinell, J. D., y Burbano-Girón, J., 2014. Libro rojo de aves de Colombia, Volumen I: bosques húmedos de los Andes y la costa Pacífica* (1st edn, p. 77). Editorial Pontificia Universidad Javeriana e Instituto Alexander von Humboldt.
- Roncancio Duque, N. J.** (2021). Effect of landscape modification on primate assemblages of the Magdalena River Valley, Colombia. *Caldasia*, 43(2), 261-273. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v43n2.84845>
- Roncancio-Duque, N.** (2023). Uso de hábitat y coexistencia de *Penelope perspicax* y *Ortalis columbiana* (Cracidae) en la Reserva Nacional Forestal Bosque de Yotoco (Bosque subandino), valle del río Cauca, Colombia. *Ornitología Colombiana*, 24, 49-58. <https://doi.org/10.59517/oc.e573>
- Roncancio-Duque, N. R., Gómez-Posada, C.** (2009). Sympatric *Alouatta seniculus* and *Cebus capucinus* in an Andean Forest Fragment in Colombia: A Survey of Population Density. *Neotropical Primates*, 16(2), 51-56. <https://doi.org/10.1896/044.016.0201>
- Royle, J. A., Dorazio, R. M.** (2008). *Hierarchical modeling and inference in ecology: The analysis of data from populations, metapopulations and communities*. Elsevier.

- Royle, J. A., Nichols, J. D.** (2003). Estimating abundance from repeated presence-absence data or point counts. *Ecology*, 84(3), 777-790. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084%255B0777:EAFRPA%255D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084%255B0777:EAFRPA%255D2.0.CO;2)
- RUNAP Registro Unico Nacional de Áreas Protegidas.** (2023). Parques Nacionales Naturales de Colombia. <https://runap.parquesnacionales.gov.co>
- Sokal, R. R., Rohlf, F. J.** (1995). *Biometry*. Macmillan.
- Spiegelhalter, D., Thomas, A., Best, N., Lunn, D.** (2018). *OpenBUGS version 3.0. 2*.
- Stevenson, P. R., Quiñones, M. J., Ahumada, J. A.** (2000). Influence of Fruit Availability on Ecological Overlap among Four Neotropical Primates at Tinigua National Park, Colombia<sup>1</sup>. *Biotropica*, 32(3), 533-544. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00499.x>
- Thiollay, J.-M.** (1994). Structure, Density and Rarity in an Amazonian Rainforest Bird Community. *Journal of Tropical Ecology*, 10(4), 449-481. JSTOR Journals. <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsjsr&AN=edsjsr.2559982&lang=es&site=eds-live>
- Thomas, L., Buckland, S. T., Rexstad, E. A., Laake, J. L., Strindberg, S., Hedley, S. L., Bishop, J. R. B., Marques, T. A., Burnham, K. P.** (2010). Distance software: Design and analysis of distance sampling surveys for estimating population size. *Journal of Applied Ecology*, 47(1), 5-14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01737.x>
- Valencia Velasco, J. D., Estela, F. A., Fierro-Calderón, E., Valenzuela, L., Osorio-Domínguez, D.** (2022). Densidad y uso de hábitat de la pava caucana (*Penelope perspicax*) en los Farallones de Cali, Colombia. *Biota Colombiana*, 23(1), e1003. <https://doi.org/10.21068/2539200X.1003>
- Vaz, A. S., Marcos, B., Gonçalves, J., Monteiro, A., Alves, P., Civantos, E., Lucas, R., Mairota, P., Garcia-Robles, J., Alonso, J., Blonda, P., Lomba, A., Honrado, J. P.** (2015). Can we predict habitat quality from space? A multi-indicator assessment based on an automated knowledge-driven system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 37, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.10.014>

Original article

## Biogenic synthesis of silver-functionalized iron and copper oxide nanocomposites using the aqueous extract of *Psidium guajava* fruit

### Síntesis biogénica de nanocompuestos de óxidos de cobre y de hierro funcionalizados con plata utilizando el extracto acuoso del fruto de *Psidium guajava*

Michael Castañeda-Mendoza<sup>1,\*</sup>, Gabriel Leonardo Mora-Najar<sup>1</sup>, Claudia Liliana Sánchez-Sáenz<sup>3</sup>, Rolando Javier Rincón-Ortiz<sup>2</sup>, Cristian Camilo Ramírez-Fosca<sup>2</sup>, Indry Milena Saavedra-Gaona<sup>1</sup>, Daniel Llamasa-Pérez<sup>2</sup>, Carlos Arturo Parra-Vargas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Física de Materiales, Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Investigación Fundamental y Aplicada en Materiales, Universidad Antonio Nariño, Bogotá D.C., Colombia

<sup>3</sup> Grupo de Investigación en Telemática y TIC Aplicadas, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

## Abstract

Here, we present a green coprecipitation synthesis route for silver-functionalized copper and iron oxide nanocomposites ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{Fe}_2\text{O}_3@Ag$ ) using guava (*Psidium guajava*) fruit extract as reducing and stabilizing agent. The novelty of this approach lies in the unexplored use of guava, a widely available biomass rich in phytochemicals, to produce multifunctional nanocomposites with enhanced properties. The structural and morphological analyses (XRD, FTIR, SEM, TEM) confirmed the presence of crystalline phases of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ , and  $\text{Ag}$ , along with nanoflake-like and sphericle-like morphologies and nanometric particle sizes. Magnetic characterization (VSM) revealed a change from paramagnetic behavior in non-functionalized samples to weak ferromagnetism with reduced coercivity and magnetization upon silver incorporation. The antibacterial assays demonstrated that the functionalized nanocomposites exhibited strong inhibitory effects against the multidrug-resistant pathogen *Klebsiella pneumoniae*, achieving substantial growth inhibition at 500 ppm. Our findings highlight the potential of guava fruit extract as a sustainable precursor for the biogenic synthesis of silver-functionalized Fe–Cu oxide nanocomposites, offering a promising route for environmentally friendly nanomaterials with applications in biomedical and environmental fields.

**Keywords:** Green chemistry; Nanomaterials; Copper oxide; Iron oxide; Guava fruit extract; Antibacterial.

## Resumen

Presentamos aquí una ruta verde de síntesis por coprecipitación de nanocompuestos de óxidos de cobre y de hierro funcionalizados con plata ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}/\text{Fe}_2\text{O}_3@Ag$ ) utilizando extracto de guayaba (*Psidium guajava*) como agente reductor y estabilizador. La novedad de este enfoque radica en el uso inexplorado de la guayaba, una biomasa rica en fitoquímicos ampliamente disponible, para producir nanocompuestos multifuncionales con propiedades mejoradas. Los análisis estructurales y morfológicos (XRD, FTIR, SEM, TEM) confirmaron la presencia de fases cristalinas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$  y  $\text{Ag}$ , además de morfologías similares a nanoescamas y tamaños de partícula nanométricos. La caracterización magnética (VSM) reveló el cambio del comportamiento paramagnético en muestras no funcionalizadas a un ferromagnetismo débil con coercitividad y magnetización reducidas tras la incorporación de plata. Los ensayos antibacterianos demostraron que los nanocompuestos funcionalizados exhibían fuertes efectos inhibidores contra el patógeno resistente a múltiples

**Citation:** Castañeda-Mendoza M., *et al.* Biogenic synthesis of silver-functionalized iron and copper oxide nanocomposites using the aqueous extract of *Psidium guajava* fruit. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):818-832, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3187>

**Editor:** Rafael Gonzalez

**\*Corresponding autor:**  
Michael Castaneda-Mendoza;  
[michael.castaneda@uptc.edu.co](mailto:michael.castaneda@uptc.edu.co) -  
[castanedamendozamichael@gmail.com](mailto:castanedamendozamichael@gmail.com)

**Received:** March 25, 2025

**Accepted:** September 2, 2025

**Published on line:** October 15, 2025



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

fármacos *Klebsiella pneumoniae*, logrando una inhibición sustancial del crecimiento a 500 ppm. Estos hallazgos destacan el potencial del extracto de la guayaba como precursor sostenible para la síntesis biogénica de nanocompuestos de los óxidos de Fe y Cu funcionalizados con plata, lo que ofrece una ruta prometedora para la obtención de nanomateriales respetuosos del medio ambiente con aplicaciones en campos biomédicos y ambientales.

**Palabras clave:** Química verde; Nanomateriales: óxido de cobre; Óxido de hierro; Extracto de guayaba; Antibacteriano.

## Introduction

Nanomaterials (NM) have gained significant attention in recent decades due to their wide range of applications, including environmental remediation (Kumar *et al.*, 2022), renewable energies (Akin *et al.*, 2019), biomedicine (Naik *et al.*, 2023), and industries (Paidari & Ibrahim, 2021), among others. The vast spectrum of NM uses arises from the unique properties they exhibit; some of their most notable characteristics include a high surface area-volume ratio (Altammar, 2023), ferrimagnetism (Zahn *et al.*, 2022), and ferromagnetic and superparamagnetic behaviors (Rashid *et al.*, 2022). This type of material has also shown promising properties in diagnosing and treating diseases such as cancer (Jose *et al.*, 2020), serving as contrast agents in magnetic resonance imaging, drug delivery (El-Boubbou *et al.*, 2016), and bactericidal applications (Yang *et al.*, 2021). In this context, researchers have studied the biological and bactericidal properties of copper oxide and iron oxide nanostructures (Bhavyasree & Xavier, 2020; Jamzad & Bidkorpeh, 2020; Sharma *et al.*, 2020), finding that specific iron oxide nanostructures like hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) exhibit high antimicrobial activity against bacteria such as *Pseudomonas aeruginosa* (Yoonus *et al.*, 2021). Copper oxide nanoparticles, such as Cu<sub>2</sub>O and delafossite (CuFeO<sub>2</sub>), have also demonstrated notable antibacterial properties against various Gram-positive bacteria strains (*Bacillus subtilis*, *B. cereus*, and *Staphylococcus aureus*) and Gram-negative strains (*Escherichia coli* and *Xanthomonas campestris*) (Antonoglou *et al.*, 2019).

Although copper and iron nano-oxides have shown bactericidal properties, they can be optimized by functionalizing their surfaces (Yoonus *et al.*, 2021) using elements with appreciable antimicrobial qualities. Several metallic nanoparticles (NPs) exhibit these properties. Silver nanoparticles (Ag-NPs), for example, show high toxicity against a variety of microorganisms (Parvekar *et al.*, 2020; Salem *et al.*, 2020). These results suggest that the potential synthesis of a nanocomposite system integrating copper and iron oxides, functionalized with silver, may enhance bacteriostatic and bactericidal properties compared to their non-functionalized counterparts (Antonoglou *et al.*, 2019).

On the other hand, the biogenic approach in NM synthesis has gained great relevance. In this regard, plants have been an ideal and abundant source of biomass useful in the synthesis, since the phytochemicals present in plant extracts can act as reducing and stabilizing agents of inorganic metal ions in NPs synthesis (Chokkareddy & Redhi, 2018). Several studies account for the use of plants' essential oils, fruits, roots, flowers, leaves, and stems to obtain NM (Fakhari *et al.*, 2019; Jadoun *et al.*, 2021; Marslin *et al.*, 2018; Charbgoon *et al.*, 2017; Arsiya *et al.*, 2017; Narayanan *et al.*, 2021; Reddy, 2017; Ismail, 2020; Ramola *et al.*, 2019; Tamoradi & Mousavi, 2020; Cahyana *et al.*, 2021; Aksu Demirezen *et al.*, 2019; Jacob *et al.*, 2017; Veisi *et al.*, 2021; Buarki *et al.*, 2022). In this context, Boyacá is one of the Colombian departments with the highest agrobiodiversity and agricultural production, producing 26,000 tons of vegetables and 98,000 tons of fruits in 2009 (Ayala, 2017), which shows tremendous possibilities given the availability of biological substances that may be used in this synthesis route. The antioxidant properties of guava have been widely evidenced in various studies using DPPH free radical scavenging tests (Manikandan & Anand, 2015). Its extracts have also shown inhibitory properties against several bacteria, among them, *Listeria monocytogenes* and *S. aureus* (Mahfuzul Hoque *et al.*, 2007). Ripe guava fruits are rich in tannins, polyphenols with antioxidant properties, triterpenes, flavonoids, essential oils, saponins, carotenoids, lectins, fatty acids, fiber, and vitamins. Besides its high

concentrations of vitamin C, higher than those of citrus fruits such as oranges or lemons, it contains appreciable amounts of vitamins A, B1, B2, niacin (B3), and pantothenic acid (B5), as well as appreciable amounts of phosphorus, calcium, iron, potassium, and sodium (Rodríguez Medina & Valdés-Infante Herrero, 2016).

Various studies have also described the green synthesis of metallic nanoparticles and simple oxide systems using plant extracts, but few have focused on Ag and Au NP or metal oxide nanocomposites obtained through phytogetic routes with guava leaf extracts (Johurul Islam *et al.*, 2023; Nguyen *et al.*, 2023; Patil & Rane, 2020; Santhoshkumar *et al.*, 2014; Sougandhi & Ramanaiah, 2020). To the best of our knowledge, *P. guajava* fruit extract has not been explored as a reducing and stabilizing agent in this specific nanocomposite. The high bioavailability of this biomass, coupled with its great diversity of phytochemicals with reducing properties, makes the guava fruit an ideal candidate for the biogenic synthesis of NPs. Here, we report a silver-functionalized copper oxide and iron oxide nanocomposites biogenic route synthesis using *P. guajava* aqueous fruit extract as a reducing and stabilizing agent. We used X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometry (VSM), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) techniques for the structural, magnetic, and morphological characterization of the materials. Finally, we evaluated the bactericidal properties of the materials against strains of *K. pneumoniae*, a Gram-negative microorganism implicated in nosocomial diseases highly resistant to various antimicrobials and antibiotics (Effah *et al.*, 2020). The integration of green synthesis with comprehensive structural and magnetic characterization, together with antibacterial assessment against *K. pneumoniae*, highlights the novelty and application potential of our study, particularly in Colombia, where guava is widely available.

## Experimental details

### Materials

Ripe guava fruit (variety Palmira-ICA1 reported by Otálora *et al.*, 2022) was sourced from the primary wholesale market in Tunja, Boyacá, Colombia; 98% purity iron sulfate heptahydrate  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (CAS No. 7782-63-0) was purchased from Supelco-Ensure; 98% purity copper sulfate pentahydrate  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (CAS No. 7758-99-8) was purchased from Merck; 99.9% purity silver nitrate  $\text{AgNO}_3$  (CAS No. 7761-88-8) was purchased from Loba Chemie, and sodium hydroxide NaOH (CAS No. 1310-73-2) from PanReac AppliChem. All reagents were analytical grade.

### Guava fruit extract preparation

Guava fruit extract was prepared using the modified method reported by Kumar *et al.* (2017). The fruit was thoroughly washed, ground, and filtered on a wide pore mesh; 10 g of the pulp obtained was taken and heated at 50°C in 50 mL of distilled water for 60 min under constant stirring at 1000 rpm and cooled at room temperature. The translucent, pink-colored extract was filtered with Whatman No. 1 filter paper, and then an extract/NaOH solution was prepared by dissolving 25.5 g of guava pulp in 60 mL of distilled water. Once the extract was obtained, 0.5 g of NaOH was added and completely dissolved.

### Preparation of nanocomposites

The samples were obtained using the modified method reported by Bhushan *et al.* (2019). A stoichiometric amount of  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  was dissolved in 50 mL of distilled water at 50 °C. Then, 50 mL of a  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  solution was added to reach a  $\text{Cu}^{2+}:\text{Fe}^{2+}$  1:1 molar ratio and, subsequently, 10 mL of the guava extract was added under constant stirring (1000 rpm) for 1 h. The pH was adjusted to 12, drop by drop, through the addition of a 0.2 M NaOH solution. Finally, the sample was aged at 50°C for 24 h to allow the NPS precipitation. The mixture was centrifuged and washed thrice at 2500 rpm for 20 min, then dried at 80 °C for 12 h. This procedure was repeated without the extract to obtain two systems: with extract (FeCu-G) and without it (FeCu).

### **Silver functionalization**

Nanocomposite functionalization was done using the modified method reported by **Kootti et al.** (2013). Initially, 0.7 g of the material was dispersed in 50 mL of 0.05/0.202 (M)  $\text{AgNO}_3$ /Urea solution at room temperature and constant stirring (500 rpm) for 30 min to ensure the adsorption of Ag on the NPs, then, 10 mL of extract/NaOH solution was added to act as a stabilizing agent. After 5 minutes of reaction, 4 mL of guava extract was added as a reducing agent. The mixture obtained was heated to 70°C for 1 h to accelerate the reduction reaction. The functionalized nanocomposite was washed and centrifuged with distilled water at 3500 rpm for 20 min to remove any excess protective agents and alkaline materials, resulting in two samples: FeCuAg5 (without extract) and FeCuAg5-G (with extract). The  $\text{AgNO}_3$ /Urea ratio changed to 0.10/0.404 (M), obtaining the FeCuAg10 and FeCuAg10-G samples.

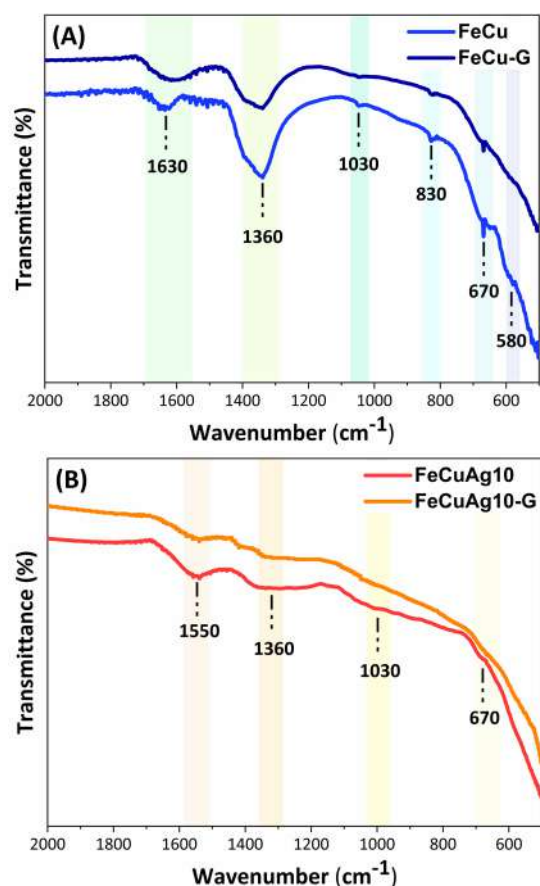
### **Characterization**

The analysis was done in a Nicolet iS50 FTIR equipment using the attenuated total reflectance or ATR technique, recorded with a ZnSe crystal. The infrared spectra were collected in the wavenumber range from 2000  $\text{cm}^{-1}$  to 500  $\text{cm}^{-1}$ . For the crystalline structure analysis by XRD, we used an Empyrean diffractometer, with Cu-K $\alpha$  radiation ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ) between 10° and 90°, a step width of 0.053°, a scanning speed of 2 $\theta$  equals 2° per minute, and a measurement temperature of 293 K. For the TEM study, we used a LEO 440i scanning electron microscope, coating the samples with a thin Au-Pd layer, for the SEM analysis, a CARL ZEISS EVO MA 1 microscope, and to measure the fundamental magnetic properties of the synthesized materials, a Quantum Design Versalab magnetometer. Field-dependent magnetization measurements were taken from -30 to 30 kOe at room temperature (300 K). For temperature-dependent magnetization measurements, we used the Zero Field Cooled-Field Cooled (ZFC-FC) model varying the temperature in the 50 K- 400 K range at an applied field of 50 Oe. We evaluated the inhibition of bacterial growth by the nanocomposites using the microdilution technique in broth. We prepared and diluted 1 mg/mL (1000 ppm) solutions of each synthesized sample in microplates with the bacterial *K. pneumoniae* strain culture broths, starting from 30 ppm. Sodium hypochlorite (NaClO) at 7% was used as a control. The microplates were analyzed at 620 nm using an FC Multiskan TM plate reader.

## **Results and discussion**

### **Structural characterization**

**Figure 1A** shows the infrared spectra corresponding to the FeCu and FeCu-G samples. The characteristic CuO bands were observed at shorter wavenumber, around 580  $\text{cm}^{-1}$ , indicating the vibrational modes of the bond between Cu-O atoms. Additionally, we observed the Cu-O stretching vibration bands around 1360  $\text{cm}^{-1}$  (**Buledi et al.**, 2021; **Sharmila et al.**, 2018). This broadband from 500 to 900  $\text{cm}^{-1}$  and the individual sharp peaks at 830  $\text{cm}^{-1}$  were generally attributed to the metal-oxygen bond, indicating the Fe-O and Cu-O stretching vibration mode (**Jansanthea et al.**, 2024; **Khalil et al.**, 2017; **Nope et al.**, 2025). The peak around 670  $\text{cm}^{-1}$  responds to the Cu(I)-O bond (**Al-Senani et al.**, 2022; **Castañeda-Mendoza et al.**, 2025), their drastic decrease indicating a compositional change involving  $\text{Cu}_2\text{O}$ . A subsequent XRD analysis confirmed this transformation. The band around 1630  $\text{cm}^{-1}$  was associated with the vibrational modes of the O-H bond bending due to the superficial water adsorption (**Amin et al.**, 2016; **Apte et al.**, 2007). In **Figure 1B**, the new band around 1550  $\text{cm}^{-1}$  is usually attributed to the N-H bond vibrational modes and is common in these biogenic routes (**Sivaraj et al.**, 2014). Furthermore, the use of urea in the functionalization process can explain the presence of this functional group. In general terms, the detection of fine spectral peaks between 577  $\text{cm}^{-1}$  and 1030  $\text{cm}^{-1}$ , with differentiated absorption bands for copper and iron oxides, corroborated the presence of these oxides in the samples, where the differences between the IR spectra of the functionalized and non-functionalized samples were attributed to the nanocomposites coating by Ag NPs.



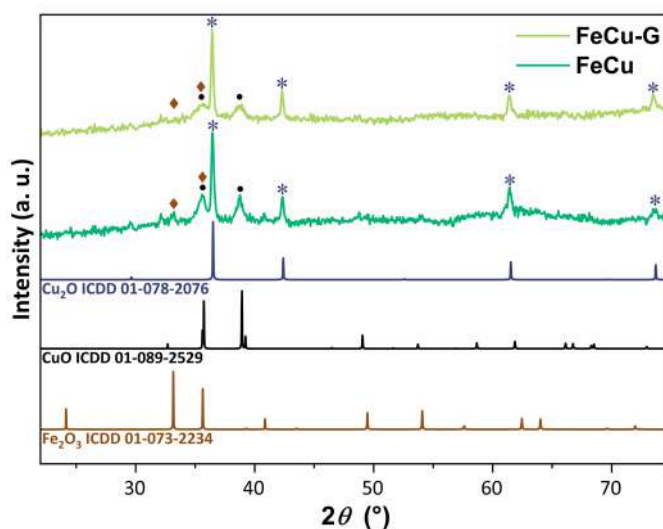
**Figure 1.** FTIR spectra of FeCu and FeCu-G (A) and FeCuAg10 and FeCuAg10-G samples (B)

Other authors have documented the variations between coated materials' IR spectra and those of uncoated or non-functionalized materials (Chitradevi *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2022), which can be attributed to the surface interaction of phytochemicals present in the extract. Literature reports demonstrate that polyphenols, flavonoids, proteins, and organic acids, including O–H, N–H, and C=O groups, adsorb onto metallic or oxide surfaces during biogenic synthesis, leading to shifts or intensity changes in FTIR peaks (Kumar *et al.*, 2016). Furthermore, any variation in particle size or morphology induced by the extract may enhance surface area effects, amplifying the superficial functional groups as observed in O–H bound spectral changes.

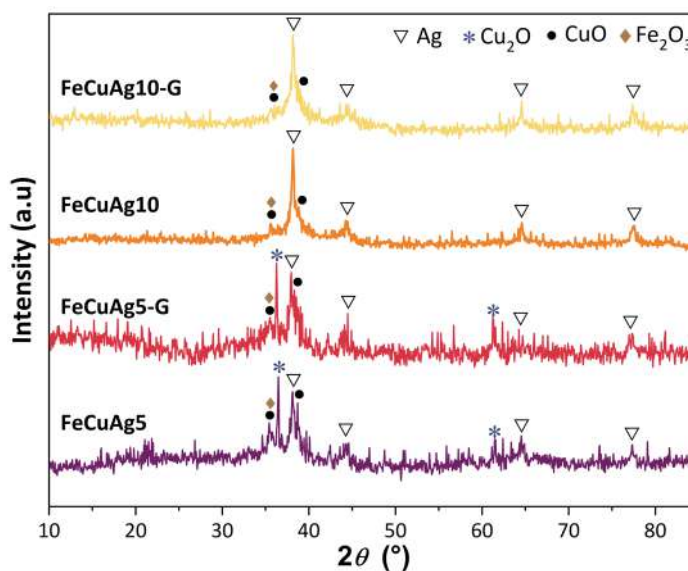
On the other hand, the XRD pattern of the non-functionalized NPs (Figure 2) shows six peaks in the whole spectrum, with  $2\theta$  values of  $35.62^\circ$ ,  $36.42^\circ$ ,  $38.80^\circ$ ,  $42.30^\circ$ ,  $61.44^\circ$ , and  $73.52^\circ$  for the FeCu and FeCu-G samples. Using the X'pert high score Plus software and the Crystallography Open Database (COD), these signals were assigned to three crystalline phases: a first phase of iron (III) oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (ICDD 01-073-2234), presenting a rhombohedral structure with space group R3-C (167), lattice parameters  $a = b = 5.0342 \text{ \AA}$  and  $c = 13.7483 \text{ \AA}$ , with angles  $\alpha = \beta = 90^\circ$  and  $\gamma = 120^\circ$ , a relative abundance of 95% in FeCu and 93% in FeCu-G; a second phase of copper(I) oxide or (Cu<sub>2</sub>O) (ICDD 01-078-2076) with cubic structure and space group Pn-3m (224), lattice parameters  $a = b = c = 4.2670 \text{ \AA}$  with angles  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ , and a relative abundance of 3% in FeCu and 6% in FeCu-G, with the use of guava fruit extract increasing the formation of Cu<sub>2</sub>O, and a last phase of copper(II) oxide (CuO) (ICDD 01-089-2529) with a monoclinic structure and space group C2/c (15), lattice parameters  $a = 4.6853 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.4257 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.1303 \text{ \AA}$  of angles  $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ,  $\beta = 99.549^\circ$ , relative abundance of 2% in FeCu and 1% in FeCu-G, a

reduction due to the reactions generated by the multicomponent matrix of guava extract, transforming and stabilizing the  $\text{Cu}^{2+}$  ions into  $\text{Cu}^{1+}$ . These results agree with other reports (Mohamed *et al.*, 2021; Parvathiraja & Shailajha, 2021).

The XRD spectra of silver functionalized nanocomposites (Figure 3) revealed peaks of both the nanocomposite support and the immobilized Ag NPs; the signals corresponded to an Ag phase with  $2\theta$  values of  $38.18^\circ$ ,  $44.38^\circ$ ,  $64.52^\circ$ , and  $77.50^\circ$  matching crystallographic planes (111), (200), (220), and (311), respectively, and exhibiting a cubic structure with space group  $Fm-3m$  (225), lattice parameters  $a = b = c = 4.0773 \text{ \AA}$ , and angles  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ . The peaks assigned to the NPs showed lower intensity compared to their non-functionalized counterparts, which has been attributed to the presence of Ag-NPs on the



**Figure 2.** XRD patterns of the unfunctionalized FeCu and FeCu-G samples. The peaks assigned to the detected crystalline phases are indicated with the symbols (\*)  $\text{Cu}_2\text{O}$ , (◇)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , and (•)  $\text{CuO}$



**Figure 3.** XRD of functionalized samples. The peaks assigned to the Ag crystalline phases are indicated with the symbol (▽). The peaks observed in the diffractograms indicate the crystalline nature of the synthesized solids

surface of the nanocomposites (Kanwal *et al.*, 2019), where the absence of specific peaks in the diffractograms of the functionalized samples may respond to the higher concentration of Ag-NPs.

The reducing and stabilizing capacity of the guava extract can be attributed directly to its phytochemical composition. Previous studies have demonstrated that *P. guajava* is rich in bioactive metabolites such as flavonoids, polyphenols, tannins, carotenoids, and ascorbic acid, all of which exhibit well-documented redox activity and surface-capping ability in green synthesis routes (Nguyen *et al.*, 2023; Otálora *et al.*, 2022, 2024). These compounds may actively contribute to nanoparticle nucleation, growth regulation, and surface stabilization, while also enhancing the antibacterial functionality of the resulting nanocomposites. Although we did not evaluate here the influence of the guava variety, ripening stage, or agroecological conditions on the composition of the extract, these factors are known to affect the concentration and stability of bioactive molecules (Ibrahim *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2023).

These structural modifications are not only indicative of the successful silver functionalization and the interaction of phytochemicals with the oxide-based composite surface, but they also have direct implications for the antibacterial behavior of the nanocomposites. Previous studies have shown that silver-functionalized copper and iron oxides exhibit enhanced antibacterial performance due to a synergistic mechanism where structural defects, exposed surface functional groups (–OH, –NH), and Ag-related surface reactivity facilitate reactive oxygen species (ROS) generation and membrane disruption in Gram-negative bacteria (Antonoglou *et al.*, 2019; Pareek *et al.*, 2021; Parvathiraja & Shailajha, 2021).

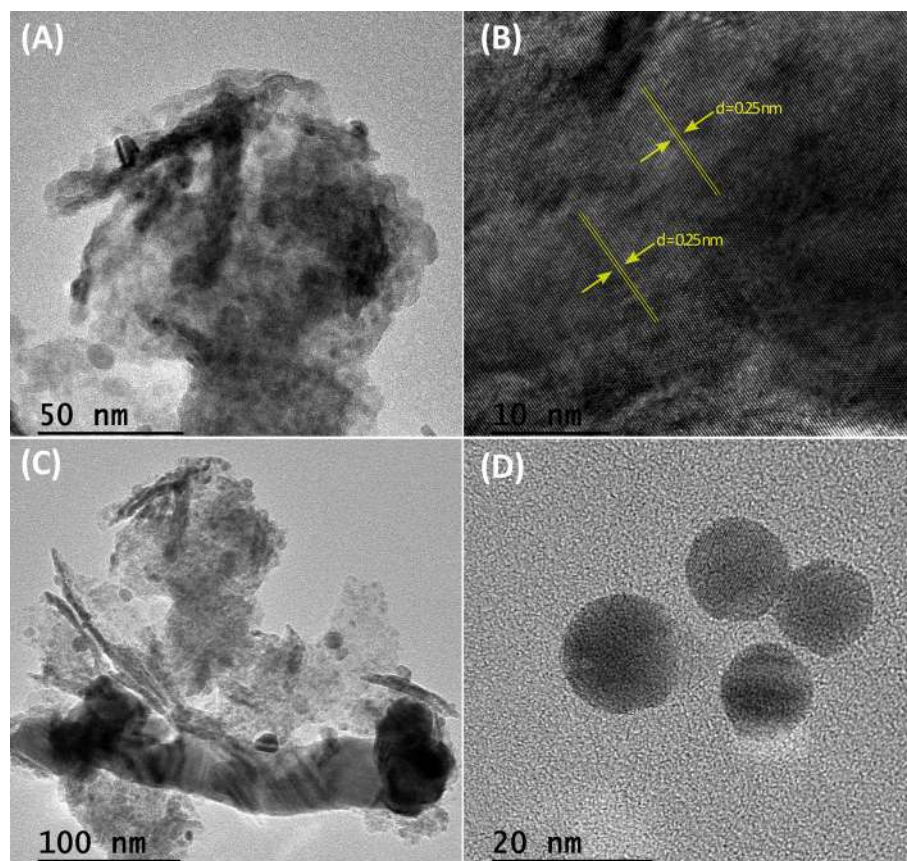
### ***Structural morphological analyses***

The TEM and HR-TEM images of the FeCuAg5-G nanocomposite are shown in **Figure 4A-D**. Agglomerated nanosized crystals can be observed in these images (A, C), a common characteristic of polycrystalline materials (Abd El-Sadek *et al.*, 2019). The morphology of the compounds analyzed is circular and heterogeneous, and the contrasts observed in the images arise due to the different orientations of the crystals in relation to the electron beam (Yalcin *et al.*, 2014). The particles observed have diameters ranging between 7.10 nm and 19.40 nm, with an average diameter of  $7.69 \pm 0.57$  nm. The lattice lines correspond to the interplanar distances in **Figure 4B**, which were calculated using HR-TEM and measured on a 10 nm scale. The highly crystalline structure with an interplanar distance of  $d = 0.25$  nm on the plane (002), consistent with the monoclinic phase of CuO, matched the XRD data and reports (Pallavolu *et al.*, 2023). On the other hand, it was possible to observe the silver nanoparticles with a defined spherical shape (**Figure 4D**).

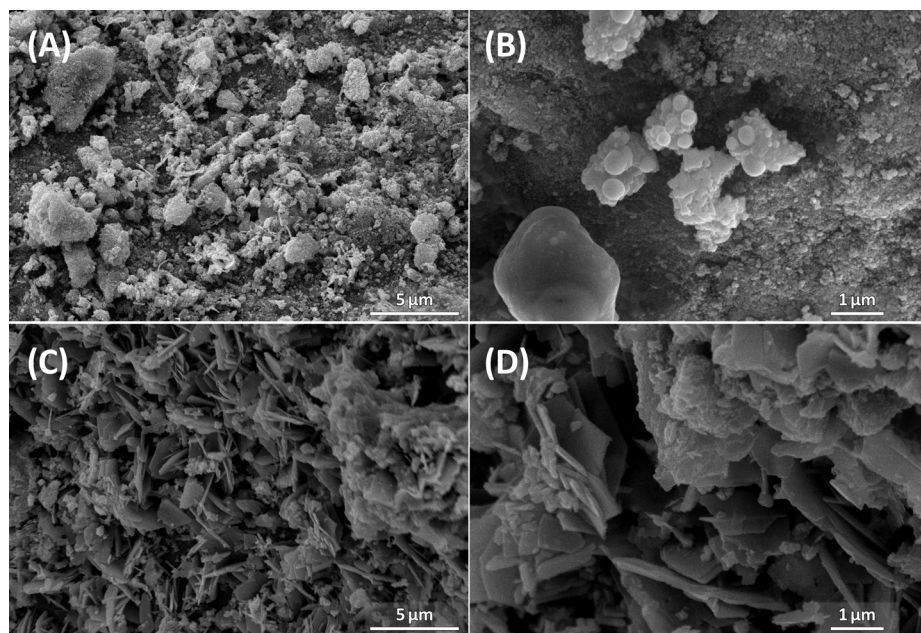
Sample FeCuAg10 SEM image (**Figure 5 A-B**) shows aggregates without a specific shape, with an average particle size of  $103.7 \pm 7.3$  nm. In contrast, sample FeCuAg10-G (**Figure 5 C-D**) had nanoflakes structures with defined edges and smooth surfaces ( $79.54 \pm 4.41$  nm). This flake morphology is attributed to the presence of copper oxide CuO (Siddiqui *et al.*, 2016), so the elongated CuO distribution corresponds to the preferential orientation of this oxide along the crystallographic plane (010) (Hwa *et al.*, 2019; Pallavolu *et al.*, 2023). The spherical particles in both samples are due to Ag NPs, while the other heterogeneous phase is attributed to the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase.

### ***Magnetic characterization***

**Figure 6** shows the magnetization vs field isotherm at 300 K for FeCuAg10 and FeCuAg10-G samples. The coercivity field ( $H_c$ ) and remanent magnetization ( $M_r$ ) (Gaona *et al.*, 2023; Saavedra-Gaona *et al.*, 2024) were determined for FeCuAg10, with  $M_r = 0.0011$  emu/g and  $H_c = 11$  Oe, and for FeCuAg10-G, with  $M_r = 0.00034$  emu/g and  $H_c = 5$  Oe. The hysteresis loops depict weak ferromagnetic behavior with a predominant paramagnetic contribution. This behavior is attributed to particle size reductions, oxygen vacancies, and spin ordering (Atchaya & Meena Devi, 2024). Additionally, nanostructure anisotropy, oxygen vacancies, structural disorder, defects, surface spins, and magnetic exchange coupling contribute to these properties (Al-Saeedi *et al.*, 2021; Atchaya & Meena Devi, 2024; Batsaikhan *et al.*, 2020).



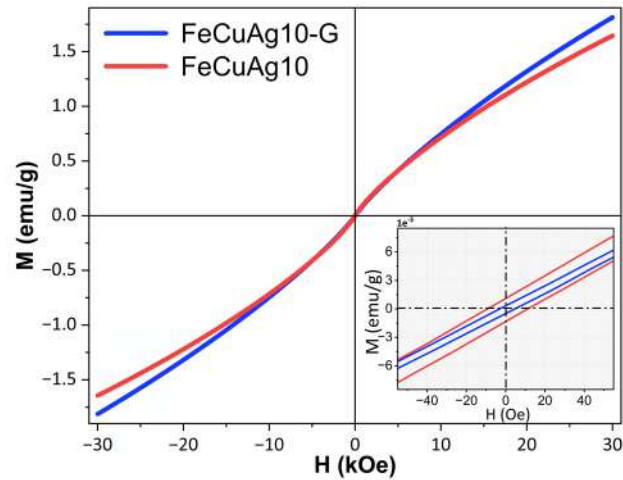
**Figure 4.** TEM and HR-TEM images of the FeCuAg5-G sample. The TEM images display polycrystalline agglomerates with spherical shape, whereas the HR-TEM analysis reveals a d-distance value of  $\sim 0.25$  nm



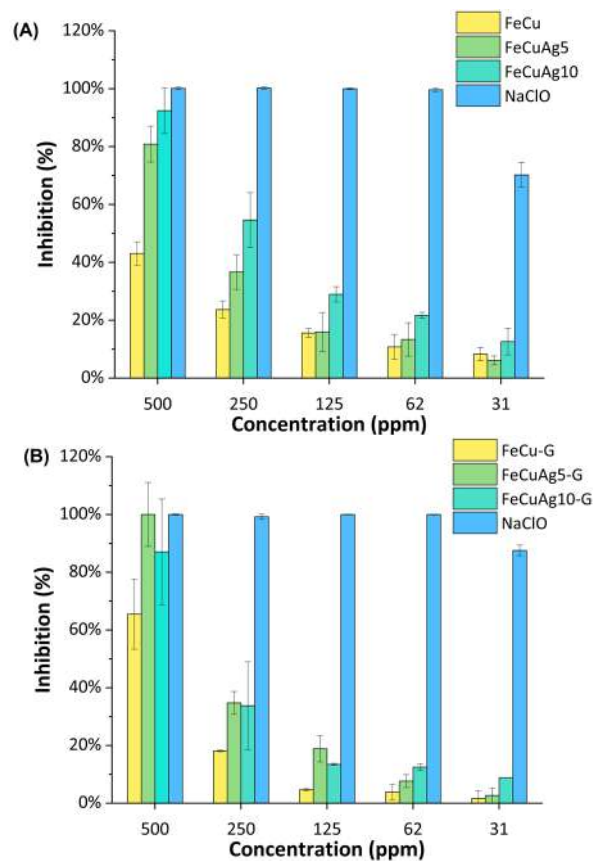
**Figure 5.** SEM images for the FeCuAg10 (A-B) and FeCuAg10-G (C-D) samples

**Bactericidal activity**

The microdilution tests evaluated the bactericidal activity of the synthesized nanocomposites against the Gram-negative *K. pneumoniae* strain. Bacterial growth inhibition percentages for different nanocomposite concentrations are presented in **Figure 7**; the maximum bacterial growth inhibitory capacity of functionalized and non-functionalized



**Figure 6.** Magnetic isotherms at 300 K of FeCuAg10 and FeCuAg10-G samples



**Figure 7.** Bactericidal response against *Klebsiella pneumoniae*

nanocomposites occurred at 500 ppm, in contrast with the NaClO positive target 7% concentration (70,000 ppm). The bactericidal potential of the nanocomposites against the target was evident, which is even more relevant when considering the high resistance prevalence rates of this bacterium against most commonly used antimicrobial drugs, including cefepime, aztreonam, and cefotaxime, with 72.6%, 73.3%, and 79.2%, respectively (Effah *et al.*, 2020).

Although the microdilution tests showed an inhibitory effect on bacterial growth for all nanocomposites, it was higher in the functionalized samples, probably explained by the fact that Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs, for example, tend to exhibit greater bactericidal activity against Gram-positive bacteria than against Gram-negative bacteria, which is attributed to the fact that these NPs are highly stable under normal environmental conditions, thus generating fewer metal ions releases that exert bactericidal activity (Pallela *et al.*, 2019). On the other hand, Parek *et al.* (2021) explained how bactericidal response improvement in functionalized solids is due to Ag NPs generating intra- and extracellular ROS in *K. pneumoniae*, which, consequently, produces oxidative stress leading to cellular demise. Also, Ag NPs can damage bacterial DNA and inhibit microbial growth by releasing Ag<sup>+</sup> ions, which interact with sulfur compounds, leading to cell death. (Shahriary *et al.*, 2018).

## Conclusions

The structural characterization confirmed the synthesis of copper oxide and iron oxide functionalized with silver NPs. The use of guava fruit extract not only modified the phase composition, increasing the presence of Cu<sub>2</sub>O, but also promoted the formation of nanoflake-like morphologies, highlighting its role as a sustainable capping and reducing agent. Magnetic evaluation revealed predominantly paramagnetic behavior with weak ferromagnetic contributions. Notably, the incorporation of the extract led to reduced saturation magnetization and coercivity, evidencing the influence of phytochemicals on the magnetic response. Besides, the biogenic route enhanced the antibacterial activity of the nanocomposites, as functionalized samples synthesized with guava extract exhibited stronger inhibition against *K. pneumoniae*. These findings demonstrate that green synthesis using guava extract provides a viable pathway for tailoring structural, magnetic, and antibacterial properties, underscoring its potential for biomedical and environmental applications.

## Acknowledgements

We thank the research departments at Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia and Universidad Antonio Nariño (Project No. 2022205) for their support in the realization of this work.

## Author contributions

**CAPV, RJRO:** supervision. **MCM, GLMN:** material preparation. **CCRF, CLSS, IMSG:** characterization. **MCM, GLMN, RJRO, IMSG, DLLP:** methodology and formal analysis. **MCM, GLMN:** drafting of the initial manuscript. All authors conducted conceptualization and investigation, and reviewed and approved the final manuscript.

## Conflicts of interest

The authors declare there are no conflicts of interest regarding the publication of this article. They also declare that they have no financial or personal relationships that could influence their work or affect the interpretation of the results presented in this article

## References

Abd El-Sadek, M. S., Wasly, H. S., Battoo, K. M. (2019). X-ray peak profile analysis and optical properties of CdS nanoparticles synthesized via the hydrothermal method. *Applied Physics A*, 125(4), 283. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2576-y>

- Akin, S., Sadegh, F., Turan, S., Sonmezoglu, S. (2019). Inorganic CuFeO<sub>2</sub> Delafossite Nanoparticles as Effective Hole Transport Materials for Highly Efficient and Long-Term Stable Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(48), 45142-45149. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b14740>
- Aksu Demirezen, D., Yildiz, Y. Ş., Yilmaz, Ş., Demirezen Yilmaz, D. (2019). Green synthesis and characterization of iron oxide nanoparticles using *Ficus carica* (common fig) dried fruit extract. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 127(2), 241-245. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.07.024>
- Al-Saeedi, S. I., Al-Senani, G. M., Abd-Elkader, O. H., Deraz, N. M. (2021). One Pot Synthesis, Surface and Magnetic Properties of Cu<sub>2</sub>O/Cu and Cu<sub>2</sub>O/CuO Nanocomposites. *Crystals*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/cryst11070751>
- Al-Senani, G. M., Al-Saeedi, S. I., Al-Kadhi, N. S., Abd-Elkader, O. H., Deraz, N. M. (2022). Green Synthesis and Pinning Behavior of Fe-Doped CuO/Cu<sub>2</sub>O/Cu<sub>4</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposites. *Processes*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/pr10040729>
- Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1155622. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>
- Amin, N. H., Ali, L. I., El-Molla, S. A., Ebrahim, A. A., Mahmoud, H. R. (2016). Effect of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> precursors on physicochemical and catalytic properties of CuO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S678-S684. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.07.026>
- Antonoglou, O., Lafazanis, K., Mourdikoudis, S., Vourliaris, G., Lialiaris, T., Pantazaki, A., Dendrinou-Samara, C. (2019). Biological relevance of CuFeO<sub>2</sub> nanoparticles: Antibacterial and anti-inflammatory activity, genotoxicity, DNA and protein interactions. *Materials Science and Engineering: C*, 99, 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.01.112>
- Apte, S. K., Naik, S. D., Sonawane, R. S., Kale, B. B., Baeg, J. O. (2007). Synthesis of Nanosize-Necked Structure  $\alpha$ - and  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and its Photocatalytic Activity. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(2), 412-414. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01424.x>
- Arsiya, F., Sayadi, M. H., Sobhani, S. (2017). Green synthesis of palladium nanoparticles using *Chlorella vulgaris*. *Materials Letters*, 186, 113-115. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.101>
- Atchaya, S. & Meena Devi, J. (2024). Experimental Investigation on Structural, Optical, Electrical and Magnetic Properties of Copper Oxide Nanoparticles. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 94(1), 153-160. <https://doi.org/10.1007/s40010-023-00855-7>
- Ayala, A. B. (2017). Agrobiodiversity and nutrition in Boyacá, Colombia: a historic relationship of imbalance. *Cultura Científica*, 15, Article 15.
- Batsaikhan, E., Lee, C.-H., Hsu, H., Wu, C.-M., Peng, J.-C., Ma, M.-H., Deleg, S., Li, W.-H. (2020). Largely Enhanced Ferromagnetism in Bare CuO Nanoparticles by a Small Size Effect. *ACS Omega*, 5(8), 3849-3856. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02913>
- Bhavyasree, P. G. & Xavier, T. S. (2020). Green synthesis of Copper Oxide/Carbon nanocomposites using the leaf extract of *Adhatoda vasica* Nees, their characterization and antimicrobial activity. *Heliyon*, 6(2), e03323. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03323>
- Bhushan, M., Kumar, Y., Periyasamy, L., Viswanath, A. K. (2019). Study of synthesis, structural, optical and magnetic characterizations of iron/copper oxide nanocomposites: A promising novel inorganic antibiotic. *Materials Science and Engineering: C*, 96, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.11.009>
- Buarki, F., AbuHassan, H., Al Hannan, F., Henari, F. Z. (2022). Green Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles Using *Hibiscus rosa sinensis* Flowers and their Antibacterial Activity. *Journal of Nanotechnology*, 2022, e5474645. <https://doi.org/10.1155/2022/5474645>
- Buledi, J. A., Pato, A. H., Kanhar, A. H., Solangi, A. R., Batool, M., Ameen, S., Palabiyik, I. M. (2021). Heterogeneous kinetics of CuO nanoflakes in simultaneous decolorization of Eosin Y and Rhodamine B in aqueous media. *Applied Nanoscience*, 11, 1241-1256. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01685-y>
- Cahyana, A. H., Liandi, A. R., Yulizar, Y., Romdoni, Y., Wendari, T. P. (2021). Green synthesis of CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles mediated by *Morus alba* L. leaf extract: Crystal structure, grain morphology, particle size, magnetic and catalytic properties in Mannich reaction. *Ceramics International*, 47(15), 21373-21380. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.146>
- Castañeda-Mendoza, M., Parra-Vargas, C. A., Rincón-Joya, M., Chiquito, A. J., Raba-Páez, A. M. (2025). Gas Sensor Properties of (CuO/WO<sub>3</sub>)-CuWO<sub>4</sub> Heterostructured Nanocomposite Materials. *Materials*, 18(12), 2896. <https://doi.org/10.3390/ma18122896>

- Charbgo, F., Ahmad, M. B., Darroudi, M.** (2017). Cerium oxide nanoparticles: green synthesis and biological applications. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 1401-1413. <https://doi.org/10.2147/IJN.S124855>
- Chitradevi, T., Lenus, A. J., Jaya, N. V.** (2019). Structure, morphology and luminescence properties of sol-gel method synthesized pure and Ag-doped ZnO nanoparticles. *Materials Research Express*, 7(1), 015011. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5c53>
- Chokkareddy, R. & Redhi, G. G.** (2018). Green Synthesis of Metal Nanoparticles and its Reaction Mechanisms. In *Green Metal Nanoparticles* (pp. 113-139). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119418900.ch4>
- Effah, C. Y., Sun, T., Liu, S., Wu, Y.** (2020). *Klebsiella pneumoniae*: an increasing threat to public health. *Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s12941-019-0343-8>
- El-Boubbou, K., Ali, R., Bahhari, H. M., AlSaad, K. O., Nehdi, A., Boudjelal, M., AlKushi, A.** (2016). Magnetic Fluorescent Nanoformulation for Intracellular Drug Delivery to Human Breast Cancer, Primary Tumors, and Tumor Biopsies: Beyond Targeting Expectations. *Bioconjugate Chemistry*, 27(6), 1471-1483. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.6b00257>
- Fakhari, S., Jamzad, M., Kabiri Fard, H.** (2019). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: a comparison. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 12(1), 19-24. <https://doi.org/10.1080/17518253.2018.1547925>
- Gaona, I. M. S., Mendoza, M. C., Vargas, C. A. P.** (2023). Structural and Magnetic Properties of Nd<sub>3</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18+δ</sub> Superconductor. *Journal of Low Temperature Physics*, 211(3), 156-165. <https://doi.org/10.1007/s10909-023-02963-5>
- Hwa, K. Y., Karuppaiah, P., Gowthaman, N. S. K., Balakumar, V., Shankar, S., Lim, H. N.** (2019). Ultrasonic synthesis of CuO nanoflakes: A robust electrochemical scaffold for the sensitive detection of phenolic hazard in water and pharmaceutical samples. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104649. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2019.104649>
- Ibrahim, E. H., Kilany, M., Ghramh, H. A., Khan, K. A., ul Islam, S.** (2019). Cellular proliferation/cytotoxicity and antimicrobial potentials of green synthesized silver nanoparticles (AgNPs) using *Juniperus procera*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(7), 1689-1694. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.08.014>
- Ismail, M. I. M.** (2020). Green synthesis and characterizations of copper nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122283. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122283>
- Jacob, S. J. P., Prasad, V. L. S., Sivasankar, S., Muralidharan, P.** (2017). Biosynthesis of silver nanoparticles using dried fruit extract of *Ficus carica* - Screening for its anticancer activity and toxicity in animal models. *Food and Chemical Toxicology*, 109, 951-956. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.03.066>
- Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N. K., Meena, R. K.** (2021). Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(1), 355-374. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01074-x>
- Jamzad, M. & Bidkorpeh, M.** (2020). Green synthesis of iron oxide nanoparticles by the aqueous extract of *Laurus nobilis* L. leaves and evaluation of the antimicrobial activity. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 10. <https://doi.org/10.1007/s40097-020-00341-1>
- Jansanthea, P., Inyai, N., Chomkitichai, W., Ketwaraporn, J., Ubolsook, P., Wansao, C., Wanaek, A., Wannawek, A., Kuimalee, S., Pookmanee, P.** (2024). Green synthesis of CuO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO ternary composite photocatalyst using grape extract for enhanced photodegradation of environmental organic pollutant. *Chemosphere*, 351, 141212. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141212>
- Johurul Islam, M., Khatun, N., Hossen Bhuiyan, R., Sultana, S., Shaikh, M. A. A., Bitu, M. N. A., Chowdhury, F., Islam, S.** (2023). *Psidium guajava* leaf extract mediated green synthesis of silver nanoparticles and its application in antibacterial coatings. *RSC Advances*, 13(28), 19164-19172. <https://doi.org/10.1039/D3RA03381C>
- Jose, J., Kumar, R., Harilal, S., Mathew, G. E., Parambi, D. G. T., Prabhu, A., Uddin, Md. S., Aleya, L., Kim, H., Mathew, B.** (2020). Magnetic nanoparticles for hyperthermia in cancer treatment: an emerging tool. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(16), 19214-19225. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07231-2>
- Kanwal, Z., Raza, M. A., Riaz, S., Manzoor, S., Tayyeb, A., Sajid, I., Naseem, S.** (2019). Synthesis and characterization of silver nanoparticle-decorated cobalt nanocomposites (Co@AgNPs) and their density-dependent antibacterial activity. *Royal Society Open Science*, 6(5), 182135. <https://doi.org/10.1098/rsos.182135>

- Khalil, A. T., Ovais, M., Ullah, I., Ali, M., Shinwari, Z. K., Maaza, M.** (2017). Biosynthesis of iron oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles via aqueous extracts of *Sageretia thea* (Osbeck.) and their pharmacognostic properties. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 10(4), 186-201. <https://doi.org/10.1080/17518253.2017.1339831>
- Kooti, M., Saiahi, S., Motamedi, H.** (2013). Fabrication of silver-coated cobalt ferrite nanocomposite and the study of its antibacterial activity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 333, 138-143. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.12.038>
- Kumar, B., Smita, K., Cumbal, L., Debut, A.** (2017). Green synthesis of silver nanoparticles using Andean blackberry fruit extract. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(1), 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.09.006>
- Kumar Das, P., Mohanty, C., Krishna Purohit, G., Mishra, S., Palo, S.** (2022). Nanoparticle assisted environmental remediation: Applications, toxicological implications and recommendations for a sustainable environment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100679. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100679>
- Kumar, K. K. P., Dinesh, N. D., Murari, S. K.** (2019). Synthesis of CuO and Ag doped CuO nanoparticles from Muntingia calabura leaf extract and evaluation of their antimicrobial potential. *International Journal of Nano and Biomaterials*, 8(3-4), 228-252. <https://doi.org/10.1504/IJNBM.2019.104939>
- Mahfuzul Hoque, M. D., Bari, M. L., Inatsu, Y., Juneja, V. K., Kawamoto, S.** (2007). Antibacterial activity of guava (*Psidium guajava* L.) and Neem (*Azadirachta indica* A. Juss.) extracts against foodborne pathogens and spoilage bacteria. *Foodborne Pathogens and Disease*, 4(4), 481-488. <https://doi.org/10.1089/fpd.2007.0040>
- Manikandan, R. & Anand, V.** (2015). A Review on Antioxidant activity of *Psidium guajava*. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 8, 339. <https://doi.org/10.5958/0974-360X.2015.00056.6>
- Marslin, G., Siram, K., Maqbool, Q., Selvakesavan, R. K., Kruzka, D., Kachlicki, P., Franklin, G.** (2018). Secondary Metabolites in the Green Synthesis of Metallic Nanoparticles. *Materials*, 11(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/ma11060940>
- Mohamed, H. E. A., Thema, T., Dhlamini, M. S.** (2021). Green synthesis of CuO nanoparticles via *Hyphaene thebaica* extract and their optical properties. *Materials Today: Proceedings*, 36, 591-594. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.592>
- Naik, T. S. S. K., Singh, S., Narasimhappa, P., Varshney, R., Singh, J., Khan, N. A., Zahmatkesh, S., Ramamurthy, P. C., Shehata, N., Kiran, G. N., Sunil, K.** (2023). Green and sustainable synthesis of CaO nanoparticles: Its solicitation as a sensor material and electrochemical detection of urea. *Scientific Reports*, 13(1), 19995. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46728-2>
- Narayanan, M., Divya, S., Natarajan, D., Senthil-Nathan, S., Kandasamy, S., Chinnathambi, A., Alahmadi, T. A., Pugazhendhi, A.** (2021). Green synthesis of silver nanoparticles from aqueous extract of *Ctenolepis garcini* L. and assess their possible biological applications. *Process Biochemistry*, 107, 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.008>
- Nguyen, D.-K., Hung, N. Q., Dinh, V.-P.** (2023). Antibacterial properties of silver nanoparticles greenly synthesized using guava fruit extract as a reducing agent and stabilizer. *Applied Nanoscience*, 13(6), 3709-3720. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02506-6>
- Nope, E., Sathicq, G., Martínez, J. J., Gaona, I. M. S., Mendoza, M. C., Vargas, C. A. P., Romanelli, G. P., Luque, R.** (2025). Cationic charge influence on the magnetic response of the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>–[Me<sub>2</sub><sup>+</sup> 1–y Me<sub>3</sub><sup>+</sup> y (OH)<sub>2</sub>]<sup>y+(Co<sub>3</sub><sup>2-</sup>) y/2</sup>·mH<sub>2</sub>O hydrotalcite system. *Nanotechnology Reviews*, 14(1). <https://doi.org/10.1515/ntrev-2025-0204>
- Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Gómez-Castaño, J. A.** (2022). Spray-Drying Microencapsulation of Pink Guava (*Psidium guajava*) Carotenoids Using Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes and Aloe Vera Leaves as Encapsulating Materials. *Polymers*, 14(2), 310. <https://doi.org/10.3390/polym14020310>
- Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Gómez-Castaño, J. A.** (2024). Physicochemical and bioactive characterization of pink guava pulp microcapsules prepared by freeze-drying using coffee mucilage as a wall material. *LWT*, 207, 116665. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116665>
- Paidari, S. & Ibrahim, S. A.** (2021). Potential application of gold nanoparticles in food packaging: a mini review. *Gold Bulletin*, 54(1), 31-36. <https://doi.org/10.1007/s13404-021-00290-9>
- Pallavolu, M.-R., Banerjee, A.-N., Joo, S.-W.** (2023). Battery-Type Behavior of Al-Doped CuO Nanoflakes to Fabricate a High-Performance Hybrid Supercapacitor Device for Superior Energy Storage Applications. *Coatings*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/coatings13081337>

- Pallela, P. N. V. K., Ummey, S., Ruddaraju, L. K., Gadi, S., Cherukuri, C. S., Barla, S., Pammi, S. V. N.** (2019). Antibacterial efficacy of green synthesized  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles using *Sida cordifolia* plant extract. *Heliyon*, 5(11), e02765. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02765>
- Pareek, V., Devineau, S., Sivasankaran, S. K., Bhargava, A., Panwar, J., Srikumar, S., Fanning, S.** (2021). Silver Nanoparticles Induce a Triclosan- Like Antibacterial Action Mechanism in Multi-Drug Resistant *Klebsiella pneumoniae*. *Frontiers in Microbiology*, 12, 638640. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.638640>
- Parvathiraja, C. & Shailajha, S.** (2021). Bioproduction of CuO and Ag/CuO heterogeneous photocatalysis-photocatalytic dye degradation and biological activities. *Applied Nanoscience*, 11(4), 1411-1425. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01743-5>
- Parvekar, P., Palaskar, J., Metgud, S., Maria, R., Dutta, S.** (2020). The minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) of silver nanoparticles against *Staphylococcus aureus*. *Biomaterial Investigations in Dentistry*, 7(1), 105-109. <https://doi.org/10.1080/26415275.2020.1796674>
- Patil, S. P. & Rane, P. M.** (2020). *Psidium guajava* leaves assisted green synthesis of metallic nanoparticles: a review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(1), 60. <https://doi.org/10.1186/s43088-020-00088-2>
- Rajesh Kumar, T. V., Murthy, J. S. R., Narayana Rao, M., Bhargava, Y.** (2016). Evaluation of silver nanoparticles synthetic potential of *Couroupita guianensis* Aubl., flower buds extract and their synergistic antibacterial activity. *3 Biotech*, 6(1), 92. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0407-9>
- Ramola, B., Joshi, N. C., Ramola, M., Chhabra, J., Singh, A.** (2019). Green Synthesis, Characterisations and Antimicrobial Activities of CaO Nanoparticles. *Oriental Journal of Chemistry*, 35(3), 1154-1157.
- Rashid, S. S., Mustafa, A. H., Ab Rahim, M. H.** (2022). Ferromagnetic nanoparticles synthesis and functionalization for laccase enzyme immobilization. *Materials Today: Proceedings*, 48, 916-919. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.661>
- Reddy, K. R.** (2017). Green synthesis, morphological and optical studies of CuO nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*, 1150, 553-557. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.09.005>
- Rodríguez-Medina, N. N. & Valdés-Infante Herrero, J.** (2016). Chapter 13 - Guava (*Psidium guajava* L.) Cultivars: An Important Source of Nutrients for Human Health. In M. S. J. Simmonds & V. R. Preedy (Eds.), *Nutritional Composition of Fruit Cultivars* (pp. 287-315). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00013-1>
- Saavedra-Gaona, I. M., Supelano, G. I., Suárez-Vera, S. G., Fonseca, L. C. I., Castañeda-Mendoza, M., Sánchez-Sáenz, C. L., Izquierdo, J. L., Gómez, A., Morán, O., Parra-Vargas, C. A.** (2024). Magnetic and electrical behaviour of Yb substitution on Bi<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub> (0.00 < x < 0.06) ceramic system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 593, 171827. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.171827>
- Salem, S. S., EL-Belely, E. F., Niedbala, G., Alnoman, M. M., Hassan, S. E.-D., Eid, A. M., Shaheen, T. I., Elkelish, A., Fouda, A.** (2020). Bactericidal and In-Vitro Cytotoxic Efficacy of Silver Nanoparticles (Ag-NPs) Fabricated by Endophytic Actinomycetes and Their Use as Coating for the Textile Fabrics. *Nanomaterials*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/nano10102082>
- Santhoshkumar, T., Rahuman, A. A., Jayaseelan, C., Rajakumar, G., Marimuthu, S., Kirthi, A. V., Velayutham, K., Thomas, J., Venkatesan, J., Kim, S.-K.** (2014). Green synthesis of titanium dioxide nanoparticles using *Psidium guajava* extract and its antibacterial and antioxidant properties. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 7(12), 968-976. [https://doi.org/10.1016/S1995-7645\(14\)60171-1](https://doi.org/10.1016/S1995-7645(14)60171-1)
- Shahriary, M., Veisi, H., Hekmati, M., Hemmati, S.** (2018). In situ green synthesis of Ag nanoparticles on herbal tea extract (*Stachys lavandulifolia*)-modified magnetic iron oxide nanoparticles as antibacterial agent and their 4-nitrophenol catalytic reduction activity. *Materials Science and Engineering: C*, 90, 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.044>
- Sharma, D., Ledwani, L., Mehrotra, T., Kumar, N., Pervaiz, N., Kumar, R.** (2020). Biosynthesis of hematite nanoparticles using *Rheum emodi* and their antimicrobial and anticancerous effects in vitro. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 206, 111841. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.111841>
- Sharmila, G., Sakthi Pradeep, R., Sandiya, K., Santhiya, S., Muthukumar, C., Jeyanthi, J., Manoj Kumar, N., Thirumarimurugan, M.** (2018). Biogenic synthesis of CuO nanoparticles using *Bauhinia tomentosa* leaves extract: Characterization and its antibacterial application. *Journal of Molecular Structure*, 1165, 288-292. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.011>

- Siddiqui, H., Qureshi, M. S., Haque, F. Z.** (2016). Valuation of copper oxide (CuO) nanoflakes for its suitability as an absorbing material in solar cells fabrication. *Optik*, 127(8), 3713-3717. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.12.133>
- Singh, P., Singh, K. R., Verma, R., Prasad, P., Verma, R., Das, S. N., Singh, J., Singh, R. P.** (2022). Preparation, antibacterial activity, and electrocatalytic detection of hydrazine based on biogenic CuFeO<sub>2</sub>/PANI nanocomposites synthesized using *Aloe barbadensis* Miller. *New Journal of Chemistry*, 46(18), 8805-8816. <https://doi.org/10.1039/D2NJ00913G>
- Sivaraj, R., Rahman, P. K. S. M., Rajiv, P., Salam, H. A., Venkatesh, R.** (2014). Biogenic copper oxide nanoparticles synthesis using *Tabernaemontana divaricate* leaf extract and its antibacterial activity against urinary tract pathogen. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 133, 178-181. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.05.048>
- Sougandhi, P. R. & Ramanaiah, S.** (2020). Green synthesis and spectral characterization of silver nanoparticles from *Psidium guajava* leaf extract. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 50(12), 1290-1294. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/24701556.2020.1745839>
- Tamoradi, T. & Mousavi, S. M.** (2020). In situ biogenic synthesis of functionalized magnetic nanoparticles with Ni complex by using a plant extract (Pistachio Leaf) and its catalytic evaluation towards polyhydroquinoline derivatives in green conditions. *Polyhedron*, 175, 114211. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2019.114211>
- Veisi, H., Karmakar, B., Tamoradi, T., Tayebbe, R., Sajjadifar, S., Lotfi, S., Maleki, B., Hemmati, S.** (2021). Bio-inspired synthesis of palladium nanoparticles fabricated magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite over *Fritillaria imperialis* flower extract as an efficient recyclable catalyst for the reduction of nitroarenes. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83854-1>
- Yalcin, A. O., de Nijs, B., Fan, Z., Tichelaar, F. D., Vanmaekelbergh, D., van Blaaderen, A., Vlugt, T. J. H., van Huis, M. A., Zandbergen, H. W.** (2014). Core-shell reconfiguration through thermal annealing in Fe(x)O/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ordered 2D nanocrystal arrays. *Nanotechnology*, 25(5), 055601. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/5/055601>
- Yang, Y., Aqeel Ashraf, M., Fakhri, A., Kumar Gupta, V., Zhang, D.** (2021). Facile synthesis of gold-silver/copper sulfide nanoparticles for the selective/sensitive detection of chromium, photochemical and bactericidal application. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 249, 119324. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119324>
- Yoonus, J., Resmi, R., Beena, B.** (2021). Evaluation of antibacterial and anticancer activity of green synthesized iron oxide ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 46, 2969-2974. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.426>
- Zahn, D., Landers, J., Buchwald, J., Diegel, M., Salamon, S., Müller, R., Köhler, M., Ecke, G., Wende, H., Dutz, S.** (2022). Ferrimagnetic Large Single Domain Iron Oxide Nanoparticles for Hyperthermia Applications. *Nanomaterials*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/nano12030343>.

Original article

## Optimization of the methodology for the extraction of organophosphate pesticides by HS-SPME-GC-NPD

## Optimización de la metodología de extracción de plaguicidas organofosforados por HS-SPME-GC-NPD

✉ Jhon Alexander Fiscal-Ladino, ✉ Gonzalo Taborda-Ocampo,

✉ Juan Pablo Betancourt-Arango\*

Grupo de Investigación en Cromatografía y Técnicas Afines, - GICTA, Facultad de Ciencias Exactas y naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

### Abstract

Organophosphate compounds are widely present in the environment and are known to exert harmful effects on human health by inhibiting acetylcholinesterase (AChE), a key enzyme of the nervous system. This study aimed to optimize a solvent-free extraction methodology to determine five organophosphate residues —chlorpyrifos, methamidophos, fenitrothion, dichlorvos, and dimethoate— in water samples using solid-phase microextraction (SPME) combined with gas chromatography and nitrogen–phosphorus detection (GC–NPD). We applied an experimental design to evaluate five critical variables: fiber type, extraction time, temperature, stirring speed, and salt concentration. The best extraction performance was achieved by using a DVB/CAR/PDMS fiber for 20 minutes at 50°C, 500 rpm, and 1% NaCl. Under these conditions, the method had excellent linearity ( $r^2$  up to 0.9892), detection limits between 1.088 and 3.114  $\mu\text{g/L}$ , quantification limits between 3.264 and 9.342  $\mu\text{g/L}$ , and precision with %RSD values ranging from 0.998 to 3.599. These results confirmed that the proposed method is fast, simple, sensitive, and robust. Its optimization contributes to the development of green analytical strategies for monitoring pesticide contamination in aqueous environments.

**Keywords:** Environmental analysis; Green methodology; GC–NPD; SPME; Organophosphorus compounds.

### Resumen

Los compuestos organofosforados se encuentran ampliamente en el medio ambiente y se sabe que ejercen efectos nocivos en la salud humana al inhibir la acetilcolinesterasa (AChE), una enzima clave del sistema nervioso. El objetivo de nuestro estudio fue optimizar una metodología de extracción sin disolventes para la determinación de cinco residuos organofosforados, clorpirifos, metamidofós, fenitrotión, diclorvos y dimetoato, en muestras de agua mediante microextracción en fase sólida (SPME) combinada con cromatografía de gases y detección de nitrógeno-fósforo (GC-NPD). Se aplicó un diseño experimental para evaluar cinco variables críticas: tipo de fibra, tiempo de extracción, temperatura, velocidad de agitación y concentración de sal. El mejor rendimiento en la extracción se obtuvo utilizando una fibra DVB/CAR/PDMS durante 20 minutos a 50 °C, 500 rpm y 1% de NaCl. Bajo estas condiciones el método demostró una excelente linealidad ( $r^2$  hasta 0,9892), límites de detección entre 1,088 y 3,114  $\mu\text{g/L}$ , límites de cuantificación entre 3,264 y 9,342  $\mu\text{g/L}$ , y una precisión con valores de %RSD que oscilaron entre 0,998 y 3,599. Estos resultados confirmaron que el método propuesto es rápido, sencillo, sensible y sólido. Su optimización contribuye al desarrollo de estrategias analíticas ecológicas para la monitorización de la contaminación por pesticidas en ambientes acuosos.

**Palabras clave:** Cromatografía; GC-NPD; Organofosforados; Plaguicidas.

**Citation:** Fiscal-Ladino JA, *et al.*  
Optimization of the methodology for the extraction of organophosphate pesticides by HS-SPME-GC-NPD. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):833-843, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3173>

**Editor:** Luis Fernando Echeverri

\*Corresponding autor:  
Juan Pablo Betancourt Arango;  
[chemquantum@outlook.com](mailto:chemquantum@outlook.com)

**Received:** March 13, 2025

**Accepted:** September 23, 2025

**Published on line:** Octubre 8, 2025



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

## Introduction

Organophosphate pesticides are a group of organic compounds containing a phosphorus atom typically bonded to three or four oxygen atoms and one sulfur atom (**Fernández-de Miguel *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2024**). A wide variety of compounds belonging to this family are classified and used in industrial, medical, military, and agricultural sectors. Their extensive application, particularly in agriculture, has led to increasingly frequent reports of pesticide poisoning, especially among farmers who handle these substances without appropriate protective measures (**Gervilla-Caño *et al.*, 2007; Bravo *et al.*, 2022**).

Organophosphates replaced organochlorine pesticides, which were banned or restricted due to their severe environmental and health effects. However, organophosphates themselves also pose significant risks to ecosystems and human health, although their use remains legal in many countries (**Fernández *et al.*, 2010; Mali *et al.*, 2023**). The primary toxicological mechanism of organophosphates involves the irreversible inhibition of acetylcholinesterase (AChE), a key enzyme in the transmission of nerve impulses. This inhibition can result in neurotoxicity, muscle paralysis, and, in severe cases, death. Additional effects include damage to vital organs such as the liver and heart (**Toro-Osorio *et al.*, 2017; Ciriello *et al.*, 2018**).

Exposure routes to organophosphates include direct contact during pesticide application, ingestion of contaminated food, and consumption of water polluted by agricultural runoff. In Colombia, for example, surface and groundwater sources are frequently contaminated by agrochemical residues, particularly in regions with intensive monoculture practices (**Philippat *et al.*, 2018**). The severity of poisoning depends on the exposure level and route, ranging from mild symptoms to severe intoxication and death (**Castro *et al.*, 2004; Murcia & Stashenko, 2008**). Given their chemical stability and environmental persistence, residues of these pesticides are commonly found in fruits, vegetables, and water, demanding continuous monitoring and regulation (**Wani *et al.*, 2019**). The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) agrochemical commission has emphasized the importance of monitoring the full life-cycle of these compounds, from their application on crops to the final residue present in consumable products (**Guerrero, 2003**).

In Colombia, the use of pesticides such as methamidophos, parathion, and endosulfan is still permitted in agriculture (**Betancourt-Arango *et al.*, 2025**), although some, including fenitrothion, malathion, and glyphosate, are under surveillance due to rising concerns about their toxicity and environmental impact (**Jaramillo-Colorado, 2016**). However, updated national data show increasing detection of organophosphate residues in water bodies and food products, especially in high-production agricultural zones like Valle del Cauca and Antioquia, underscoring the urgent need for more effective monitoring techniques.

For the identification and quantification of organophosphates in complex matrices, highly sensitive and selective analytical techniques are essential. Gas chromatography (GC) coupled with selective detectors such as the nitrogen phosphorus detector (NPD) (**Betancourt-Arango *et al.*, 2021**), or with mass spectrometry (GC-MS) is widely recognized for its capability to detect trace levels of these compounds (**Quintero *et al.*, 2013; Gavidia *et al.*, 2017**). The NPD offers increased sensitivity for analytes containing nitrogen and phosphorus atoms, which makes it especially suitable for organophosphates. However, the success of any chromatographic method depends heavily on the sample preparation step.

In recent years, there has been a strong push toward “green” analytical chemistry practice. In this context, solid-phase microextraction (SPME) has emerged as a powerful solvent-free extraction technique that significantly reduces environmental impact while maintaining high analytical performance (**Fabjanowicz *et al.*, 2018**). SPME enables efficient pre-concentration of analytes with minimal sample handling and no need for toxic solvents, which is ideal for environmental applications, particularly in low-resource settings or routine analysis scenarios where simplicity and reproducibility are essential (**Anjos & Andrade, 2014; Mu *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2020; Vievard *et al.*, 2022**).

Despite prior studies on the use of SPME for organophosphate analysis (Tsoukali *et al.*, 2005; Milhome *et al.*, 2011), few have optimized multiple extraction parameters simultaneously under GC–NPD conditions, particularly in the context of water analysis in Colombia. Some of these studies report the use of headspace SPME (HS–SPME), while others rely on direct immersion (DI–SPME), and often do not provide clear methodological distinctions. Our main objective, therefore, was to develop and validate a robust, sensitive, and environmentally sustainable method for the detection of five organophosphate pesticides, chlorpyrifos, methamidophos, fenitrothion, dichlorvos, and dimethoate, in aqueous samples using SPME coupled with GC–NPD. Extraction conditions were optimized through a factorial experimental design evaluating five critical variables: fiber type, extraction time, extraction temperature, stirring speed, and NaCl concentration, each at three levels. The novelty of the study lies in its comprehensive optimization approach, its use of an accessible detection system (GC–NPD), and its potential applicability in real environmental monitoring scenarios in Colombia and other similar contexts.

## Materials and methods

### Reagents

We evaluated the following organophosphate pesticides: methamidophos (CAS No. 10265-92-6), chlorpyrifos (CAS No. 2921-88-2), dichlorvos (CAS No. 62-73-7), fenitrothion (CAS No. 122-14-5), and dimethoate (CAS No. 60-51-5). All pesticide standards were of  $\geq 98\%$  purity and obtained from Sigma-Aldrich® (USA). Ethyl acetate ( $\geq 98\%$  purity) was purchased from PanReac AppliChem® (Spain), the solid-phase microextraction (SPME) fibers of various coatings were obtained from Supelco® (USA), and ultrapure water (Type 1) was produced using a Milli-Q purification system.

### Standards preparation

Stock solutions of each pesticide (1000 mg/L) were prepared individually in ethyl acetate and stored at  $-20^{\circ}\text{C}$  in amber glass vials to prevent photodegradation. Working solutions were prepared by diluting the stock solutions with ethyl acetate to concentrations of 1 and 5 mg/L for each pesticide. These working solutions were mixed in 10 mL volumes and used to determine the retention times of each compound, and to establish the limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) for the analytical method.

### Extraction conditions

The extraction of organophosphate pesticides was performed using headspace solid-phase microextraction (HS–SPME). We used a volume of 10 mL of ultrapure water (Type 1) previously spiked with a mixture of the five target pesticides at a concentration of 50  $\mu\text{g/L}$  as the extraction matrix. Each 10 mL aliquot was placed in a 20 mL glass vial equipped with a PTFE/silicone septum and sealed with an aluminum cap. Before fiber exposure, 1% NaCl (w/v) was added directly to the aqueous sample to enhance ionic strength and facilitate the partitioning of analytes into the vapor phase. The solution was then stirred using a magnetic stir bar and a temperature-controlled stir plate. No organic solvent was used during the extraction phase; ethyl acetate was applied exclusively in the preparation of calibration standards. Once the salt was fully dissolved, the fiber was manually introduced through the septum and exposed to the headspace of the vial under the specific extraction conditions of each experimental run, as defined by the experimental design (Table 1). These parameters included extraction time (10, 20, 30 min), temperature (50, 60,  $70^{\circ}\text{C}$ ), and stirring speed (300, 500, 700 rpm). The fiber remained suspended in the headspace while the sample was stirred throughout the extraction.

At the end of the extraction time, the fiber was retracted into its needle housing and immediately inserted into the GC–NPD injector port for thermal desorption. Desorption was carried out at  $250^{\circ}\text{C}$  in splitless mode for 10 minutes, allowing the adsorbed analytes to be released directly into the column. The fiber was then removed and conditioned before reuse, following the manufacturer's recommendations.

**Table 1.** Experimental design of type N + (N – 1) for organophosphate pesticide analysis by GC–NPD

Factors	Fiber type			NaCl concentration (%)			Extraction time (min)			Stirring speed (rpm)			Extraction temperature (°C)		
	DVB/ CAR	PDMS	DVB/ CAR/ PDMS	1	5	10	20	30	40	300	500	700	50	60	70
1	x				x			x			x				x
2		x			x			x			x				x
3			x		x			x			x				x
4			x	x				x			x				x
5			x		x			x			x				x
6			x			x		x			x				x
7			x		x		x				x				x
8			x		x				x						x
9			x		x			x		x					x
10			x		x			x				x			
11			x		x			x			x		x		
12			x		x			x			x				x

The matrix design used “X” to indicate the variation of each experimental factor across the runs. Fiber types are abbreviated as follows: DVB/CAR = divinylbenzene/carboxen, PDMS = polydimethylsiloxane, DVB/CAR/PDMS = divinylbenzene/carboxen/polydimethylsiloxane. Each experimental run was performed in triplicate.

### Chromatographic conditions

The chromatographic analysis was carried out using a Thermo Scientific Trace 1310 gas chromatograph (USA) equipped with a nitrogen phosphorus detector (NPD). Separation of the organophosphate compounds was achieved using a ZB-5 fused silica capillary column (30 m × 0.25 mm i.d., 0.25 μm film thickness), purchased through Outsourcing Comercial SAS (Manizales, Caldas, Colombia). The injector was operated in splitless mode at a temperature of 250°C to ensure optimal sample transfer, and the detector temperature was maintained at 300 °C. The oven temperature program was as follows: initial temperature of 90 °C held for 1 minute, followed by a ramp of 10°C/min to 300°C, where it was held for 1 minute for a total run time of 16 minutes. Nitrogen was used as the carrier gas at a constant flow rate of 1.0 mL/min. For the NPD, hydrogen was supplied at 2.3 mL/min and air at 60 mL/min, according to manufacturer specifications. The SPME fiber was thermally desorbed in the injector port for 10 minutes to ensure complete analyte release. The chromatographic data for the organophosphate pesticides were processed using Chromeleon™ Chromatography Data System (CDS) software (Thermo Fisher Scientific, USA).

### Linearity, limit of detection (LOD), and limit of quantification (LOQ)

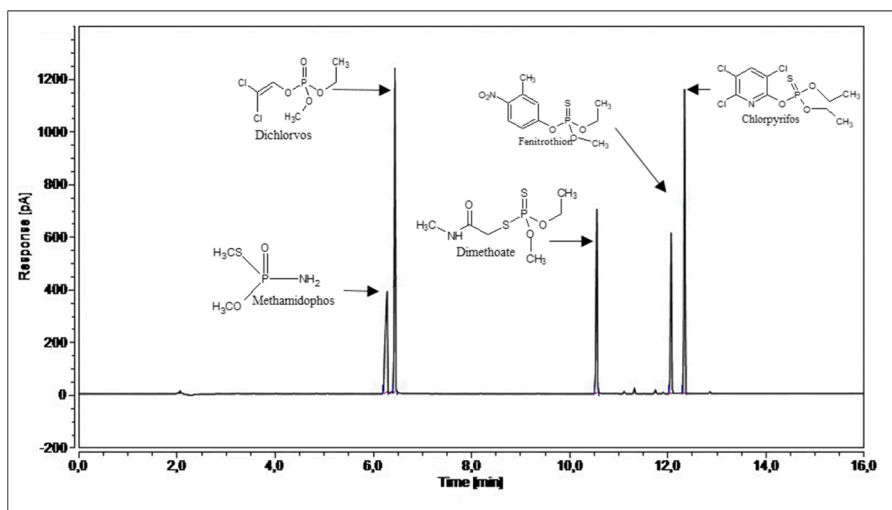
To validate the fundamental analytical parameters of the method, we evaluated the following variables: calibration curve, linearity, limit of detection (LOD), and limit of quantification (LOQ). Linearity was assessed by constructing a calibration curve using standard solutions at ten different concentrations, ranging from 50 μg/L to 500 μg/L. Each concentration level was analyzed in triplicate. The calibration curve was generated by plotting the analyte concentration against the corresponding peak area obtained from the GC–NPD analysis. Linear regression analysis was used to determine the correlation coefficient ( $r^2$ ) for each pesticide. The LOD and LOQ were determined using the signal-to-noise (S/N) ratio method. Analytical solutions containing a mixture of the five pesticides were prepared and analyzed in decreasing concentrations until the peak signal reached

approximately three times the noise level ( $S/N = 3$ ) for LOD determination, and ten times the noise level ( $S/N = 10$ ) for LOQ. Each level was analyzed in triplicate. The calculated relative standard deviation (RSD) values, used to evaluate method precision, were based on peak area measurements for each analyte at different concentration levels.

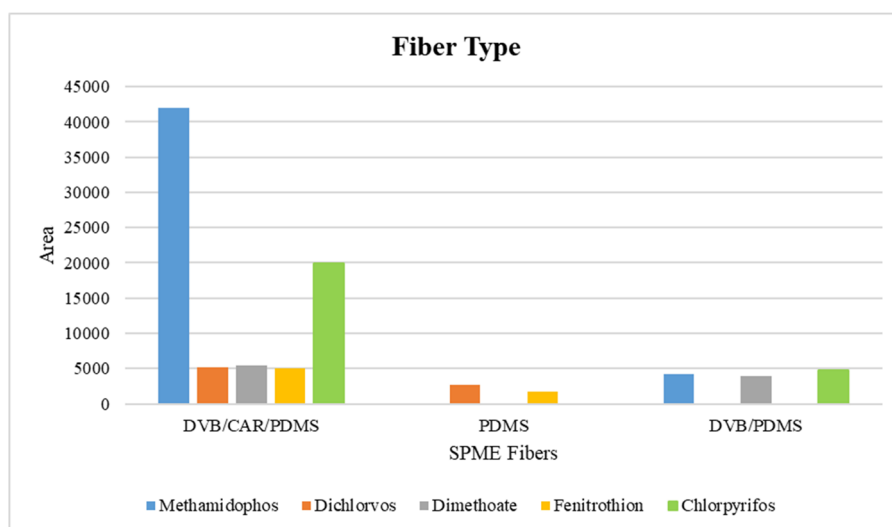
## Results and discussion

The optimized solid-phase microextraction (SPME) method applied through headspace (HS-SPME) was successfully coupled with gas chromatography using a nitrogen-phosphorus detector (GC-NPD) to determine the selected organophosphate pesticides. **Figure 1** shows a representative chromatogram of the extracted analytes under the optimized conditions. All five target compounds were successfully detected within a retention time window of 6 to 13 minutes using the previously described chromatographic program. By order of elution, the more polar and lower molecular weight organophosphates, i.e., methamidophos and dichlorvos, appeared first. These compounds are characterized by their high polarity and the presence of electron-rich atoms, which result in weak interactions with the non-polar stationary phase of the column. Dimethoate, which has a moderately higher molecular weight and slightly lower polarity, eluted next. Finally, fenitrothion and chlorpyrifos, the largest and least polar molecules among the set, exhibited longer retention times due to their greater affinity with the non-polar stationary phase. These retention behaviors are consistent with previous studies, such as that of **Huba *et al.*** (2018), who compared different fiber coatings (DVB/PDMS, CarbonWR/PDMS, and polyacrylate) for the extraction of a mixture of pesticides and other emerging contaminants. Their findings reinforce the importance of understanding the physicochemical interactions between analytes, fiber coatings, and chromatographic phases to achieve optimal separation and detection efficiency.

The evaluation of pesticide extraction using different fiber types showed that the PDMS fiber extracted only two of the five compounds, while the PDMS/DVB fiber extracted three. In contrast, the DVB/CAR/PDMS fiber enabled the extraction of all five pesticides, although with noticeable differences in peak areas between compounds. This disparity suggests that certain analytes exhibit higher affinity for this fiber, likely due to a better match in polarity and molecular size, while the others are less efficiently retained, as shown in **Figure 2**.



**Figure 1.** Chromatogram obtained by GC – NPD of the pesticide mixture extracted using the HS-SPME technique. Extraction conditions: 20 min, 50°C, 1% NaCl, DVB/CAR/PDMS fiber, and 500 rpm stirring speed



**Figure 2.** Pesticide extraction area using different SPME fibers (DVB/CAR/PDMS, PDMS/DVB, and PDMS) under fixed extraction conditions: 20 min, 50°C, 1% NaCl, and 500 rpm stirring speed

These results support the selection of DVB/CAR/PDMS as the most versatile and efficient fiber for multiresidue organophosphate analysis under the conditions tested. Similar findings were reported by **Liang *et al.*** (2019). The authors demonstrated that different SPME coatings exhibit significant variations in their selectivity and efficiency when applied to wastewater samples containing organophosphates. **Tankiewicz *et al.*** (2013) used a PDMS/polyacrylate (PA) fiber to detect 16 pesticides with varying polarities, achieving detection limits of around 10 µg/L. Their methodology proved to be selective, sensitive, and precise for the simultaneous determination of pesticides from various chemical groups, including organophosphates, in environmental water samples. Moreover, the concentrations detected in real water samples exceeded the limits established by the European Union legislation, indicating a potential environmental risk. The authors emphasized that the procedure was simpler, more economical, and less labor-intensive than conventional methods such as liquid-liquid extraction (LLE) and solid-phase extraction (SPE), positioning SPME as a viable green alternative for multiresidue pesticide analysis using GC systems.

**Harwood *et al.*** (2013) compared different methods for estimating the bioavailable fraction of pyrethroid pesticides in contaminated sediments, including field-deployed and lab-exposed SPME fibers, as well as 24-hour Tenax extraction. Their findings showed that the Tenax method was generally more sensitive and better correlated with benthic invertebrate mortality than SPME fibers, indicating SPME limitations in detecting toxicologically relevant fractions under certain conditions. These results highlight that while SPME is a promising tool for passive sampling, its performance can vary depending on the analyte type and matrix, which reinforces the importance of careful fiber selection (**Tankiewicz *et al.***, 2013; **Harwood *et al.***, 2013; **Liang *et al.***, 2019).

After identifying the optimal fiber, the experimental design allowed for the evaluation of other critical extraction parameters. Regarding stirring speed, we observed that excessively high agitation (700 rpm) reduced extraction efficiency, likely due to turbulence exceeding the analytes' adsorption rate onto the fiber surface. Conversely, insufficient agitation (300 rpm) resulted in poor mass transfer. A moderate speed of 500 rpm was found to be optimal, providing sufficient convection without disrupting analyte-fiber interactions. Similarly, **Silva *et al.*** (2013) observed that moderate agitation enhances extraction by reducing the boundary layer around the fiber, though excessive stirring may risk damaging the coating.

**Table 2** shows a comparison of the areas obtained for fenitrothion and chlorpyrifos, which showed the best response in terms of intensity of the chromatographic area against the evaluation of the different treatment levels in the agitation speed.

In terms of the extraction time, balance was reached at approximately 20 minutes, beyond which no significant signal increase was observed. Longer times even resulted in a slight decline in peak areas, possibly due to analyte desorption or degradation. This behavior is consistent with the observations by **Filho et al.** (2010), who reported that extraction times beyond 30 minutes do not yield statistically significant gains for organophosphate and organochlorine compounds. **Table 3** shows the different working levels of the pesticides fenitrothion and chlorpyrifos and the effect of the extraction time.

Temperature also played a critical role. Increasing the extraction temperature improved analyte transfer to the headspace/fiber due to enhanced diffusion and volatility. However, beyond 50°C, certain analytes began to degrade or volatilize excessively, reducing signal intensity, for which 50°C was selected as the optimal temperature. **Chen et al.** (2017) and **Li et al.** (2016) also noted that high temperatures ( $\geq 60$  °C) can compromise analyte stability during SPME. A comparison of the effect of extraction temperature on the working levels for fenitrothion and chlorpyrifos compounds is shown in **Table 4**.

The addition of salt (NaCl) had a limited but measurable effect. Increasing the ionic strength via salt addition facilitated analyte transfer to the fiber through the salting-out effect. However, concentrations above 1% did not produce significant improvements and, in some cases, reduced repeatability, possibly due to salt precipitation, for which 1% NaCl was chosen as the optimal concentration. This result is supported by **Hassan et al.** (2020) and **Filho et al.** (2010), who found that excessive salt can destabilize certain analytes or impair extraction reproducibility. **Table 5** shows a comparison between the different treatment levels used for the evaluation of the salt effect on fenitrothion and chlorpyrifos compounds.

**Table 2.** Comparison of stirring speed for fenitrothion and chlorpyrifos compounds treated at different working levels

Variables	Levels		
	700	500	300
Stirring speed (rpm)	700	500	300
Fenitrothion (pA)	0.9725	0.5548	1.4409
Chlorpyrifos (pA)	4.7602	6.1951	9.9481

**Table 3.** Comparison of the extraction time for fenitrothion and chlorpyrifos compounds treated at different working levels

Variables	Levels		
	20	30	40
Extraction time (min)	20	30	40
Fenitrothion (pA)	0.8723	0.5548	0.6273
Chlorpyrifos (pA)	9.0316	6.1951	3.2729

**Table 4.** Comparison of the extraction temperature for fenitrothion and chlorpyrifos compounds treated at different working levels

Variables	Levels		
	70	60	50
Extraction temperature (°C)	70	60	50
Fenitrothion (pA)	0.8217	0.9178	1.9178
Chlorpyrifos (pA)	4.6386	12.386	11.0265

**Table 5.** Comparison of the salt effect for fenitrothion and chlorpyrifos compounds treated at different working levels

Variables	Levels		
	1	5	10
Saline effect (%)			
Fenitrothion (pA)	1.0593	1.9178	1.2295
Chlorpyrifos (pA)	11.8032	11.0265	11.9772

The method's performance was confirmed through analytical validation. Calibration curves for each pesticide exhibited good linearity in the 50–500 µg/L range, with correlation coefficients ( $r^2$ ) of up to 0.9892. The calculated limits of detection (LOD) ranged from 1.088 to 3.114 µg/L, while limits of quantification (LOQ) ranged from 3.264 to 9.342 µg/L, indicating high sensitivity and suitability for trace-level detection. These values are notably lower than those reported by Wang *et al.* (2018), who achieved detection in the mg/L range using conventional methods. Comparable performance was reported by Musshoff *et al.* (2002) using SPME-GC for organophosphate detection in blood samples.

Precision was also satisfactory: relative standard deviation (RSD) values ranged from 0.998% to 3.599%, based on peak area measurements, which is well below the generally accepted threshold of 5% for environmental analyses, confirming the method's repeatability. Pellicer-Castell *et al.* (2018) reported similar results using alternative sorbent-based extraction methods, with RSDs under 12%. These findings validate the efficiency and reliability of the optimized SPME-GC-NPD method for simultaneous extraction and detection of multiple organophosphate pesticides. Detailed performance metrics are summarized in Table 6.

**Table 6.** Analytical validation values of organophosphates. Extraction conditions: 20 min, 50°C, 1% NaCl, DVB/CAR/PDMS fiber, and 500 rpm stirring speed

Number	Pesticide	RT	% RSD	LOD (ppb)	LOQ (ppb)	Equation of the line
1	Methamidophos	6.280	3.599	3.114	9.342	$Y = 0.204x + 0.253$
2	Dichlorvos	6.437	2.653	1.198	3.594	$Y = 0.285x + 0.149$
3	Dimethoate	10.552	1.356	2.755	8.265	$Y = 0.189 + 2.128$
4	Fenitrothion	12.065	0.998	1.088	3.264	$Y = 0.162 + 2.029$
5	Chlorpyrifos	12.337	1.371	1.110	3.330	$Y = 0.271 + 0.851$

## Conclusions

Our study successfully developed and optimized a chromatographic method for the extraction and detection of five organophosphate pesticides (chlorpyrifos, dichlorvos, dimethoate, methamidophos, and fenitrothion) in water samples using solid-phase microextraction (SPME) coupled with gas chromatography and nitrogen-phosphorus detection (GC-NPD). The method was validated by establishing essential analytical parameters, including linearity, detection and quantification limits, and precision.

Among the tested SPME fibers, DVB/CAR/PDMS demonstrated a better performance, enabling the extraction of all five target compounds with high peak resolution. Under optimized conditions (20 min extraction at 50°C, 1% NaCl, 500 rpm stirring), the method achieved detection limits ranging from 1.088 to 3.114 µg/L and quantification limits from 3.264 to 9.342 µg/L. Relative standard deviation (RSD) values remained between 0.998% and 3.599%, confirming the precision and repeatability of the method.

These results are consistent with international performance criteria for trace-level pesticide detection in environmental samples. Although our study was conducted using spiked ultrapure water, the optimized methodology demonstrates strong potential for future application in environmental monitoring and regulatory compliance, particularly in agricultural regions where organophosphate use still prevails. Further work is recommended to evaluate the method's performance in real environmental matrices (e.g., surface or wastewater) and to assess matrix effects under field conditions, which would increase its robustness and practical relevance.

## Acknowledgments

To the Ministry of Science for financing (grant 757 of 2016) the training of national doctors and to the Vice Rector Office for Research and Postgraduate Studies at the University of Caldas.

## Author contributions

**JAFL:** Document writing, research and data analysis; **GTO:** Conceptualization document and project management; **JPBA:** Data analysis and document writing

## Funding

Ministry of Science, Technology and Innovation and University of Caldas.

## Conflicts of interest

The authors declare there are no conflicts of interest related to the content of this article.

## References

- Anjos, J. & Andrade, J.** (2014). Determination of nineteen pesticides residues (organophosphates, organochlorine, pyrethroids, carbamate, thiocarbamate and strobilurin) in coconut water by SDME/GC–MS. *Microchemical Journal*, *112*, 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.10.001>
- Betancourt-Arango, J. P., Ossa-Jaramillo, C. A., & Taborda-Ocampo, G.** (2021). 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. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *45*, 1-14. <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1235>
- Betancourt-Arango, J., Patiño-Ospina, A., Fiscal-Ladino, J., Taborda-Ocampo, G.** (2025). Xenovolatilomic profiling of Hass avocado (*Persea americana* Mill.) tissues exposed to endosulfan: identification of potential toxicity biomarkers. *Sustainable Food Technology*, *3*, 1-23. <https://doi.org/10.1039/D5FB00163C>
- Bravo, N., Garí, M., Grimalt, J. O.** (2022). Occupational and residential exposures to organophosphate and pyrethroid pesticides in a rural setting. *Environmental Research*, *214*, 114186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114186>
- Cao, M., Han, Q., Zhang, J., Zhang, R., Wang, J., Gu, W., Kang, W., Lian, K., Ai, L.** (2020). An untargeted and pseudotargeted metabolomic combination approach to identify differential markers to distinguish live from dead pork meat by liquid chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, *1610*, 460553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460553>
- Castro, P. A., Ramos, J. P., Estévez, S. L., Rangel, A.** (2004). Organophosphate pesticide residues in samples of tomato. *Revista de Ingeniería*, *20*, 14-22. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-49932004000200002](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932004000200002)
- Chen, H., Pan, M., Liu, X., Lu, C.** (2017). Evaluation of transfer rates of multiple pesticides from green tea into infusion using water as pressurized liquid extraction solvent and ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Food Chemistry*, *216*, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.175>
- Ciriello, R., Lo Magro, S., Guerrieri, A.** (2018). Assay of serum cholinesterase activity by an amperometric biosensor based on a co-crosslinked choline oxidase/overoxidized polypyrrole bilayer. *Analyst*, *143*(4), 920-929. <https://doi.org/10.1039/C7AN01757J>

- Fabjanowicz, M., Kalinowska, K., Namieśnik, J., Plotka-Wasyłka, J.** (2018). Evaluation of Green Sample Preparation Techniques for Organic Compounds. *Current Green Chemistry*, 5(3), 168-176. <https://doi.org/10.2174/2213346105666181112124629>
- Fernández, D.G., Mancipe, L. C., Fernández, D.C.** (2010). Intoxicación por organofosforados. *Revista MED*, 18(1), 84-92.
- Fernández-de Miguel, S., Serrano-Ayestarán, O., Fernández-Carrión, F., Gómez-de Quero, P., Sánchez-Granados, J. M.** (2009). Intoxicación domiciliar por organofosforados. *Anales de Pediatría*, 71(5), 478-479. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005085.9>
- Filho, A., dos Santos, F. N., Pereira, P. A. de P.** (2010). Development, validation and application of a methodology based on solid-phase micro extraction followed by gas chromatography coupled to mass spectrometry (SPME/GC-MS) for the determination of pesticide residues in mangoes. *Talanta*, 81(1-2), 346-354. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.12.008>
- Gavidia, T., Ditulio, R., Sabala, G., Sequera, J.** (2017). Residuos de plaguicidas organofosforados en suelos del municipio José María Vargas, Táchira-Venezuela. *Aibi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 5, 2-8. <https://doi.org/10.15649/2346030X.411>
- Gervilla-Caño, J., Otal-Bareche, J., Torres-Justribó, M., Durán-Rabés, J.** (2007). Intoxicación por organofosforados. *SEMERGEN - Medicina de Familia*, 33(1), 21-23. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1138-3593\(07\)73839-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1138-3593(07)73839-X)
- Guerrero, J.** (2003). Estudio de residuos de plaguicidas en frutas y hortalizas en áreas específicas de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 21(3), 198-209.
- Harwood, A. D., Landrum, P. F., Weston, D. P., Lydy, M. J.** (2013). Using SPME fibers and Tenax to predict the bioavailability of pyrethroids and chlorpyrifos in field sediments. *Environmental Pollution*, 173, 47-51. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.09.012>
- Hassan, A., Sajid, M., Al Ghaffy, H., Alhooshani, K.** (2020). Ionic liquid-based membrane-protected micro-solid-phase extraction of organochlorine pesticides in environmental water samples. *Microchemical Journal*, 158, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105295>
- Huba, A. K., Mirabelli, M. F., Zenobi, R.** (2018). High-throughput screening of PAHs and polar trace contaminants in water matrices by direct solid-phase microextraction coupled to a dielectric barrier discharge ionization source. *Analytica Chimica Acta*, 1030, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.05.050>
- Jaramillo-Colorado, B. E.** (2016). Residuos de pesticidas organofosforados en frutas obtenidas de plazas de mercado y supermercados en Cartagena, Colombia. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25, 39-46. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/462>
- Li, J.-W., Wang, Y.-L., Yan, S., Li, X.-J., Pan, S.-Y.** (2016). Molecularly imprinted calixarene fiber for solid-phase microextraction of four organophosphorous pesticides in fruits. *Food Chemistry*, 192, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.018>
- Liang, D., Liu, W., Raza, R., Bai, Y., Liu, H.** (2019). Applications of solid-phase micro-extraction with mass spectrometry in pesticide analysis. *Journal of Separation Science*, 42(1), 330-341. <https://doi.org/10.1002/jssc.201800804>
- Mali, H., Shah, C., Raghunandan, B. H., Prajapati, A. S., Patel, D. H., Trivedi, U., Subramanian, R. B.** (2023). Organophosphate pesticides an emerging environmental contaminant: Pollution, toxicity, bioremediation progress, and remaining challenges. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 234-250. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.04.023>
- Milhome, M., Sousa, P., De Keukeleire, D., do Nascimento, R.** (2011). Multiresidue Methods for Determination of Pesticides using SPME and SPE Followed by GC-NPD System: a Comparative Study. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 22, 2048-2055. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532011001100005>
- Mu, R., He, X., Gao, X., Jia, J., Li, J.** (2018). Determination of Malathion Using Corona Discharge – Ion Mobility Spectrometry with Solid-Phase Microextraction. *Analytical Letters*, 51(6), 807-819. <https://doi.org/10.1080/00032719.2017.1362645>
- Murcia, A. M. & Stashenko, E.** (2008). Determinación de plaguicidas organofosforados en vegetales producidos en Colombia. *Agro Sur*, 36, 71-81. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2008.v36n2-03>
- Musshoff, F., Junker, H., Madea, B.** (2002). Simple determination of 22 organophosphorous pesticides in human blood using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography with mass spectrometric detection. *Journal of Chromatographic Science*, 40(1), 29-34. <https://doi.org/10.1093/chromsci/40.1.29>
- Pellicer-Castell, E., Belenguer-Sapiña, C., Amorós, P., El Haskouri, J., Herrero-Martínez, J. M., Mauri-Aucejo, A.** (2018). Study of silica-structured materials as sorbents for organophosphorus pesticides determination in environmental water samples. *Talanta*, 189, 560-567. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.07.044>

- Philippat, C., Barkoski, J., Tancredi, D. J., Elms, B., Barr, D. B., Ozonoff, S., Bennett, D. H., Hertz-Picciotto, I.** (2018). Prenatal exposure to organophosphate pesticides and risk of autism spectrum disorders and other non-typical development at 3 years in a high-risk cohort. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(3), 548-555. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.02.004>
- Quintero, A., Caselles, J., Ettiene, G., de Colmenares, N., Pallares, J.** (2013). Método multiresidual simplificado para la determinación de residuos de plaguicidas organofosforados en vegetales. *Revista de La Facultad de Agronomía de La Universidad Del Zulia*, 30(1 SE-). <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/27107>
- Silva, É. A. S., Lopez-Avila, V., Pawliszyn, J.** (2013). Fast and robust direct immersion solid phase microextraction coupled with gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry method employing a matrix compatible fiber for determination of triazole fungicides in fruits. *Journal of Chromatography. A*, 1313, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2013.07.071>
- Sun, T.-T.** (2004). Excessive trust in authorities and its influence on experimental design. *Nature Reviews. Molecular Cell Biology*, 5(7), 577-581. <https://doi.org/10.1038/nrm1429>
- Tankiewicz, M., Morrison, C., Biziuk, M.** (2013). Multi-residue method for the determination of 16 recently used pesticides from various chemical groups in aqueous samples by using DI-SPME coupled with GC–MS. *Talanta*, 107, 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.12.052>
- Toro-Osorio, B. M., Rojas-Rodríguez, A. E., Díaz-Zapata, J. A.** (2017). Levels of serum cholinesterase in coffee growers from the caldas department, Colombia. *Revista de Salud Publica*, 19(3), 318-324. <https://doi.org/10.15446/rsap.v19n3.52742>
- Tsoukali, H., Theodoridis, G., Raikos, N., Grigoratou, I.** (2005). Solid phase microextraction gas chromatographic analysis of organophosphorus pesticides in biological samples. *Journal of Chromatography B*, 822(1), 194-200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2005.05.035>
- Vievard, J., Amoikon, T. L.-S., Coulibaly, N. A., Devouge-Boyer, C., Arellano-Sánchez, M. G., Aké, M. F. D., Djéni, N. T., Mignot, M.** (2022). Extraction and quantification of pesticides and metals in palm wines by HS-SPME/GC-MS and ICP-AES/MS. *Food Chemistry*, 393, 133352. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133352>
- Wang, P., Luo, M., Liu, D., Zhan, J., Liu, X., Wang, F., Zhou, Z., Wang, P.** (2018). Application of a magnetic graphene nanocomposite for organophosphorus pesticide extraction in environmental water samples. *Journal of Chromatography. A*, 1535, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.01.003>
- Wani, A. A., Dar, A. A., Jan, I., Sofi, K. A., Sofi, J. A., Dar, I. H.** (2019). Method validation and simultaneous quantification of eight organochlorines/organophosphates in apple by gas chromatography. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(7), 3687-3692. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9599>
- Wu, G., Shi, W., Zheng, L., Wang, X., Tan, Z., Xie, E., Zhang, D.** (2024). Impacts of organophosphate pesticide types and concentrations on aquatic bacterial communities and carbon cycling. *Journal of Hazardous Materials*, 475, 134824. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134824>

Original article

## A survey on information geometry: statistical manifolds and statistical models

### Un estudio sobre geometría de la información: variedades estadísticas y modelos estadísticos

Nicolás Martínez-Alba<sup>1</sup>, Olga Garatejo-Escobar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>Ciencias Básicas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

#### Abstract

This survey presents an exposition of the foundational concepts of information geometry from a probabilistic viewpoint, as well as recent developments in differential geometry related to this area of information science. We conclude with a non-exhaustive but motivating list of applications of the theory in probability.

**Keywords:** Fisher metric; Statistical model; Dual connection; Statistical manifold; Exponential family; Mixture family.

#### Resumen

En este estudio se exponen los conceptos fundamentales de la geometría de la información desde una perspectiva probabilística y se presentan los avances recientes en geometría diferencial relacionados con esta área de las ciencias de la información. Concluimos con una lista, no exhaustiva, pero sí motivadora, de aplicaciones de la teoría en probabilidad.

**Palabras clave:** Métrica de Fisher; Modelo estadístico; Conexión dual; Variedad estadística; Familia exponencial; Familia mezcla.

#### Introducción

Information science is a term used to describe the interdisciplinary studies to explore and to analyze information theory and data scenarios (Kolp, Snoeck, Vanderdonck & Wautelet, 2019). These type of studies rely on the interaction of several fields, such as statistical inference, signal processing, machine learning, or neural networks. A fundamental part of this interaction is the role of statistics, with probability theory playing a key part in interpreting data and modeling uncertainty. However, the scope of science information extends beyond statistics, and new developments have emerged in other branches of mathematics. One notable example of this interaction is the so called *geometric science information*. Information geometry is a specialized field within geometry science information that applies concepts from differential geometry to the study of statistical models. Its foundation goes back to the independent works of H. Hotelling (1930) and R. Rao (1945), who proposed a mathematical framework to give a new point of view to families of probability distributions. A central concept in this field is the Fisher information metric, which provides a differentiable structure on the space of probability densities. This metric allows for the exploration of various geometric properties within statistical models, such as distances between probability distributions and their curvature. The Fisher metric is deeply connected to key statistical concepts, including expected value, entropy, and divergence, making it a powerful tool for understanding the geometry of information theory. For a more detailed discussion of this topic, we refer to Nielsen's work on information geometry (Nielsen, 2022) and (Amari & Nagaoka, 2000) comprehensive insights.

**Citation:** Martínez-Alba & Garatejo-Escobar. A survey on information geometry: statistical manifolds and statistical models. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):844-871, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3260>

**Editor:** Santiago Vargas Domínguez

**\*Corresponding autor:**  
Nicolás Martínez-Alba;  
[nmartineza@unal.edu.co](mailto:nmartineza@unal.edu.co)

**Received:** July 19, 2025

**Accepted:** September 12, 2025

**Published on line:** October 9, 2025



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

In the probability setting, the exponential and mixture families are two fundamental statistical concepts that describe two types of probability densities, each with its own statistical and algebraic characteristics. These families gain importance in information geometry, where they not only provide statistical properties but also induce geometric structures, such as dual connections, torsion, geodesics, curvatures, divergences, and symmetric 3-tensors. In this work, we focus our results to dual connection, Amari-Chentsov tensor and divergence functions. *Divergence functions* are generating functions that quantify the distance between two probability distributions, playing a crucial role in understanding of their geometric relations. The notion of *dual structure*, introduced by Amari and Chentsov, builds on the relationship between the exponential and mixture families, where each family is associated with a specific affine connection. This duality allows the analysis of statistical models from two complementary perspectives, providing deeper insights into their geometry. The *Amari-Chentsov tensor* together with divergences, offers a comprehensive framework for studying both, the statistical and geometric, properties of probability distributions, bridging the gap between statistical inference and geometry. The relationship between divergence, dual structure, and the Amari-Chentsov tensor lies at the heart of information geometry.

The aim of this manuscript is to provide an introduction to the field of information geometry, relating the probabilistic framework with tools from differential geometry. Along the way, several key concepts will be introduced, and some recent applications will be discussed.

**Organization of the paper:** Section geometrical setting, is a brief summary of the explicit description of the Riemannian geometry used in the manuscript, including the main geometric notion of *affine connection* and the special case of *Levi-Civita* connection for Riemannian metrics. Section statistical model and its structure, contains the main notions of the geometry of statistical model, including the Fisher metric, exponential and mixture families and torsion-free dual connections with explicit examples. In section geometric concepts for information geometry, we abstract the notion of statistical model to any Riemannian manifold summarizing classical results. In particular, we present new proofs for already known facts on information geometry (Theorem 0.19 and Theorem 0.26) avoiding the use of Christoffel symbols (which are the usual proofs in the literature) and include key relations between nearly-statistical and dual structures and also solitons in geometry (see Lemma 0.33, Proposition 0.34 and Proposition 0.35). We close this section by giving new results in isostatistical immersion in Proposition 0.37. Section applications deals with some recent applications of the previous geometrical construction on statistical manifolds, in particular we present relation with Bayes' theorem, Monte Carlo method, student  $t$ -distribution, MLE (maximum likelihood estimation) and clustering patterns

## Geometrical setting

Let us begin by presenting some basic concepts of Riemannian manifolds. We refer the reader to (Jost & Jost, 2008) for a more detailed description.

A manifold  $M$  of dimension  $n$  is a connected paracompact Hausdorff space for which every point  $x \in M$  has a neighborhood  $U_x$  that is homeomorphic to an open subset  $\Omega_x$  of  $\mathbb{R}^n$ . Such a homeomorphism  $\phi_x : U_x \rightarrow \Omega_x$  is called a *coordinate chart*. If for two charts the function  $\phi_x \circ \phi_y^{-1} : \Omega_y \rightarrow \Omega_x$  is a  $C^r$ -diffeomorphism we say that the manifold has a  $C^r$ -differentiable structure. The collection  $\{(U_x, \phi_x)\}$  is called *differentiable structure* or *smooth structure* for  $M$ . We denote  $T_x M$  to the vector space which consists of all tangent vectors to curves in  $M$  on the point  $x$ . It is called the *tangent space* of  $M$  at the point  $x$ . The disjoint union of all tangent spaces,  $TM = \sqcup_{x \in M} T_x M$  is known as *tangent bundle* and is also equipped with differentiable structure. In this way, we can construct smooth functions  $X : M \rightarrow TM$  so that  $X(m) \in T_m M$  which are known as *vector fields*, and the space of vector fields (or sections of  $TM$ ) is denoted by  $\Gamma(TM)$ . By construction, tangent vectors (with fixed  $m \in M$ ) can also

be seen as linear function  $X_m : C^\infty(M) \rightarrow \mathbb{R}$  satisfying Leibniz rule, in other words they are derivations of the algebra  $C^\infty(M)$ . When we do not fix points in  $M$ , i.e we have a vector field, we get  $X : C^\infty(M) \rightarrow C^\infty(M)$  linear and satisfying a Leibniz rule, again is a derivation, but in addition we have a natural operation  $[X, Y] := X \circ Y - Y \circ X$ , named *Lie bracket*.

A *Riemannian metric* on a differentiable manifold  $M$  is given by an inner product  $g$  on each tangent space  $T_x M$  which depends smoothly on the base point  $x$ . A *Riemannian manifold* is a differentiable manifold equipped with a Riemannian metric. In any system of local coordinates  $(x_1, \dots, x_n)$  from coordinates charts, the Riemannian metric is represented by a positive definite, symmetric matrix  $(g_{ij}(x))_{1 \leq i, j \leq n}$  where the coefficients depend smoothly on  $x$ .

Let  $\gamma : [a, b] \rightarrow M$  be a smooth curve. The length of  $\gamma$  is defined as:

$$L(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt,$$

where the norm of the tangent vector  $\gamma'$  is given by the Riemannian metric as  $\|\gamma'(t)\|^2 = g_{\gamma(t)}(\gamma'(t), \gamma'(t))$ . This value is invariant under re-parametrization of the curve. Taking the infimum of the values  $L(\gamma)$  among all the curves  $\gamma$  joining two points  $p, q \in M$  we can define a distance function on  $M$  and the topology of this distance coincides with the topology of the manifold structure of  $M$ .

The metric tensor  $g$  also allows us to define a natural differential operation on vector fields that extends the notion of directional derivatives in the Euclidean case. This is known as *Levi-Civita connection*  $\nabla^{(0)} : \Gamma(TM) \times \Gamma(TM) \rightarrow \Gamma(TM)$  that is  $\mathbb{R}$ -bilinear but for the algebra of  $C^\infty(M)$  it is tensorial in the first variable and satisfies Leibniz rule for the second variable, i.e.,

$$\nabla_{fX}^{(0)} Y = f \nabla_X^{(0)} Y \text{ and } \nabla_X^{(0)} fY = (Xf)Y + f \nabla_X^{(0)} Y,$$

where  $f \in C^\infty(M)$ . A fundamental theorem of Riemannian geometry states that this is the *unique* connection that is torsion free and metric, that is:

$$\nabla_X^{(0)} Y - \nabla_Y^{(0)} X = [X, Y] \quad \text{and} \quad Zg(X, Y) = g(\nabla_Z^{(0)} X, Y) + g(X, \nabla_Z^{(0)} Y),$$

for any three vector fields  $X, Y, Z$  in  $M$ , and  $[\cdot, \cdot]$  is the commutator of vector fields as first-order differential operator, i.e.,  $[X, Y] = X \circ Y - Y \circ X$ .

**Remark 0.1.** *Levi-civita connection is a particular class of affine connection over a manifold  $M$ . An affine connection is a  $\mathbb{R}$ -linear map  $\nabla : \Gamma(TM) \times \Gamma(TM) \rightarrow \Gamma(TM)$  so that for all smooth function  $f$  and any pair of vector field  $X, Y$  it holds:*

$$\nabla_{fX} Y = f \nabla_X Y \text{ and } \nabla_X fY = (Xf)Y + f \nabla_X Y. \quad (1)$$

*Affine connections are the natural extension of directional derivative when we change the metric on the configuration space. This structure can also be extended to any vector bundle in order to define a right notion of directional derivative. In addition, this is the geometric notion suitable to define the curvature (as Riemann tensor and scalar curvature) that are also used in the Einstein field equation in cosmology*

$$R(X, Y) = \nabla_X \nabla_Y - \nabla_Y \nabla_X - \nabla_{[X, Y]}$$

$$R_s(X, Y) = \frac{g(R(X, Y)Y, X)}{g(X, X)g(Y, Y) - g(X, Y)^2},$$

This operation also can be used for the tangent of a curve (also interpreted as the vector field along a curve) and gives us the following situation: given a smooth curve  $\gamma : (a, b) \rightarrow M$ ,

the curve is called *geodesic* if it satisfies  $\nabla_{\gamma'}\gamma' = 0$ . In a local coordinates  $(x_1, \dots, x_m)$ , the geodesics can be written for each  $i = 1, \dots, m$  as the second-order ODE:

$$x_i''(t) + \sum_{j,k} \Gamma_{jk}^i(\gamma(t))x_j'(t)x_k'(t) = 0,$$

where the functions  $\Gamma_{jk}^i$  are known as the *Christoffel symbols* of  $\nabla$ .

**Theorem 0.2.** (*Jost & Jost, 2008, Theorem 1.4.2*) *Let  $M$  be a Riemannian manifold,  $x \in M$  and  $v \in T_xM$ . Then there exist  $\varepsilon > 0$  and precisely one geodesic  $c : [0, \varepsilon] \rightarrow M$  with  $c(0) = x, c'(0) = v$ . In addition,  $c$  depends smoothly on  $x$  and  $v$ .*

## Statistical model and its structure

The purpose of this section is to define the statistical model and its structure, based on differential manifolds whose points are probability distributions. First, we construct manifolds as finite sets of signed measurements, which statistically correspond to the sample space of any particular event. Second, we define the Fisher metric on tangent vectors of the manifold as an inner product. Considering the above, we define a statistical model and special classes of families to study its geometric structure. For more details, associated concepts, and application we refer to (*Amari & Nagaoka, 2000*) and (*Ay, Jost, Vân Lê, & Schwachhöfer, 2017*) and reference therein.

### 0.1 Finite sample space

From a particular geometrical perspective (*Ay et al., 2017*), we will determine the probability space for finite sample spaces, i.e.,  $\Omega = I$  where  $I = \{1, 2, \dots, n\}$ . From linear algebra, it is known that  $S(I)$  is a vector space (as the space of real-valued function from  $I$ , and with dual space  $S(I)^*$ ), that can be identified with the linear forms  $\mu : S(I)^* \rightarrow \mathbb{R}$ , which in canonical dual basis  $\{\delta^1, \dots, \delta^n\}$ , is written as:

$$\mu = \sum_{i \in I} \mu_i \delta^i, \tag{2}$$

where each element  $\delta^i$  is the dual covector, that is  $\delta^i(j) = \delta_{ij}$ . Indeed, the election of this basis allows us to define the identification (as smooth manifold)  $\psi : S(I) \rightarrow \mathbb{R}^n$  by the coordinate map:

$$\psi(\mu) = \psi\left(\sum_{i \in I} \mu_i \delta^i\right) = (\mu_1, \dots, \mu_n). \tag{3}$$

In other words, this is the coordinate function of  $S(I)$  which endows a differentiable structure for  $S(I)$  with local model  $\mathbb{R}^n$ .

A first goal is to endow with a geometry the space of probability. Let us begin with the open submanifold  $\mathcal{M}(I)$  of  $S(I)$ , as the *positive measures* on  $I$ :

$$\mathcal{M}_+(I) := \{\mu \in S(I) : \mu_i > 0, \forall i \in I\}, \tag{4}$$

whose topological closure is given by the *non-negative measures*:

$$\mathcal{M}(I) := \{\mu \in S(I) : \mu_i \geq 0, \forall i \in I\}, \tag{5}$$

as *manifold with corners*. Now consider the map  $\phi : S(I) \rightarrow \mathbb{R}$  (defined by  $\phi(\mu) = \sum_{i=1}^n \mu_i$ ), from the regular value theorem we get the submanifold

$$\mathcal{P}_+(I) := \mathcal{M}_+(I) \cap \phi^{-1}(1) = \{\mu \in \mathcal{P}(I) : \mu_i > 0, \forall i \in I, \sum_{i \in I} \mu_i = 1\}, \tag{6}$$

as level set on the open submanifold  $\mathcal{M}_+(I)$ . And also, we have the closure of  $\mathcal{P}_+(I)$ , as:

$$\mathcal{P}(I) := \{\mu \in \mathcal{M}(I) : \mu_i \geq 0, \forall i \in I, \sum_{i \in I} \mu_i = 1\}. \tag{7}$$

It worth to mention that, as  $\phi^{-1}(1)$  is a level set, then  $\mathcal{P}_+(I)$  decrease in 1 the dimension of  $\mathcal{M}_+(I)$ .

**Example 0.3.** For the set of natural numbers  $I = \{1, \dots, n, n + 1\}$  let us consider:

$$U := \{x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n : x_i > 0, \forall i \in I, \sum_{i=1}^n x_i < 1\}, \tag{8}$$

and the application  $\varphi(x) : U \rightarrow \mathcal{P}_+(I)$ , by:

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n x_i \delta^i + (1 - \sum_{i=1}^n x_i) \delta^{n+1}, \tag{9}$$

that defines the smooth structure for  $\mathcal{P}_+(I)$ , and gives us explicit coordinates system.  $\diamond$

### 0.2 Fisher metric and statistical model

We want to introduce an inner product that considers the point-wise data in  $\mathcal{M}_+(I)$ . This idea will be promoted to a metric on the whole manifold  $\mathcal{M}_+(I)$ . For this, we will begin with an inner product that will depend on each element  $\mu$  of the set of positive measures on  $I$ . Let us fix  $\mu \in \mathcal{M}_+(I)$  and define the inner product  $\langle \cdot, \cdot \rangle_\mu$  on  $S(I)^*$  as follows:

$$\langle f, g \rangle_\mu = \mu \cdot (fg) = \sum_{i=1}^n \mu_i f_i g_i \tag{10}$$

for any  $f, g \in S(I)^*$ .

It is well known that  $S(I)$  and  $S(I)^*$  are canonical isomorphic, but we also can obtain a family of isomorphisms parametrized by  $\mathcal{M}_+(I)$ . Just note that when consider the basis  $\{e_i\}$  and  $\{\delta^i\}$  on  $S(I)^*$  and  $S(I)$  respectively, the element  $\mu \in \mathcal{M}_+(I)$  (with representation  $\mu = \sum_{i \in I} \mu_i \delta^i$ ) induces an isomorphism between  $S(I)$  and  $S(I)^*$  by  $\frac{da}{d\mu} := \sum_{i \in I} \frac{a_i}{\mu_i} e_i$  in  $S(I)^*$ . Thus, we rewrite the relation (10) in  $S(I)$  by:

$$\langle a, b \rangle_\mu = \left\langle \frac{da}{d\mu}, \frac{db}{d\mu} \right\rangle_\mu = \sum_i \frac{1}{\mu_i} a_i b_i \tag{11}$$

with  $a, b \in S(I)$ .

In order to promote the inner product (11) to a Riemannian metric on  $\mathcal{M}_+(I)$  we first define its tangent space. It is a straightforward computation to verify that tangent space of a vector space (seen as a manifold) is again the same vector space. In our scenario, we get the following:

$$T_\mu S(I) \cong \{\mu\} \times S(I), \quad \text{and} \quad T_\mu \mathcal{M}_+(I) \cong \{\mu\} \times S(I). \tag{12}$$

**Definition 0.4.** (Ay et al., 2017, Definition 2.1) **The Fisher metric** (or metric tensor  $\mathbf{g}$ ) on  $\mathcal{M}_+(I)$  is defined on each  $\mu \in \mathcal{M}_+(I)$  by  $\mathbf{g}_\mu : T_\mu \mathcal{M}_+(I) \times T_\mu \mathcal{M}_+(I) \rightarrow \mathbb{R}$  such that, for two tangent vectors  $A \sim (\mu, a), B \sim (\mu, b) \in T_\mu \mathcal{M}_+(I)$

$$\mathbf{g}_\mu(A, B) := \langle a, b \rangle_\mu. \tag{13}$$

A **statistical model** for a  $n$ -dimensional manifold  $M$  is a pair  $(g, p)$ , with  $g$  a Riemannian metric in  $M$  and an embedding  $p : M \hookrightarrow \mathcal{M}_+(I)$  ( $\xi \in M \mapsto p(\xi) = \sum_{i \in I} p_i(\xi) \delta^i$ ), such that the pull-back of the Fisher metric coincides with  $g$ , i.e. for  $X, Y \in T_\xi M$

$$g_\xi(X, Y) = \mathbf{g}_{p(\xi)}(dp_\xi X, dp_\xi Y). \tag{14}$$

The main example of statistical model is the space  $M = \mathcal{P}_+(I)$  with the natural embedding on  $\mathcal{M}_+(I)$ .

In particular, if this manifold is composed of points of probability, it gives rise in statistics to Fisher information matrix. To illustrate the above, we take the manifold  $\mathcal{P}_+(I)$  of example 0.3, obtaining the respective information matrix associated with Fisher metric:

**Example 0.5.** Consider the coordinate system  $\theta$  of  $\mathcal{P}_+(I)$ . The coefficients of the information matrix associated with Fisher's metric are given by:

$$g_{ij}(\mu) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu_k} \delta_{ki} \delta_{kj} + \frac{1}{\mu_{n+1}} = \begin{cases} \frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_{n+1}} & \text{si } i=j \\ \frac{1}{\mu_{n+1}} & \text{in another case} \end{cases} \quad (15)$$

Explicitly we have:

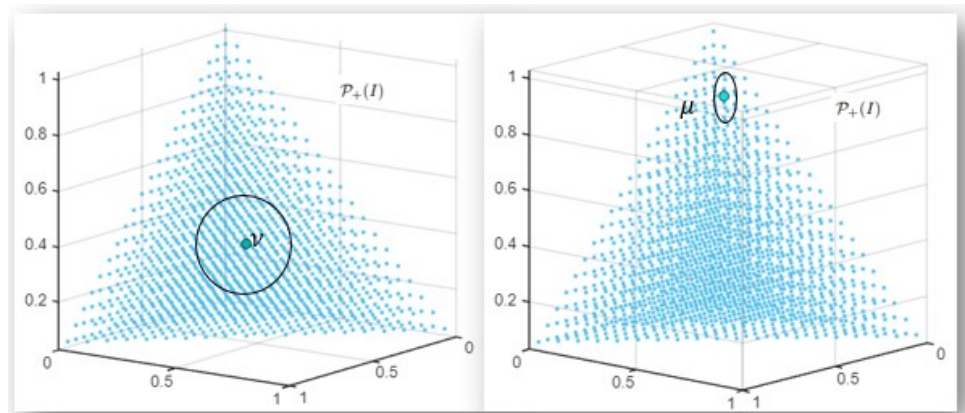
$$G(\mu) := (g_{ij}(\mu)) = \frac{1}{\mu_{n+1}} \begin{pmatrix} \frac{\mu_{n+1}}{\mu_1} + 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \frac{\mu_{n+1}}{\mu_2} + 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & \frac{\mu_{n+1}}{\mu_n} + 1 \end{pmatrix}$$

The inverse matrix of  $G(\mu)$  is the probability covariance matrix of  $\mu$ , each element  $i \in \{1, \dots, n\}$  has a probability  $\mu_i$ , the coefficients are:

$$g^{ij}(\mu) = \begin{cases} \mu_i(1 - \mu_i) & \text{si } i=j \\ -\mu_i\mu_j & \text{in another case} \end{cases}$$

In statistics, the diagonal of the matrix  $G^{-1}(\mu)$ , are the values of the variances of the variables and the remaining coefficients give the value of the correlation between the variables. In fact, this is the statistical origin of the Fisher metric as a covariance matrix (Rao, 1992).◊

**Example 0.6.** In the case of  $I = \{1, 2\}$ , the space  $\mathcal{P}_+(I)$  is the positive part of the plane  $x + y + z = 1$ . For convenience of the reader, we choose two points  $\nu = (1/3, 1/3, 1/3)$  and  $\mu = (0.12, 0.08, 0.80)$  for which the Figure 1. shows the centered balls (for the Fisher metric) with the same radii in  $\mathcal{P}_+(I)$ .



**Figure 1.** Balls in Fisher metric centered at  $\nu$  and  $\mu$  with same radii.

It is worth to note that the meaning of the size of the ball is the quantity of information at each point. To clarify this claim, note that the third coordinate in  $\mu$  is close to 1, the other

two coordinates must be closed to 0, but for  $\nu$  this data is homogeneous. For this reason the ball centered at  $\mu$  will have more restriction than the one centered at  $\nu$ , i.e, we get more information on  $\mu$ .  $\diamond$

In order to find the expression of  $g$ , it is sufficient to take the canonical directions of tangent  $X = \frac{\partial p_i}{\partial \xi_l}, Y = \frac{\partial p_i}{\partial \xi_j}$  in  $\mathcal{M}_+(I)$ , to obtain:

$$g_\xi(X, Y) = \sum_{i \in I} \frac{1}{p_i(\xi)} \frac{\partial p_i}{\partial \xi_l}(\xi) \frac{\partial p_i}{\partial \xi_j}(\xi).$$

Now, applying the logarithmic derivative the Fisher metric is rewritten as:

$$g_\xi(X, Y) = \sum_{i \in I} p_i(\xi) \frac{\partial \log p_i}{\partial \xi_l}(\xi) \frac{\partial \log p_i}{\partial \xi_j}(\xi).$$

This representation of the Fisher metric is more familiar in the standard treatment of information geometry, using the definition of expected value:

$$g_\xi(X, Y) := E\left[\frac{\partial \log p_i}{\partial \xi_l}(\xi) \frac{\partial \log p_i}{\partial \xi_j}(\xi)\right] \tag{16}$$

Using again the notion of logarithmic derivative but on the statistical model  $\mathcal{P}_+(I)$ , we obtain:

$$\sum_{i \in I} p_i \frac{\partial \log p_i}{\partial \xi_l} = \sum_{i \in I} \frac{\partial p_i}{\partial \xi_l} = \frac{\partial}{\partial \xi_l} \sum_{i \in I} p_i = \frac{\partial}{\partial \xi_l} 1 = 0,$$

which implies

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial}{\partial \xi_l} E\left[\frac{\partial}{\partial \xi_j} \log p_i\right] = \sum_i \frac{\partial}{\partial \xi_l} \left(p_i \frac{\partial}{\partial \xi_j} \log p_i\right) = \sum_i \left(\frac{\partial}{\partial \xi_l} p_i\right) \frac{\partial}{\partial \xi_j} \log p_i + \left(p_i \frac{\partial}{\partial \xi_l} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \log p_i\right) \\ &= \sum_i \left(p_i \frac{\partial \log p_i}{\partial \xi_l}\right) \frac{\partial \log p_i}{\partial \xi_j} + \left(p_i \frac{\partial}{\partial \xi_l} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \log p_i\right) = g_\xi(X, Y) + \sum_i \left(p_i \frac{\partial}{\partial \xi_l} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \log p_i\right) \end{aligned}$$

Finally, this yields another equivalent way to define the Fisher metric on  $\mathcal{P}_+(I)$ :

$$g_\xi(X, Y) := -E\left[\frac{\partial^2 \log p_i}{\partial \xi_l \partial \xi_j}(\xi)\right]. \tag{17}$$

**Remark 0.7.** Everything that has been done so far with finite  $I$  can be extended in a similar way to measurable spaces equipped with probability measures, where  $I$  is not necessarily finite but is endowed with a  $\sigma$ -algebra and forms a measurable space. A more detailed treatment of this theory can be found in reference (Ay et al., 2017, Section 3.2.1), however we will give a brief introduction to an equivalent way to tackle this situation in Section 0.3.

In the following example, we consider a space of distributions parameterized by two terms, where we change the finite sum by integration in the definition of the Fisher metric:

**Example 0.8.** Consider the normal distribution  $x$  as real random variable with  $\xi = (\mu, \sigma)$  where the parameters are the mean  $\mu$  and the standard deviation  $\sigma$ , that is:

$$\mathcal{N}(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \tag{18}$$

In order to apply the formulae for the Fisher metric (20) in this case with, we should note that

$$\ln \mathcal{N}(x; \mu, \sigma) = -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} - \frac{1}{2} \ln(2\pi\sigma^2).$$

When we take partial derivatives and integration with respect to the distribution we obtain

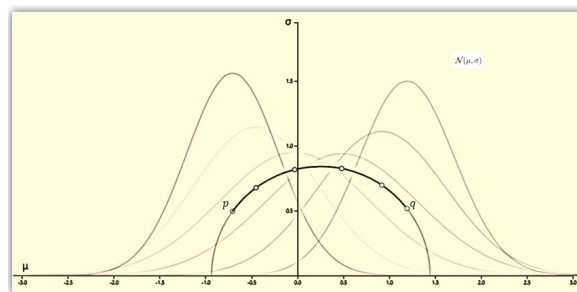
$$g_{(\mu, \sigma)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma^2} & 0 \\ 0 & \frac{2}{\sigma^2} \end{pmatrix}. \tag{19}$$

For a detailed computation for this metric, we refer to (Garatejo Escobar, 2024, section 1.3).  $\diamond$

Note that, the previous example says that the statistical model for normal distribution identifies *isometrically* with the hyperbolic space:

$$(H := \{(\mu, \sigma) : \mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0\}, \frac{d\mu^2 + 2d\sigma^2}{\sigma^2}).$$

A remarkable geometrical consequence of this identification lies in the distance-minimizing curves in this geometry. Although, in the usual euclidean space the minimizing distance between two normal distributions is a segment of a line in the plane, the Fisher metric is not. Indeed, a geodesic is a section of a semicircle because these are the geodesic in the hyperbolic plane, as shown in Figure 2:



**Figura 2.** Shortest path between the normal distributions  $p = \mathcal{N}(-0.75, 0.5)$  and  $q = \mathcal{N}(1.25, 0.5)$  in the Fisher metric .

### 0.3 Statistical models: another way to understand them

For this brief section, we will adopt the introduction given in (Amari & Nagaoka, 2000) for the space of probability distribution and its adaptation to finite positive measures. This approach has the advantage that it it also works on non-finite sample space.

Let us begin with a  $\sigma$ -algebra on a manifold  $\Omega$  and  $\mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  as the space of finite positive measures on  $\Omega$  parametrized by an open set  $\Theta \subset \mathbb{R}^N$ . Indeed, we will assume that the parametrization  $p(x, \cdot)$  of finite positive measure on  $\Omega$  can be identified with a point in  $\Theta$  in such a way that the assignment  $x \mapsto p(x, \cdot)$  is smooth. In this case, the space of probability measures can be seen as  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta) := \{\mu \in \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta) : \int_{\Omega} \mu = 1\}$  which is a 1 corank submanifold of  $\mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$ . In the space  $\mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$ , we define the **Fisher** metric tensor as

$$g_{\xi}(X, Y) = \int_{\Omega} p(\cdot, \xi) X(\log p(\cdot, \xi)) Y(\partial \log p(\cdot, \xi)),$$

for each pair of tangent vectors  $X, Y$  at  $\xi \in \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  where are seen as derivation of real functions.

An again, we can use the definition 0.4 for a statistical model  $p : M \hookrightarrow \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  for a  $n$ -dimensional manifold  $M$ .

**Example 0.9.** *By a similar computation as in equation (16), but for the general case of  $M = \mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$  with the natural embedding, the Fisher metric takes the following form*

$$g_\xi(X, Y) := -E\left[\frac{\partial^2 \log p_i}{\partial \xi_i \partial \xi_j}(\xi)\right]. \tag{20}$$

◇

**Example 0.10.** *The following examples show some specific probability distributions in terms of statistical model, for which there is possible to use (20) to compute the Fisher metric.*

- *Normal Distribution:  $x \in \mathbb{R}, \Theta = \{(\mu_1, \mu_2) \mid -\infty < \mu_1 < \infty, 0 < \mu_2 < \infty\}$*

$$p(x; \Theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu_2}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\mu_2}\right] \tag{21}$$

*The matrix associated with the Fisher metric is Garatejo Escobar, 2024, section 1.3:*

$$G(\mu_1, \mu_2) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu_2^2} & 0 \\ 0 & \frac{2}{\mu_2^2} \end{pmatrix}. \tag{22}$$

- *Multivariate Normal Distribution:  $x \in \mathbb{R}^k$ , with  $k > 1, \Theta = \{(\mu, \bar{\mu}) \mid \mu \in \mathbb{R}^k, \bar{\mu} \in \mathbb{R}^{k \times k} : \text{positive definite}\}$*

$$p(x; \Theta) = (2\pi)^{-\frac{k}{2}} (\det(\bar{\mu}))^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - \mu)^t \bar{\mu}^{-1} (x - \mu)\right\}$$

◇

#### 0.4 Cramer-Rao inequality

The Cramér–Rao theorem is a fundamental result in statistical estimation theory that provides a lower bound on the variance of unbiased estimators. Specifically, it states that under regularity conditions, the variance of any unbiased estimator of a parameter cannot be smaller than the reciprocal of the Fisher information. An estimator is a map:  $\hat{\xi} : \Omega \rightarrow \Theta$ , that associates to every data  $x \in \Omega$  a probability distribution. We say that  $\hat{\xi}$  is an *unbiased estimator* if:  $E_\xi[\hat{\xi}(x)] = \xi$  for  $\forall \xi \in \Theta$ .

The mean squared error of an unbiased estimator  $\hat{\xi}$  may be expressed as the *variance-covariance matrix*  $V_\xi[\hat{\xi}] = [v_\xi^{ij}]$  where:

$$v_\xi^{ij} := E_\xi[(\hat{\xi}^i(x) - \xi^i)(\hat{\xi}^j(x) - \xi^j)]$$

**Theorem 0.11** (Cramér-Rao inequality). *(Amari & Nagaoka, 2000, Theorem 2.2) The variance-covariance matrix  $V_\xi[\hat{\xi}]$  of an unbiased estimator  $\hat{\xi}$  satisfies*

$$V_\xi[\hat{\xi}] \geq g_\xi^{-1} \tag{23}$$

*in the sense that  $V_\xi[\hat{\xi}] - g_\xi^{-1}$  is positive semidefinite.*

An unbiased estimator  $\hat{\xi}$  that achieves the equality  $V_\xi[\hat{\xi}] = g_\xi^{-1}$  for all  $\xi$  is called an **efficient estimator**.

◇

*Exponential and mixture families in geometry*

In probability and statistics, exponential families and mixture families are two fundamental classes of probability distributions with rich geometric and statistical structures. Exponential families are important because they admit efficient statistical inference, possess conjugate priors in Bayesian analysis. In contrast, mixture families arise when distributions are combined using convex combinations. Together, exponential and mixture families provide the core of information geometry in the form of *dually flat geometry* enabling a deep geometric understanding of statistical models and inference.

**Definition 0.12.** (Ay et al., 2017, Definition 3.1) An **exponential family** is a family of probability distributions  $p(\cdot; \vartheta)$  with embedding  $p : M \hookrightarrow \mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$ , of the form:

$$p(x; \vartheta) = \exp[\gamma(x) + \sum_{i=1}^n f_i(x) \vartheta^i - \psi(\vartheta)], \tag{24}$$

where,  $x$  is a real random variable,  $\vartheta = (\vartheta^1, \dots, \vartheta^n)$  is a  $n$ -dimensional parameter with function  $\gamma(x), f_1(x), \dots, f_n(x)$  and  $\psi(\vartheta)$ , under the normalized condition  $\int_M p(x; \vartheta) dx = 1$ .

From the defining relation (24) of exponential family, we have  $\log p(x; \vartheta) = \gamma(x) + \sum_{i=1}^n f_i(x) \vartheta^i - \psi(\vartheta)$ , which gives us:

$$\frac{\partial^2 \log p(x; \vartheta)}{\partial \vartheta^i \partial \vartheta^j} = -\frac{\partial^2}{\partial \vartheta^i \partial \vartheta^j} \psi(\vartheta).$$

As the right hand side is independent of the variable  $x$ , we get that:

$$-\int_M \frac{\partial^2 \log p(x; \vartheta)}{\partial \vartheta^i \partial \vartheta^j} p(x; \vartheta) dx = \frac{\partial^2}{\partial \vartheta^i \partial \vartheta^j} \psi(\vartheta) \int_M p(x; \vartheta) dx,$$

which finally gives us an equivalent version of (20) as:

$$g_{ij}(p) = -E \left[ \frac{\partial^2 \log p(x; \vartheta)}{\partial \vartheta^i \partial \vartheta^j} \right] = \frac{\partial^2}{\partial \vartheta^i \partial \vartheta^j} \psi(\vartheta), \tag{25}$$

thus, the function  $\psi(\vartheta) = \log \int \exp[\gamma(x) + \sum_{i=1}^n f_i(x) \vartheta^i] dx$  allows us to give an explicit expression for the components of the information matrix associated to the Fisher metric. Therefore, the exponential family is a statistical model whose Fisher metric is defined by the coefficients in (25). The example 0.8 can be revisited in terms of the exponential family as follows:

**Example 0.13.** Rewriting the expression (18), we get:

$$\mathcal{N}(x; \mu, \sigma^2) = \exp(\ln(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}})) \exp(-\frac{x^2 - 2\mu x + \mu^2}{2\sigma^2}) = \exp(\frac{\mu x}{\sigma^2} - \frac{x^2}{2\sigma^2} - \frac{\mu^2}{2\sigma^2} - \ln(\sqrt{2\pi\sigma^2})),$$

and use a new inner product to obtain

$$\mathcal{N}(x; \mu, \sigma^2) = \exp((x, x^2) \cdot (\frac{\mu}{\sigma^2}, -\frac{1}{2\sigma^2}) - \frac{\mu^2}{2\sigma^2} - \frac{1}{2} \ln(2\pi\sigma^2)), \tag{26}$$

expressed in new variables with the following change of variables  $\vartheta^1 = \frac{\mu}{\sigma^2}$  and  $\vartheta^2 = -\frac{1}{2\sigma^2}$ . The normal distribution takes the form (24) with parameters  $\vartheta = (\vartheta^1, \vartheta^2)$  and we note that  $\frac{\mu^2}{2\sigma^2} = -\frac{(\vartheta^1)^2}{4\vartheta^2}$  y  $\sigma^2 = -\frac{1}{2\vartheta^2}$ , which directly implies that:

$$\mathcal{N}(x; \vartheta^I, \vartheta^2) = \exp\left((x, x^2) \cdot (\vartheta^I, \vartheta^2) - \left(-\frac{(\vartheta^I)^2}{4\vartheta^2} + \frac{1}{2} \ln(\pi) - \frac{1}{2} \ln(-\vartheta^2)\right)\right),$$

where the function  $\psi(\vartheta)$  is:

$$\psi(\vartheta) = -\frac{(\vartheta^I)^2}{4\vartheta^2} + \frac{1}{2} \ln(\pi) - \frac{1}{2} \ln(-\vartheta^2).$$

According to (25), the components of the Fisher information matrix for the exponential family are calculated with the second partial derivatives in each parameter of  $\psi(\vartheta)$  yielding again (19).  $\diamond$

**Definition 0.14.** (Ay et al., 2017, section 4.2) An **mixture family** is a family of probability distributions  $p(\cdot; \eta)$  with embedding  $p : M \hookrightarrow \mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$ , of the form:

$$p(x; \eta) = c(x) + \sum_{i=1}^d h^i(x) \eta_i, \tag{27}$$

where  $x$  is a real random variable,  $\eta = \eta_1, \dots, \eta_d$  is a parameter  $d$ -dimensional,  $c(x)$  y  $h^1(x), \dots, h^d(x)$  are integrable functions under normalization property  $\int_M c(x) dx = 1$  and  $\int_M h^i(x) dx = 0$

From the expression (27) we have  $\frac{\partial^2}{\partial \eta_i \partial \eta_j} \log p(x; \eta) = -\frac{h^i(x)h^j(x)}{[p(x; \eta)]^2}$ , which yields (cf. (Nielsen, 2020, expression (94))):

$$g_{ij}(p) = \int_M \frac{h^i(x)h^j(x)}{p(x; \eta)} dx, \tag{28}$$

which corresponds to the coefficients of the matrix associated with the Fisher metric.

An example of probability distribution grouped in this family, is the collection of probability functions for a finite sample, as was presented in the example 0.3 and coefficients in (15).

### 0.5 Geometric notions associated to exponential and mixture families

Once we fix these two families, we proceed to obtain more geometrical data. One of the possible geometrical notions, we can apply is the *parallel transport*. This construction is based on the exposition in (Ay et al., 2017, section 2.4). Let  $\mu$  and  $\nu$  be two points in  $\mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$ , and  $A \sim (\mu, a)$  in  $T_\mu \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  a tangent vector. Denote  $\Pi_{\mu, \nu}^{(e)}$  as a parallel transport in  $T \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  with coordinate system  $(e)$ , given by:

$$\begin{aligned} \Pi_{\mu, \nu}^{(e)} : T_\mu \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta) &\longrightarrow T_\nu \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta) \\ a \mapsto (\nu, (\tilde{\phi}_\nu^{-1} \circ \tilde{\phi}_\mu)(a)) &= \sum_i v_i \frac{a_i}{\mu_i} \delta^i. \end{aligned} \tag{29}$$

Denote  $\Pi_{\mu, \nu}^{(m)}$  as a parallel transport in  $T \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  with coordinate system  $(m)$ , given by:

$$\begin{aligned} \Pi_{\mu, \nu}^{(m)} : T_\mu \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta) &\longrightarrow T_\nu \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta) \\ a \longmapsto \sum_i a_i \delta^i &= a. \end{aligned} \tag{30}$$

The remarkable behavior of metric concerning parallel transport in  $A \sim (\mu, a)$  and  $B \sim (\nu, b)$  is:

$$g_\nu(\Pi_{\mu, \nu}^{(e)} A, \Pi_{\mu, \nu}^{(m)} B) = \sum_i \frac{1}{v_i} (v_i \frac{a_i}{\mu_i}) b_i = \sum_i \frac{1}{\mu_i} a_i b_i = g_\mu(A, B), \tag{31}$$

indicating the invariance of the Fisher metric, for the two parallel transports.

It is a well known fact in differential geometry, that any parallel transport defines an *affine connection* which is the global notion associated to derivations, torsion, curvature, and geodesics. In this case, the parallel transports  $\Pi_{\mu, \nu}^{(e)}$  and  $\Pi_{\mu, \nu}^{(m)}$  will determine two types of affine connections, (Ay et al., 2017, Proposition 2.4) as follows: given a curve  $\gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  with  $\gamma(0) = \mu$  and  $\dot{\gamma}(0) = A$ , we define **affine e-connection**  $\tilde{\nabla}_A^{(e)} B|_\mu$  in  $\mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  as:

$$\tilde{\nabla}_A^{(e)} B|_\mu = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (\Pi_{\gamma(t), \mu}^{(e)} (B_{\gamma(t)}) - B) \in T_\mu \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta),$$

applying (29) on  $B = \sum_i b_{\mu,i} \delta^i$ , we rewrite:

$$\begin{aligned} \tilde{\nabla}_A^{(e)} B|_\mu &= (\mu, \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (\sum_i \mu_i \frac{b_{\gamma(t),i}}{\gamma_i(t)} \delta^i - \sum_i b_{\mu,i} \delta^i)) \\ &= (\mu, \sum_i \mu_i \left\{ \frac{\frac{\partial b_i}{\partial a_\mu}(\mu) \gamma_i(t) - b_{\gamma(t),i} \dot{\gamma}_i(t)}{\gamma^2(t)} \right\}_{t=0} \delta^i), \end{aligned}$$

evaluating at  $t = 0$ , with  $\gamma_i(0) = \mu_i$  y  $\dot{\gamma}_i(0) = a_{\mu,i}$ :

$$\begin{aligned} \tilde{\nabla}_A^{(e)} B|_\mu &= (\mu, \sum_i \mu_i \left\{ \frac{\frac{\partial b_i}{\partial a_\mu}(\mu) \gamma_i(0) - b_{\gamma(0),i} \dot{\gamma}_i(0)}{\gamma^2(0)} \right\} \delta^i) \\ &= (\mu, \sum_i \frac{\partial b_i}{\partial a_\mu}(\mu) \delta^i - \sum_i \frac{1}{\mu_i} b_{\mu,i} a_{\mu,i} \delta^i), \end{aligned}$$

by expressions (2) y (13), we have:

$$\tilde{\nabla}_A^{(e)} B|_\mu = (\mu, \frac{\partial b}{\partial a_\mu}(\mu) - \mu (\frac{da_\mu}{d\mu} \cdot \frac{db_\mu}{d\mu})) = (\mu, \frac{\partial b}{\partial a_\mu}(\mu) - g_\mu(A, B)). \tag{32}$$

Similarly for a curve  $\gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$ ,  $\gamma(0) = \mu$  and  $\dot{\gamma}(0) = A$ , we define **affine m-connection**  $\tilde{\nabla}_A^{(m)} B|_\mu$  as:

$$\tilde{\nabla}_A^{(m)} B|_\mu = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (\Pi_{\gamma(t), \mu}^{(m)} (B_{\gamma(t)}) - B) \in T_\mu \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta),$$

also, by (30) in the previous relation, we get:

$$\tilde{\nabla}_A^{(m)} B|_\mu = (\mu, \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (\sum_i b_{\gamma(t),i} \delta^i - \sum_i b_{\mu,i} \delta^i)) = (\mu, \frac{\partial b}{\partial a_\mu}(\mu)), \tag{33}$$

as we have that the main model for information geometry is the space of probability measures  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$  with the induced Fisher metric, we must consider connection on  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$ . For this, we need to project the connections on the tangent space of probability measure as follows:

$$\nabla_A^{(m)} B = \tilde{\nabla}_A^{(m)} B, \tag{34}$$

$$\nabla_A^{(e)} B = (\mu, \sum_i \frac{\partial b_i}{\partial a_\mu}(\mu) \delta^i - \sum_i \frac{1}{\mu_i} b_{\mu,i} a_{\mu,i} \delta^i + \sum_i g_\mu(A_\mu, B_\mu) \mu_i \delta^i), \tag{35}$$

where the first projection is the same because  $\tilde{\nabla}^{(m)}$  belong to  $T\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$  whenever it is evaluated in vector fields of  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$ , while the second connection must be projected with the extra term,  $\sum_i g_\mu(A_\mu, B_\mu)\mu_i\delta_i$ . A direct consequence of this definition is that:

$$Ag_\mu(B, C) = g_\mu(\nabla_A^{(m)}B, C) + g_\mu(B, \nabla_A^{(e)}C),$$

for  $A = \frac{\partial}{\partial\mu_k}, B = \frac{\partial}{\partial\mu_l}, C = \frac{\partial}{\partial\mu_s}$  in  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$ . This relation allows us to prove the following property along vector fields

**Proposition 0.15.** *The connections  $\nabla^{(m)}$  and  $\nabla^{(e)}$  satisfy the condition:*

$$Ag_\mu(B, C) = g_\mu(\nabla_A^{(m)}B, C) + g_\mu(B, \nabla_A^{(e)}C),$$

for any  $A, B, C$  vector field in  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$ . In addition,  $\nabla^{(m)}$  and  $\nabla^{(e)}$  are torsion-free.

A proof can be found in (Calin & Udriște, 2014, Proposition 1.10.4), but for convenience of the reader we give a coordinate free proof of the claim,

*Proof.* For the first claim, we just note that we have proved for a basis of local vector fields. Now, we will use the fact on  $A = \frac{\partial}{\partial\mu_k}, B = \frac{\partial}{\partial\mu_l}, C = \frac{\partial}{\partial\mu_s}$  and extend (via Leibniz rule for the connections and the vector fields) as  $C^\infty(\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta))$ -module. For this, consider  $b$  a smooth function in  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$ , and we will prove the relation for  $bA$  as follows:

$$b(Ag_\mu(B, C)) = g_\mu(b\nabla_A^{(m)}B, C) + g_\mu(B, b\nabla_A^{(e)}C) = g_\mu(\nabla_{bA}^{(m)}B, C) + g_\mu(B, \nabla_{bA}^{(e)}C);$$

and in a similar way we will prove for  $bB$ :

$$\begin{aligned} Ag_\mu(bB, C) &= A(bg_\mu(B, C)) = (Ab)g_\mu(B, C) + bAg_\mu(B, C) \\ &= (Ab)g_\mu(B, C) + b(g_\mu(\nabla_A^{(m)}B, C) + g_\mu(B, \nabla_A^{(e)}C)) \\ &= g_\mu((Ab)B + b\nabla_A^{(m)}B, C) + g_\mu(bB, \nabla_A^{(e)}C) \\ &= g_\mu(\nabla_A^{(m)}bB, C) + g_\mu(bB, \nabla_A^{(e)}C), \end{aligned}$$

yielding the desired result. For  $bC$ , the verification is the same as for  $bB$ . Finally, extend the relation linearly and the relation holds.

For the second claim, recall that the torsion of a connection is the tensor determined by  $\nabla_A B - \nabla_B A - [A, B]$ , so we must verify that  $\nabla_A B - \nabla_B A = [A, B]$ , for  $m$ -connection and  $e$ -connection. From the defining relation (34), we just note that for any vector fields  $A = \sum_i a^i \frac{\partial}{\partial e^i}$  y  $B = \sum_j b^j \frac{\partial}{\partial e^j}$ , we get:

$$\nabla_A^{(m)}B - \nabla_B^{(m)}A = \sum_{i,j} a^i \frac{\partial b_j}{\partial e^i} - b^j \frac{\partial a_i}{\partial e^j},$$

which is the same as  $[A, B]$ . Similarly for the relation in (35), then we get torsion free in both cases. □

**Remark 0.16.** *The previous fact is a well known fact and a key starting point on the theory of information geometry these connections. A proof can be found in (Calin & Udriște, 2014, Proposition 1.10.4). All the proofs known in the literature use Christoffel symbols, but our proof avoids this geometrical notion and shows that depends only on the local direction because the identity  $Ag_\mu(B, C) = g_\mu(\nabla_A^{(m)}B, C) + g_\mu(B, \nabla_A^{(e)}C)$  is tensorial.*

## Geometric concepts for information geometry

Motivated by the geometry on statistical models, the Fisher metric and dual connections, we will define *statistical manifolds* as an abstraction of this structures for any Riemannian manifold. The main goal of this section is to present the difference between statistical model and statistical manifold. The technique we will use is to endow those manifolds with a particular geometric structure and verify that such structures coincide with the statistical model.

### 0.6 Statistical models and dual structure

This section takes as reference (Amari & Nagaoka, 2000, section 3.1) and (Ay et al., 2017, section 4.2) to study the dual structure and the notion of torsion-free connections for any Riemannian manifold extending the notion of statistical models previously defined.

**Definition 0.17.** Two affine connections  $\nabla^{(1)}$  and  $\nabla^{(-1)}$  on a Riemannian manifold  $(M, g)$  are called dual connection if for any three vector fields they satisfy:

$$Zg(X, Y) := g(\nabla_Z^{(1)}X, Y) + g(X, \nabla_Z^{(-1)}Y). \quad (36)$$

In this case, the triple  $(g, \nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  is called dual structure on  $M$ .

Recall that the torsion of an affine connection  $\nabla$  is  $\text{Tor}(X, Y) = \nabla_X Y - \nabla_Y X - [X, Y]$ , and is called torsion-free if  $\text{Tor}(X, Y) = 0$ . A Riemannian manifold  $(M, g)$  is called **statistical manifold** if it is endowed with a pair of torsion-free dual connections  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$ .

**Lemma 0.18.** Let  $(M, g)$  be a Riemannian manifold and  $\nabla^{(1)}$  an affine connection, then there exists a unique dual connection  $\nabla^{(-1)}$  with respect to  $g$ .

*Proof.* The existence of  $\nabla^{(-1)}$  is a direct consequence of the identity (36) defining the dual connection. Now, consider  $\bar{\nabla}$  and  $\nabla^{(-1)}$  dual connections to  $\nabla^{(1)}$  with respect to  $(M, g)$ , that is, for all tangent vectors  $X, Y, Z$  in  $M$ , we have:

$$\begin{aligned} g(X, Y) &= g(\nabla^{(1)}ZX, Y) + g(X, \bar{\nabla}ZY) \\ Zg(X, Y) &= g(\nabla^{(1)}ZX, Y) + g(X, \nabla^{(-1)}ZY); \end{aligned}$$

in particular we get  $0 = g(X, (\bar{\nabla} - \nabla^{(-1)})_Z Y)$ , which finally yields  $\bar{\nabla} = \nabla^{(-1)}$ . Both conclusions depend on the non-degeneracy of the metric tensor  $g$ .  $\square$

We will present a summary of well known facts of geometry of dual connections, but we state them in a general version and give coordinate-free proofs that are not available in the literature.

**Theorem 0.19.** Let  $(M, g)$  be a Riemannian manifold, and  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  any two connections in  $M$ .

1.  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  is dual structure if and only if  $(\alpha\nabla^{(1)} + \beta\nabla^{(-1)}, \beta\nabla^{(1)} + \alpha\nabla^{(-1)})$  is dual structure for any combination such that  $\alpha + \beta = 1$ .
2.  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  are torsion-free if and only if  $(\alpha\nabla^{(1)} + \beta\nabla^{(-1)}, \beta\nabla^{(1)} + \alpha\nabla^{(-1)})$  are torsion-free for any combination such that  $\alpha + \beta = 1$ ,
3. If  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  are dual and torsion free, then  $2\nabla^{(0)} = \nabla^{(1)} + \nabla^{(-1)}$ ,
4. whenever  $2\nabla^{(0)} = \nabla^{(1)} + \nabla^{(-1)}$ , then  $\nabla^{(1)}$  is torsion free if and only if  $\nabla^{(-1)}$  is also torsion free.

*Proof.* Before we give the proofs of each item, we must remark that any  $\mathbb{R}$ -linear combination of affine connection is again affine connection, just because all the defining conditions (as in Remark ?) are preserved by linearity.

*Proof of (1):* First assume that  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  are dual structures, then by linearity of the metric we get

$$g = ((\alpha\nabla^{(1)} + \beta\nabla^{(-1)})_X Y, Z) + g(Y, (\beta\nabla^{(1)} + \alpha\nabla^{(-1)})_X Z) \\ = \alpha(g(\nabla_X^{(1)} Y, Z) + g(Y, \nabla_X^{(-1)} Z)) + \beta(g(\nabla_X^{(-1)} Y, Z) + g(Y, \nabla_X^{(1)} Z)) = Xg(Y, Z).$$

For the other direction, just note that

$$\nabla^{(1)} = \tilde{\alpha}(\alpha\nabla^{(1)} + \beta\nabla^{(-1)}) + \tilde{\beta}(\beta\nabla^{(1)} + \alpha\nabla^{(-1)}) \\ \nabla^{(-1)} = \tilde{\beta}(\alpha\nabla^{(1)} + \beta\nabla^{(-1)}) + \tilde{\alpha}(\beta\nabla^{(1)} + \alpha\nabla^{(-1)}),$$

with  $\tilde{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha - \beta}$  and  $\tilde{\beta} = \frac{-\beta}{\alpha - \beta}$ . Note that we also have that  $\tilde{\alpha} + \tilde{\beta} = 1$ , and the results follow from the previous claim.

*Proof of (2):* This verification follows the same argument as previous item.

*Proof of (3):* Just note that for  $\alpha = \frac{1}{2} = \beta$ , we get  $(\alpha\nabla^{(1)} + \beta\nabla^{(-1)}, \beta\nabla^{(1)} + \alpha\nabla^{(-1)})$  is dual structure and torsion-free (previous items). Indeed, in this case, we have:

$$\alpha\nabla^{(1)} + \beta\nabla^{(-1)} = \beta\nabla^{(1)} + \alpha\nabla^{(-1)},$$

which means that it is *self-dual*, or in other words it is a metric connection. By fundamental theorem in Riemannian geometry, we get that  $\alpha\nabla^{(1)} + \beta\nabla^{(-1)}$  is the Levi-Civita connection, and the claim holds.

*Proof of (4):* An easy verification from the identity  $2\nabla^{(0)} = \nabla^{(1)} + \nabla^{(-1)}$ , leads us to note that:

$$\nabla_X^{(1)} Y - \nabla_Y^{(1)} X = 2\nabla_X^{(0)} Y - \nabla_X^{(-1)} Y - (2\nabla_Y^{(0)} X - \nabla_X^{(-1)} Y) = 2[X, Y] - (\nabla_X^{(-1)} Y - \nabla_Y^{(-1)} X),$$

which yields that  $\nabla_X^{(1)} Y - \nabla_Y^{(1)} X - [X, Y] = [X, Y] - (\nabla_X^{(-1)} Y - \nabla_Y^{(-1)} X)$ , and the claim holds.  $\square$

In what follows, we work only with this type of combination, in particular, we will consider the family of  $\alpha$ -connection, with  $\alpha \in [-1, 1]$ , as:

$$(\nabla^{(\alpha)} = \frac{1 + \alpha}{2} \nabla^{(1)} + \frac{1 - \alpha}{2} \nabla^{(-1)}, \nabla^{(-\alpha)} = \frac{1 - \alpha}{2} \nabla^{(1)} + \frac{1 + \alpha}{2} \nabla^{(-1)}) \quad (37)$$

or in its equivalent version:

$$\nabla^{(\alpha)} = \nabla^{(-1)} + (\frac{1 + \alpha}{2})(\nabla^{(1)} - \nabla^{(-1)}), \quad \nabla^{(-\alpha)} = \nabla^{(1)} - (\frac{1 + \alpha}{2})(\nabla^{(1)} - \nabla^{(-1)}). \quad (38)$$

As a direct consequence of the previous theorem, we get:

**Corollary 0.20.** *If  $(g, \nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  is a torsion-free dual structure in  $M$ , then  $(g, \nabla^{(\alpha)}, \nabla^{(-\alpha)})$  is also torsion-free dual structure, for any  $-1 \leq \alpha \leq 1$ . and we get that,*

$$\nabla^{(0)} = \frac{1}{2}(\nabla^{(\alpha)} + \nabla^{(-\alpha)}). \quad (39)$$

**Example 0.21.** Using the notation:

$$\nabla^{(1)} := \nabla^{(e)} \quad \nabla^{(-1)} := \nabla^{(m)}$$

we recall that the statistical model  $(\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta), g, \nabla^{(-1)}, \nabla^{(1)})$  is also a statistical manifold. Additionally, the previous definition yields that  $\alpha$ -connections are torsion-free and dual structure. Furthermore, using (32) and (33), applied to  $B$  in the direction of  $A$  in  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$  gives local representation as:

$$\nabla_A^{(\alpha)} B|_\mu = \left( \mu, \sum_i \left( \frac{\partial b_i}{\partial a_\mu}(\mu) - \frac{1+\alpha}{2} g_\mu(A, B) \right) \delta^i \right), \quad \nabla_A^{(-\alpha)} B|_\mu = \left( \mu, \sum_i \left( \frac{\partial b_i}{\partial a_\mu}(\mu) - \frac{1-\alpha}{2} g_\mu(A, B) \right) \delta^i \right) \tag{40}$$

As final remark in this section is that the usual prove of the previous results lie on Christoffel symbols for the two dual connections on statistical manifolds, however, we give a coordinate-free proof of these facts and even in the more general setting of statistical structure (Ay et al., 2017, cf. Section 4.2).

### 0.7 Tensor Amari-Chentsov

We now want to measure the difference between two dual structures  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$ , in explicit way we want to compute  $\mathcal{T} = \nabla^{(-1)} - \nabla^{(1)} : \mathfrak{X}^2(M) \rightarrow \mathfrak{X}(M)$ . We can study this difference by using the metric tensor  $g$ , i.e we define the following tensor: or  $T : \mathfrak{X}^3(M) \rightarrow C^\infty(M)$ :

$$T(X, Y, Z) = g(\nabla_X^{(-1)} Y - \nabla_X^{(1)} Y, Z) = g(\mathcal{T}(X, Y), Z) \tag{41}$$

Note the special case of  $\nabla^{(0)}$  of Levi-Civita connection, this tensor vanishes identically. In the Literature,  $T$  (simialry  $\mathcal{T}$ ) is known as **Amari-Chentsov** tensor.

**Example 0.22.** Observe,  $\nabla_A^{(-1)} B|_\mu = \frac{\partial b}{\partial a_\mu}(\mu)$  and  $\nabla_A^{(1)} B|_\mu = \frac{\partial b}{\partial a_\mu}(\mu) - g_\mu(A, B)$ , the difference between them on  $A \sim (\mu, a_\mu), B \sim (\mu, b_\mu) \in T_\mu \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  is:

$$\mathcal{T}(A, B) := \nabla_A^{(-1)} B|_\mu - \nabla_A^{(1)} B|_\mu = g_\mu(A, B) = \sum_{i \in I} \frac{1}{\mu_i} a_i b_i \tag{42}$$

Using the Fisher metric with respect to other tangent vector  $C = (\mu, c_\mu)$  on  $\mu \in \mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$ , the relation (41) yields (Ay et al., 2017, section 2.5.1):

$$\mathbf{T}_\mu(A_\mu, B_\mu, C_\mu) = \sum_{i \in I} \mu_i \frac{a_{\mu,i}}{\mu_i} \frac{b_{\mu,i}}{\mu_i} \frac{c_{\mu,i}}{\mu_i}. \tag{43}$$

In this way the Amari-Chentsov in  $\mathcal{M}_+(\Omega, \Theta)$  is:

$$T_\xi = E_p \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} \log p \frac{\partial}{\partial \xi_j} \log p \frac{\partial}{\partial \xi_k} \log p \right] \tag{44}$$

**Proposition 0.23.** (Ay et al., 2017, Theorem 4.1) The Amari-Chentsov tensor  $T$  from a torsion-free dual structure  $(g, \nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  is a symmetric 3-tensor.

We remark that all proof of this claim lies on the Christoffel symbols, but here we will do it globally.

*Proof.* First, by using the dual structure, we get:

$$\begin{aligned} T(X, Y, Z) &= g(\nabla_X^{(-1)}Y - \nabla_X^{(1)}Y, Z) - g(\nabla_X^{(1)}Y, Z) = Xg(Y, Z) - g(Y, \nabla_X^{(1)}Z) - (Xg(Y, Z) - g(Y, \nabla_X^{(-1)}Z)) \\ &= g(Y, \nabla_X^{(-1)}Z) - g(Y, \nabla_X^{(1)}Z) = T(X, Z, Y). \end{aligned}$$

Also note that the torsion-free condition implies that:

$$T(X, Y, Z) = g(\nabla_X^{(-1)}Y, Z) = g([X, Y] + \nabla_Y^{(-1)}X) - ([X, Y] + \nabla_Y^{(1)}X), Z) = T(Y, X, Z).$$

These two relations show that  $T$  is symmetric on the three components. It remains to verify that it is tensorial, but this follows directly from the fact that:

$$T(X, Y, fZ) = g(\nabla_X^{(-1)}Y - \nabla_X^{(1)}Y, fZ) = fg(\nabla_X^{(-1)}Y - \nabla_X^{(1)}Y, Z) = fT(X, Y, Z).$$

From this identity, we conclude:

$$fT(X, Y, Z) = fT(X, Z, Y) = T(X, Z, fY) = T(X, fY, Z)$$

and similar for  $fT(X, Y, Z) = T(fX, Z, Y)$ .  $\square$

**Definition 0.24.** (Ay *et al.*, 2017, Definition 4.2) A **statistical structure** on a manifold  $M$  consists of a metric  $g$  and a 3-tensor  $T$  that is symmetric in all arguments.

Indeed, both structures are the same, as it is showed in the following results. We give complete and explicit construction to show the dependence on the Levi-Civita connection.

**Proposition 0.25.** (Ay *et al.*, 2017, Theorem 4.2) Each statistical structure  $(M, g, T)$  induces a statistical manifold  $(M, g, \nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$ , i.e dual and torsion-free.

*Proof.* The idea is to use an auxiliary connection to construct two connections, and conditions from the auxiliary translate to the new ones. Let us denote by  $\bar{\nabla}$  an auxiliary connection and define two new connections:

$$\nabla_Z X = \bar{\nabla}_Z X - \frac{1}{2} \mathcal{F}(Z, X), \quad \nabla_Z^* X = \bar{\nabla}_Z X + \frac{1}{2} \mathcal{F}(Z, X). \quad (45)$$

It is a straightforward computation to verify that are  $\mathbb{R}$ -linear. So it remains to study the behavior with respect to product with  $f \in C^\infty(M)$ . We give the proof for  $\nabla$  and for  $\nabla^*$  the computation is the same.

$$\begin{aligned} \nabla_Z(fX) &= \bar{\nabla}_Z(fX) - \frac{1}{2} \mathcal{F}(Z, fX) = f(\bar{\nabla}_Z X - \frac{1}{2} \mathcal{F}(Z, X)) + Z(f)X = f\nabla_Z X + Z(f)X \\ \nabla_{fZ}(X) &= \bar{\nabla}_{fZ}(X) - \frac{1}{2} \mathcal{F}(fZ, X) = f(\bar{\nabla}_Z X - \frac{1}{2} \mathcal{F}(Z, X)) = f\nabla_Z X. \end{aligned}$$

Then,  $\nabla$  and  $\nabla^*$  are affine connections. Now, we study the torsion tensor of  $\nabla$ :

$$\begin{aligned} \nabla_Z X - \nabla_X Z - [Z, X] &= \bar{\nabla}_Z X - \frac{1}{2} \mathcal{F}(Z, X) - (\bar{\nabla}_X Z - \frac{1}{2} \mathcal{F}(X, Z)) - [Z, X] \\ &= \bar{\nabla}_Z X + \bar{\nabla}_X Z - \frac{1}{2} (\mathcal{F}(X, Z) - \mathcal{F}(Z, X)) - [Z, X] \\ &= \bar{\nabla}_Z X - \bar{\nabla}_X Z - [Z, X]. \end{aligned}$$

And a similar computation for the torsion of the tensor  $\nabla^*$  gives us  $\nabla_Z^* X - \nabla_X^* Z - [Z, X] = \bar{\nabla}_Z X - \bar{\nabla}_X Z - [Z, X]$ . Thus, if we impose that  $\bar{\nabla}$  is torsion-free, we also have same property for both  $\nabla$  and  $\nabla^*$ .

The duality condition follows a similar argument, just by noticing that:

$$\begin{aligned} g(\nabla_Z X, Y) + g(X, \nabla_Z^* Y) &= [g(\bar{\nabla}_Z X, Y) - \frac{1}{2}T(Z, X, Y)] + [g(X, \bar{\nabla}_Z Y) + \frac{1}{2}T(Z, Y, X)] \\ &= g(\bar{\nabla}_Z X, Y) + g(X, \bar{\nabla}_Z Y) - \frac{1}{2}T(Z, X, Y) + \frac{1}{2}T(Z, Y, X) \\ &= g(\bar{\nabla}_Z X, Y) + g(X, \bar{\nabla}_Z Y). \end{aligned}$$

Therefore, if it is also assumed that  $\bar{\nabla}$  is a metric connection, we have:

$$g(\nabla_Z X, Y) + g(X, \nabla_Z^* Y) = Zg(X, Y).$$

From previous discussion, if we choose  $\bar{\nabla}$  as the Levi-Civita connection for  $(M, g)$ , then the symmetric tensor  $\mathcal{T}$  yields (from (45))  $(M, g, \nabla^{(1)} = \nabla, \nabla^{(-1)} = \nabla^*)$  a statistical manifold.  $\square$

Furthermore, these two procedures are inverse of each other, since given the dual structure  $(\nabla, \nabla^*)$  regarding the metric  $g$  we have  $\mathcal{T} = \nabla^* - \nabla$ , the statistical structure  $(g, \mathcal{T})$  and this produces the dual structure, as follows:

$$\begin{aligned} \nabla' &= \nabla^{(0)} - \frac{1}{2}\mathcal{T} = \frac{1}{2}\nabla + \frac{1}{2}\nabla^* - \frac{1}{2}(\nabla^* - \nabla) = \nabla \\ \nabla'^* &= \nabla^{(0)} + \frac{1}{2}\mathcal{T} = \frac{1}{2}\nabla + \frac{1}{2}\nabla^* + \frac{1}{2}(\nabla^* - \nabla) = \nabla^* \end{aligned}$$

On the other hand:  $(g, \mathcal{T})$  produces  $(\nabla, \nabla^*) = (\nabla^{(0)} - \frac{1}{2}\mathcal{T}, \nabla^{(0)} + \frac{1}{2}\mathcal{T})$  in turn gives,

$$\mathcal{T}' = (\nabla^{(0)} + \frac{1}{2}\mathcal{T}) - (\nabla^{(0)} - \frac{1}{2}\mathcal{T}) = \mathcal{T}$$

In conclusion,

**Theorem 0.26.** *For any Riemannian metric  $(M, g)$ , there is a one-to-one relation between torsion-free dual structures (statistical manifold) and statistical structure.*

### 0.8 Canonical divergence

A divergence function is a non negative function  $D : M \times M \rightarrow \mathbb{R}$  so that  $D|_{\Delta} = 0$  and for any two vector fields  $X, Y$  in  $M$  we get  $X^1 Y^2 D|_{\Delta} > 0$  where the superscript  $X^1$  and  $Y^2$  represent the lifting to  $M \times \{q\}$  and  $\{p\} \times M$  respectively. We will say that a divergence function *generates* the structure  $(g, \nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)}, T)$  if  $g = g^{(D)}$ ,  $(\nabla^{(1)} = \nabla^{(D)}, \nabla^{(-1)} = \nabla^{(D^*)})$  and  $T = T^{(D)}$  for the following relations:

$$g^{(D)}(V, W)|_p := -D(V\|W)(p), \tag{46}$$

$$g^{(D)}(\nabla_V^{(D)} W, Z) := -D(VW\|Z), \tag{47}$$

$$g^{(D)}(\nabla_V^{(D^*)} W, Z) := -D^*(VW\|Z), \text{ with } D^*(p, q) = D(q, p), \tag{48}$$

$$T^D(X, Y, Z) := -D(XY\|Z) + D(Z\|XY). \tag{49}$$

where we are using the usual notation:

$$D(V_1 \cdots V_n \| W_1 \cdots W_m)(p) := (V_1)^1 \cdots (V_n)^1 (W_1)^2 \cdots (W_m)^2 D|_{\Delta}.$$

The problem of the existence of a divergence function that generates a statistical manifold (and also the statistical structure) is already solved by (Amari & Nagaoka, 2000, Amari et al.), indeed there exist many of such functions. For more details and references we refer to (Ay et al., 2017, section 4.4).

As a consequence of the isostatistical immersion theorem, we have the following corollary:

**Corollary 0.27.** (Ay et al., 2017, Corollary 4.5) For any statistical manifold  $(M, g, T)$  we can find a divergence  $D$  of  $M$  which defines  $g$  and  $T$  by the formulas (46)-(49).

A related question is if there exists a natural choice among all of these divergence functions. The answer comes as **canonical divergence**, that, in addition to the definition of divergence must satisfy:

1.  $D$  generates the dualistic structure  $(g, \nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$ ,
2.  $D$  is one half of the squared Riemannian distance, i.e.  $2D(p, q) = d(p, q)^2$ , when the statistical manifold is self-dual, namely when  $\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)}$  are equal and coincide with the Levi-Civita connection,
3.  $D$  is the canonical divergence, when  $(M, g, \nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  is dually flat; this is *Bregman divergence*.

It was computed that canonical divergence is induced by the geodesics in the following way: On a manifold  $M$  which has the associated connection  $\nabla$  concerning the metric  $g$ , given a pair of (closed enough) points  $q, p \in M$ , there exists a unique curve  $\nabla$ -geodesic.

$$\gamma_{q,p} : [0, 1] \longrightarrow M,$$

which satisfies  $\gamma_{q,p}(0) = p$  y  $\gamma_{q,p}(1) = q$ .

**Remark 0.28.** This is equivalent to saying that for each pair of points  $q$  and  $p$  there exists a unique vector  $X(q, p) \in T_q M$  that satisfies  $\exp_q(X(q, p)) = p$  where  $\exp$  denotes the exponential map associated with  $\nabla$ .

**Theorem 0.29.** (Ay et al., 2017, section 4.4.2) Giving an affine connection  $\nabla$  and a metric  $g$  on  $M$ , it is possible to define the **canonical divergence**  $D : M \times M \rightarrow \mathbb{R}$  associated to  $(g, \nabla)$  as:

$$D(p||q) = \int_0^1 t \|\dot{\gamma}_{p,q}(t)\|^2 dt, \tag{50}$$

for  $\gamma$  the geodesic with initial point  $p$  and ends in  $q$ . In similar way, it also defines the dual canonical divergence as  $D^*(p||q) := D(q||p)$ .

As a direct consequence, for the statistical model, we get:

**Corollary 0.30.** (Ay et al., 2017, Theorem 4.8) The statistical model  $(\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta), g, \nabla^{(e)}, \nabla^{(m)}, T)$  coincides with

$$(\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta), g^{(D)}, \nabla^{(D)}, \nabla^{*(D^*)}, T^{(D)}).$$

A particular class of canonical divergence in  $\mathcal{P}_+(\Omega, \Theta)$  is the *KL-divergence* which is defined by

$$D_{KL}(\mu||\nu) = \sum_{i \in I} \mu_i \log \frac{\mu_i}{\nu_i}. \tag{51}$$

The idea behind the proof is that for a torsion-free dual structure  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$ , the formulae in (50) can be expressed as:

$$D(p||q) = \Psi(p) + \varphi(q) - \vartheta^i(p)\eta_i(q),$$

for suitable function  $\Psi, \varphi, \vartheta^i$  and  $\eta_i$ , and verify that this description of  $D$  coincides with equation (51) defining the KL-divergence. For more details we refer to (Ay et al., 2017, Section 4.4.3).

A key property at this point is that the Kullback–Leibler (KL) divergence is closely associated with many of the geometric concepts arising in information theory (Amari & Nagaoka, 2000, section 3.2). In particular, the KL divergence between a mixture distribution and its components plays a central role in variational inference and in expectation-maximization (EM) algorithms for learning latent structures. Moreover, the KL divergence provides a bridge between global information, as quantified by Shannon entropy, and local information, as characterized by the Fisher information metric (as divergence in  $\mathcal{P}_+$ ) and

$$D_{KL}(p||q) = h(p, q) - h(p)$$

where  $h(p, q)$  is the differential cross-entropy of  $p$  and  $q$ , and  $h(p)$  is the marginal differential entropy of  $p$ . See proof in (Ay et al., 2017, section 4.3).

### 0.9 Hessian geometry

On a usual Riemann manifold, we mean by Hessian of a function the 2-order differential operator given by the differential and the metric tensor. This notion can be promoted to a more general setting, where we again have second order derivative, i.e the notion of derivation. As we have seen, this can be realized by a connection  $\nabla$  on  $M$ . We will say that a Riemannian metric  $g$  on a flat manifold  $(M, \nabla)$  is a **Hessian metric** if for any point  $x \in M$ , there exists a local function  $\varphi$  (on an open set around  $x$ ) such that  $g = \nabla d\varphi$ . A Hessian structure for which there exists a global 1-form  $\alpha$  so that  $g = \nabla\alpha$ , then  $g$  is called **Koszul type** with respect to  $\nabla$ . A nice description of such structure is the following equivalent statement in (Shima, 2007)

**Proposition 0.31.** *For a flat torsion free manifold  $(M, \nabla)$  equipped with Riemannian metric  $g$ , the following conditions are equivalent:*

1.  $g$  is Hessian metric for  $\nabla$
2.  $(\nabla_X g)(Y, Z) = (\nabla_Y g)(X, Z)$
3.  $g(\gamma_X Y, Z) = g(Y, \gamma_X Z)$  where  $\gamma_X Y = \nabla_X^{(0)} Y - \nabla_X Y$

An additional equivalent way, that is far from this notes but it worth to mention, is the existence of Kähler metric on the tangent bundle  $TM$ .

The notion of information geometric Hessian structure, also is generalized as follows:

**Definition 0.32.** *A nearly statistical structure on a manifold  $M$  is a pair  $(h, \nabla)$  of a 2-tensor field  $h$  and a connection on  $M$ , so that*

$$(\nabla_X h)(Y, Z) = (\nabla_Y h)(X, Z) \tag{52}$$

for all  $X, Y, Z$  vector fields on  $M$ . The pair  $(h, \nabla)$  with torsion  $T_\nabla$ , is a **quasi statistical structure** if

$$d^\nabla h(X, Y, Z) := (\nabla_X h)(Y, Z) - (\nabla_Y h)(X, Z) - h(T_\nabla(X, Y), Z) \tag{53}$$

vanishes for all vector fields on  $M$ .

A direct consequence of the definition is the direct relation among the new notions and the torsion of the connection:

**Lemma 0.33.** Consider a (0,2) tensor  $h$  and a connection  $\nabla$ , then any two of the following hypothesis

$$(a)(h, \nabla) \text{ is nearly statistical} \quad (b)(h, \nabla) \text{ is quasi statistical} \quad (c) \text{Im}(T_{\nabla}) \subset \text{Ker}(h)$$

imply the third one. In particular, if  $h$  is non-degenerated, then condition (c) can be change by  
(c') torsion-freeness of  $\nabla$ .

A straightforward computation on a Riemannian manifold  $(M, g)$  with dual structure  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$  yields

$$\begin{aligned} (\nabla_X^{(1)} g)(Y, Z) &= (\nabla_Y^{(1)} g)(X, Z) + T_{AC}(X, Z, Y) - T_{AC}(Y, Z, X) \\ (d^{\nabla^{(1)}} g)(X, Y, Z) &= T_{AC}(X, Z, Y) - T_{AC}(Y, Z, X) - g(T_{\nabla^{(1)}}(X, Y), Z). \end{aligned}$$

Therefore, for any statistical structure (i.e torsion-free dual structure or  $T_{AC}$  symmetric), the pair  $(g, \nabla^{(1)})$  is nearly statistical and quasi statistical structure. On the other direction, we can verify the following equivalence:

**Proposition 0.34.** Let  $(M, g)$  be a Riemannian manifold with dual structure  $(\nabla^{(1)}, \nabla^{(-1)})$ , then  $(g, T_{AC})$  is statistical structure if and only if  $(g, \nabla^{(1)})$  is nearly statistical and  $T_{AC}(X, Y, \cdot) = T_{AC}(Y, X, \cdot)$ .

*Proof.* The proof just follows that

$$T_{AC}(X, Y, \cdot) = T_{AC}(Y, X, \cdot), \quad \text{and} \quad T_{AC}(X, \cdot, Y) = T_{AC}(Y, \cdot, X)$$

generate the whole symmetries of  $T_{AC}$ . □

We conclude this section by showing a closed relation between nearly-statistical structures and other type of geometric structure called *almost-tensor solitons* in Equation 54:

**Proposition 0.35.** Let  $(M, g)$  a Riemannian manifold with a metric connection  $\nabla$  (i.e  $\nabla g = 0$ ) so that

$$\nabla \cdot \xi + J = \lambda Id \tag{54}$$

$\xi$  is tensor field,  $J : TM \rightarrow TM$  and  $\lambda$  is a smooth function. We get that,  $(h_{\xi}, \nabla)$  is nearly statistical if and only if

$$R(X, Y)\xi + J(T(X, Y)) = \lambda T(X, Y)$$

for any  $X, Y$  vector fields in  $M$ .

*Proof.* From the fact that  $\nabla g = 0$ , and the definition of torsion and curvature, we have

$$\begin{aligned} (\nabla_X h_{\xi})(Y, Z) - (\nabla_Y h_{\xi})(X, Z) &= g((\nabla_{[X, Y]} + R(X, Y))\xi + \nabla_{[Y, X] + T(Y, X)}\xi, Z) \\ &= g(R(X, Y)\xi + \lambda T(Y, X) - J(T(Y, X)), Z) \end{aligned}$$

where the last equality comes from the almost-tensor-soliton. As the relation holds for all vector field  $Z$ , the result is proved. □

### 0.10 Immersion

In the previous section, we conclude that there is a one-to-one relation between statistical structures and statistical manifolds, but both of them are motivated by the statistical model  $(P_+(I), g)$ . A natural question arises when we want to see any statistical structure as a statistical model. For this question, we should consider the following notion:

**Definition 0.36.** (Ay et al., 2017, Definition 4.9) Let  $h$  be a smooth application of a statistical manifold  $(M_1, g_1, T_1)$  to a statistical manifold  $(M_2, g_2, T_2)$ . The map  $h$  will be called isostatistical immersion if it is an immersion of  $M_1$  into  $M_2$  such that  $g_1 = h^*(g_2)$  and  $T_1 = h^*(T_2)$ .

A first result related to this notion is an original extension of the statement in (Ay et al., 2017, Lemma 4.6) for Fisher metric. It is important to highlight that (Ay et al., 2017, Lemma 4.6) just prove item a., and in this note we give a proof for the rest of the claims:

**Proposition 0.37.** Let  $\Omega$  be a measurable space and  $p_i : \Omega \times M_i \rightarrow [0, 1]$  measurable functions with  $\int_{\Omega \times M_i} p_i(x; \xi_i) dx = 1$  (for  $i = 1, 2$ ), such that  $h : (M_1, g_1, T_1) \rightarrow (M_2, g_2, T_2)$  is an isostatistical immersion between these two statistical structures, then we have:

- a. If  $g_1$  and  $g_2$  are Fisher metrics, then  $h^*p_2(x; \xi_2) = p_1(x; \xi_1)$ .
- b. If  $h^*p_2(x; \xi_2) = p_1(x; \xi_1)$ , and  $g_2$  is Fisher metric, then  $g_1$  is also a Fisher metric.
- c. If  $h^*p_2(x; \xi_2) = p_1(x; \xi_1)$  and  $T_2$  is Amari-Chentsov tensor, then  $T_1$  is Amari-Chentsov tensor.

*Proof.* As we commented before the statement of the proposition, we just prove the second and third claim:

- b. Given  $h^*p_2 = p_1$ , and Fisher metric  $g_2$ , we have,

$$g_1(V_1, V_2) = E_{h^*p_2} \left[ \frac{\partial}{\partial V_1} \log h^*p_2(x; \xi_2) \frac{\partial}{\partial V_2} \log h^*p_2(x; \xi_2) \right] = E_{p_1} \left[ \frac{\partial}{\partial V_1} \log p_1(x; \xi_1) \frac{\partial}{\partial V_2} \log p_1(x; \xi_1) \right]$$

then  $g_1$  is Fisher metric

- c. Given  $h^*T_2 = T_1$  and  $T_1$  is Amari-Chentsov tensor.

$$\begin{aligned} T_1(V_1, V_2, V_3) &= E_{h^*p_2} \left[ \frac{\partial}{\partial V_1} \log h^*p_2(x; \xi_2) \frac{\partial}{\partial V_2} \log h^*p_2(x; \xi_2) \frac{\partial}{\partial V_3} \log h^*p_2(x; \xi_2) \right] \\ &= E_{h^*p_1} \left[ \frac{\partial}{\partial V_1} \log p_1(x; \xi_1) \frac{\partial}{\partial V_2} \log p_1(x; \xi_1) \frac{\partial}{\partial V_3} \log p_1(x; \xi_1) \right] \end{aligned}$$

then  $T_1$  is Amari-Chentsov tensor. □

## Applications

Here we will give a brief exposition of some applications of the Fisher metric in statistical theory. The aim of this last section is to open new horizons in the research and use of this new technique and to join different branches of mathematics and statistics. We give explicit reference for convenience of the reader.

*The 1-dimensional statistical model*

(Ly, Marsman, Verhagen, Grasman, & Wagenmakers, 2017) In the case of Bernoulli model, we have  $\Omega = \{0, 1\}$  and  $p(x, \mu) = \mu^x(1 - \mu)^{1-x}$ , then from (20) we get

$$g_{\mu} = \frac{1}{\mu(1-\mu)} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

as metric tensor in one dimension. Despite this seems a simply computation, in Bayesian probability theory this will have a very nice interpretation. One problem of interest in this theory is the *principle of insufficient reason*, this is a rule for assigning prior probabilities when there is no reason to favor one possibility over another. In particular this suggest to extend data by a Bernoulli distribution with *prior* of parameter of interest. After that, the Bayes' theorem can be stated as

$$F(\mu|X) = \frac{p(x, \mu)F(\mu)}{\int_X p(x, \mu)F(\mu)d\mu},$$

where  $F(\mu|X)$  is known as *posterior density* of  $\mu$  and the integral is known as *marginal likelihood*. In some data models, we might not be able to derive such a distribution analytically, as the integration involved in the marginal likelihood is typically hard to perform. However, Jeffrey's rule (Jeffreys, 1946) interpretation in information geometry depends on the Fisher metric along the derivative of  $\ln p$ , and in the 1-dimensional particular case this can be seen as

$$F(\mu) = \frac{\sqrt{g_{\mu}}}{\int_{\Omega} \sqrt{g_{\mu}}d\mu}$$

for the Fisher metric. For further references on the interpretation of Jeffrey's rule in information geometry, we refer to (Li, Sun, & Peng, 2022) and (Snoussi & Mohammad-Djafari, 2003).

*Riemannian Hamiltonian Monte Carlo*

(Betancourt, 2013) Hamiltonian Monte Carlo is a powerful Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method for sampling probability distributions. It originates in physics but gains deep insight in information geometry. HMC augments the original probability space of interest (say, the posterior distribution  $\pi(\theta)$ ) by introducing auxiliary momentum variables  $p$ , and simulates dynamics on this phase space using Hamiltonian mechanics where the main tool are the position and momentum coordinates. The Hamiltonian is typically

$$H(\theta, p) = -\ln(\pi(\theta)) + \frac{1}{2}p^T M^{-1}p,$$

where  $M$  is a mass matrix. The mass matrix  $M$  interprets a global decorrelation and the potential (similar to the potential function in classical mechanics) comes as  $\log|M|$ . The common Hamiltonian Monte Carlo algorithm considers the measure-preserving underdamped Langevin process [Stoltz, Rousset] and hamiltonian trajectories are related to geodesic for the metric on  $M$ .

Riemannian Manifold HMC (RMHMC) uses a position-dependent metric, typically related to the Fisher information matrix or the negative Hessian of the log-posterior. But this introduces a technical challenge: the Hessian may not be positive definite, which is essential for defining a valid Riemannian metric. A solution comes with the SoftAbs metric (introduced by Betancourt in 2013) which provides a smooth, positive-definite approximation of the Hessian using a *soft absolute value* function applied to the eigenvalues. If the initial metric has eigenvalues  $\lambda_i$ , we choose suitable regularizing values  $\alpha$  so that the new metric

$$X = Q \text{diag}_{abs} \left( \frac{\lambda_i}{\tanh(\alpha \lambda_i)} \right) Q^T$$

is positive-defined.

For more detail we refer to (Stoltz, Rousset, et al., 2010). and (?, ?)

*q-exponential and bivariate Student's t-distributions*

(Sakamoto & Matsuzoe, 2015) From a usual computation, we know that  $\lim_{q \rightarrow 1^+} \exp_q(t) = e^t$  for the function  $\exp_q(t) = (1 + (1 - q)t)^{\frac{1}{1-q}}$ . This allows us to define  $\exp_q$  as **q-exponential**. This same idea can be extended to exponential family, where we define *q-exponential family* as:

$$p(x; \vartheta) = \exp_q \left[ \gamma(x) + \sum_{i=1}^n f_i(x) \vartheta^i - \psi(\vartheta) \right],$$

In the same spirit of exponential family, we can define *q-Fisher metric* as  $g_{ij} = \frac{\partial}{\partial \vartheta_i} \frac{\partial}{\partial \vartheta_j} \psi$ . In addition, we can adapt the construction of Amari-Chentsov tensor (44) to induce *q(α)-connection* (for  $\alpha \in [-1, 1]$ ) in the same way as we did with the Amari-Chentsov tensor:

$$g(\nabla_X^{q(\alpha)} Y, Z) = g(\nabla_X^{q(0)} Y, Z) - \frac{\alpha}{2} T_q(X, Y, Z)$$

for the Levi-Civita connection  $\nabla^{q(0)}$  of the Fisher metric form *q-exponential family*. As usual, we define the *q-exponential connection* and *q-mixture connection* as:

$$\nabla_X^{q(e)} = \nabla_X^{q(1)}, \quad \nabla_X^{q(m)} = \nabla_X^{q(-1)}$$

respectively.

**Example 0.38.** Recall that *n-dimensional Student's t-distribution with degree of freedom v or a q-Gaussian distribution* is given by

$$p_q(x, \mu, \bar{\mu}) = \frac{\Gamma(\frac{1}{q-1})}{(\pi v)^{d/2} \Gamma(\frac{v}{2}) \sqrt{|\bar{\mu}|}} \left( 1 + \frac{1}{v} (x - \mu)^T \bar{\mu}^{-1} (x - \mu) \right)^{\frac{1}{q-1}}.$$

With the change of variables

$$z_q = \frac{(\pi v)^{d/2} \Gamma(\frac{v}{2}) \sqrt{|\bar{\mu}|}}{\Gamma(\frac{1}{q-1})}, \quad R = \frac{z_q^{q-1}}{(1-q)d+2} \bar{\mu}^{-1}, \quad \text{and} \quad \theta = 2R\mu$$

this is also *q-exponential*:

$$p_q(x, \mu, \bar{\mu}) = \exp_q \left( \sum_{i=1}^d \theta^i x_i - \sum_{i=1}^d R_{ii} x_i^2 - 2 \sum_{ij} R_{ij} x_i x_j - \frac{1}{4} \theta^T R^{-1} \theta + \ln_q \left( \frac{1}{z_q} \right) \right).$$

The associated Fisher metric comes as second derivatives of  $\psi(\theta) = \frac{1}{4} \theta^T R^{-1} \theta - \ln_q \left( \frac{1}{z_q} \right)$ .  
 ◇

A direct consequence of the example and from previous construction is the following theorem, which gives a new result on the product of random variables:

**Theorem 0.39.** *Let  $X_1$  and  $X_2$  two random variables with  $t$ -Student distribution  $p_i(x_i)$  respectively with same parameter  $q$ . Then there exists a bivariate  $t$ -Student distribution  $p(x_1, x_2)$  such that  $X_1$  and  $X_2$  are independent with*

$$p = p_1 \otimes p_2 \otimes (-c)$$

where  $c = (\ln_q(\frac{1}{z_q(\sigma_1)})) + \ln_q(\frac{1}{z_q(\sigma_2)}) - \ln_q(\frac{1}{z_q})$  and  $z_q$  is the  $m$ -normalization function for the bivariate Student's  $t$ -distribution.

0.11 Some results on MLE

Maximum likelihood estimator (MLE) is a well known estimator in statistics. The asymptotic properties of MLEs on Euclidean spaces is of great interest, but their studies on manifolds are still insufficient. If  $X_1, \dots, X_n$  are independent random samples from a family of distributions  $p(x, \theta)$ , a maximum likelihood estimator is any  $\hat{\theta}_n$  which solves

$$\max_{\theta} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log p(X_i, \theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log p(X_i, \hat{\theta}_n).$$

**Example 0.40.** *When we work in the space of symmetric positive definite matrices (SPD) with the Fisher metric (in this particular example called Rao's distance), it is possible to compute the MLE as*

$$\hat{\theta}_n = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^n d^2(X_i, \theta)$$

which is unique (as MLE) and converge in probability to some element on SPD.  $\diamond$

To study asymptotic efficiency of MLE, in (Heyde, 1997) there was defined a generalization of estimating functions on a measurable space  $\Omega$  with family of probabilities  $(p_m)_{m \in M}$  parametrized by  $M$ . An **estimating form** on  $\Omega$  along  $M$  is a function  $\omega : \Omega \times M \rightarrow T^*M$  such that

$$E_{\theta}[\omega(x, \theta)X_{\theta}] = 0$$

for all  $X_{\theta} \in T_{\theta}M$ . Note that given a function  $l$  on  $M$  (parametrized by  $\Omega$ ) it is possible to get its derivative  $dl : \Omega \times M \rightarrow T^*M$  and we can define the matrix  $\Gamma = \begin{pmatrix} E & F \\ G & H \end{pmatrix}$  comparing  $\omega$  and  $dl$  via a fixed  $\theta_0 \in M$ ,

$$\begin{aligned} E_{a,b} &= E_{\theta_0}[dl(x, \theta)e_a dl(x, \theta)e_b], \\ F_{a,b} &= E_{\theta_0}[dl(x, \theta)e_a \omega(x, \theta)e_b] = G_{b,a}, \\ H_{a,b} &= E_{\theta_0}[\omega(x, \theta)e_a \omega(x, \theta)e_b], \end{aligned}$$

where  $\{e_a\}$  is a frame of  $TM$ . This data gives the following estimates:

**Proposition 0.41.** *If  $\Gamma$  is positive defined, then  $E^{-1} < -(E[\nabla dl(e_a, e_b)]^{-1})HF^{-1}$  and  $E^{-1}$  is the limit distribution when  $\omega = dl$ . In addition, if  $(a_1, \dots, a_n)$  are the coordinates of  $Log_{\theta_0}(\bar{\theta})$  with  $E[Log_{\theta_0}(\bar{\theta})] = 0$ , then the Cramer-Rao inequality (23) holds for  $\mathcal{F}^{-1}$  and curvature terms where*

$$\mathcal{F}_{ij} = E[d(\sum_{i=1}^n \log p(x_i, \theta_0)e_i d(\sum_{i=1}^n \log p(x_i, \theta_0)e_j)].$$

### Clustering Patterns

(Amari & Cichocki, 2010) Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus, augue. Clustering is an important technique in data analysis. It is used to group patterns or data points into subsets, called clusters, that share similar characteristics. One way to implement clustering using information geometry is via *divergence*, which is an asymmetric measure of the difference between probability distributions.

We represent patterns as vectors  $x$  in a pattern manifold  $X \subset \mathbb{R}^n$ , and we study the case where a divergence is defined between two patterns  $x$  and  $x'$ .

The dual  $\phi$ -divergence between two patterns  $x$  and  $x'$

$$D_\phi[x : x'] = \phi(x) - \phi(x') - \nabla\phi(x') \cdot (x - x'),$$

is constructed from a dual convex function  $\phi$ .

A cluster  $C$  consists on  $k$  patterns  $x_1, \dots, x_k$  in  $X$ . The goal is to determine a representative for  $C$  that is as close as possible to all its members. To achieve this, we compute the average of  $\phi$ -divergences among  $C$  a vector  $\eta$ , given by:

$$D_\phi[C : \eta] = \frac{1}{k} \sum_{x_i \in C} D_\phi[x_i : \eta].$$

and the procedure finish by minimizing the term  $D_\phi[C : \eta]$ . Indeed, it is possible to obtain:

**Theorem 0.42.** (Amari & Cichocki, 2010, Theorem 11.1) *The  $\phi$ -center of cluster  $C$  is given by*

$$\eta_C = \frac{1}{k} \sum x_i$$

for any  $\phi$ .

**Remark 0.43.** *It is possible to generalize the situation by considering that, instead of a cluster  $C$ , a probability distribution  $p(x)$  over  $x$  is given. In this case, the center of the distribution is defined as the minimizer of the expression:*

$$D_\phi[p : \eta] = \int D_\phi[x : \eta] p(x) dx.$$

Thus, the center is simply the expectation of  $x$  for any  $\phi$ , given by:

$$\eta_p = \int xp(x) dx.$$

Next step is to propose an algorithm that classifies patterns into clusters based on their centers. This approach, known as the  **$k$ -means clustering algorithm**, iteratively refines the cluster centers to minimize variance within each cluster and better represent the data structure. It can be summarized in the following steps:

1. **Initial Step:** Choose  $m$  cluster centers  $\eta_1, \dots, \eta_m$  arbitrarily such that they are all different.

2. **Classification Step:** For each  $x_i$ , calculate the  $\phi$ -divergences to the  $m$  cluster centers. Assign  $x_i$  to cluster  $C_h$  that minimizes the  $\phi$ -divergence:

$$x_i \in C_h : D_\phi[x_i : \eta_h] = \min_j \{D_\phi[x_i : \eta_j]\}.$$

Thus, new clusters  $C_1, \dots, C_m$  are formed.

3. **Renewal Step:** Calculate the  $\phi$ -centers of the renewed clusters, obtaining new cluster centers  $\eta_1, \dots, \eta_m$ .
4. **Termination Step:** Repeat the above procedures until convergence.

It is known that the procedures terminate within a finite number of steps, giving a good clustering result, although there is no guarantee that it is optimal.

## Conclusion and Remarks

In this manuscript, we focus on particular concepts of geometry and probability, namely information geometry. However, there is a long list of geometric structures that can be used or adapted to deeper notions in probability and statistics structures. A non exhaustive list of these connections includes: support vector machine, Hessian structures, time series, classification of a Stochastic process, clustering, geometric deep learning, deformed entropy, cross-entropy, relative entropy among others. More applications and recent research on the subject can be found in the series of book on *geometric science information* and in the link <https://franknielsen.github.io/GSI/>

## Conflict of interest

We, the authors, declare that we do not have any type of *conflict or interest* in the research for this work.

## Author contributions

This project's conception and development were a joint effort by both authors, who also worked together to write and revise the manuscript.

## References

- Amari, S.-i., & Cichocki, A.** (2010). Information geometry of divergence functions. *Bulletin of the polish academy of sciences. Technical sciences*, **58**(1), 183–195.
- Amari, S.-i., & Nagaoka, H.** (2000). *Methods of information geometry* (Vol. 191). American Mathematical Soc.
- Ay, N., Jost, J., Vân Lê, H., & Schwachhöfer, L.** (2017). *Information geometry* (Vol. 64). Springer.
- Betancourt, M.** (2013). A general metric for riemannian manifold hamiltonian monte carlo. In *International conference on geometric science of information* (pp. 327–334).
- Calin, O., & Udriște, C.** (2014). *Geometric modeling in probability and statistics* (Vol. 121). Springer.
- Garatejo Escobar, O. C.** (2024). *Estructura dual en modelos estadísticos sobre productos warped* (Unpublished doctoral dissertation). Universidad Nacional de Colombia.
- Heyde, C. C.** (1997). *Quasi-likelihood and its application: a general approach to optimal parameter estimation*. Springer.
- Jeffreys, H.** (1946). An invariant form for the prior probability in estimation problems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, **186**(1007), 453–461.

- Jost, J., & Jost, J.** (2008). *Riemannian geometry and geometric analysis* (Vol. 42005). Springer.
- Kolp, M., Snoeck, M., Vanderdonckt, J., & Wautelet, Y.** (2019). An overview of scientific areas in research challenges in information science. *International Conference on Research Challenges in Information Science*, **13**(0), 1–5.
- Li, M., Sun, H., & Peng, L.** (2022). Fisher–rao geometry and jeffreys prior for pareto distribution. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, **51**(6), 1895–1910.
- Ly, A., Marsman, M., Verhagen, J., Grasman, R. P., & Wagenmakers, E.-J.** (2017). A tutorial on fisher information. *Journal of Mathematical Psychology*, **80**(0), 40–55.
- Nielsen, F.** (2020). *An elementary intrduction to information geometry*, sony computer science laboratories inc. Japan, MDPI Journal.
- Nielsen, F.** (2022). The many faces of information geometry. *Not. Am. Math. Soc.*, **69**(1), 36–45.
- Rao, C. R.** (1992). Information and the accuracy attainable in the estimation of statistical parameters. In *Breakthroughs in statistics: Foundations and basic theory* (pp. 235–247). Springer.
- Sakamoto, M., & Matsuzoe, H.** (2015). A generalization of independence and multivariate student’s-t-distributions. In *International conference on geometric science of information* (pp. 740–749).
- Shima, H.** (2007). *The geometry of hessian structures*. World Scientific.
- Snoussi, H., & Mohammad-Djafari, A.** (2003). Information geometry and prior selection. In *Aip conference proceedings* (Vol. 659, pp. 307–327).
- Stoltz, G., Rousset, M., et al.** (2010). *Free energy computations: A mathematical perspective*. World Scientific.

## Matemáticas

### Ensayo

# Galois, Riemann y Felisberto. Fragmentos de un arte de la ambigüedad en la narrativa temprana

## Galois, Riemann, and Felisberto. Fragments of ambiguity in the early narrative

✉ Fernando Zalamea

Departamento de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

### Resumen

Presentamos algunas conexiones entre las obras matemáticas de Galois (1811-1832) y de Riemann (1826-1866) y la narrativa de Felisberto Hernández (1902-1964). Alrededor de la “teoría de la ambigüedad” propuesta por Galois en su carta testamentaria (1832) y de la “teoría de ramificaciones” ofrecida por Riemann en su tesis doctoral (1851), proyectamos las multiplicidades de la conceptualización matemática sobre las variedades de la invención imaginaria en Felisberto. Las herramientas de los dos grandes maestros *sine qua non* de la matemática moderna ofrecen nuevas perspectivas para recorrer el *ars inventendi* de Felisberto. Utilizamos esos enlaces para leer, con ojos “otros”, fragmentos de *Fulano de tal* (1925), *Libro sin tapas* (1929), *La cara de Ana* (1930) y *La envenenada* (1931).

**Palabras clave:** Felisberto Hernández, Galois, Riemann, literatura, matemáticas, ambigüedad, ramificación.

### Abstract

We present some connections between the mathematical work of Galois (1811-1832) and Riemann (1826-1866), and the narrative of Felisberto Hernández (1902-1964). Using Galois’s “ambiguity theory” (1832) and Riemann’s “ramification points” (1851), we offer an analysis of Felisberto’s literature. We then read with “new eyes” *Fulano de tal* (1925), *Libro sin tapas* (1929), *La cara de Ana* (1930), and *La envenenada* (1931).

**Keywords:** Felisberto Hernández, Galois, Riemann, literature, mathematics, ambiguity, ramification.

### Espirales y vórtices

En su *Borrador General* (1798-1799), Novalis anotaba que la poesía requiere exactitud, mientras la matemática requiere plasticidad<sup>1</sup>. Alrededor de ese borde borroso<sup>2</sup> –*ambiguo*–

<sup>1</sup> El *Allgemeines Brouillon* (*Borrador General*, Materiales para la Enciclopedia, 1798-1799, trad. española en Novalis, *La Enciclopedia*, Caracas/Madrid: Fundamentos, 1976) debe ser considerado como una de las *summas* mayores de la inteligencia en Occidente. Novalis menciona cómo el “álgebra es poesía, el sentido rítmico, genio” (382), “el contacto es a la vez separación y conexión” (295), “una filosofía de la fermentación, de la combustión negativa” genera “una teoría de la secreción” (130), “la separación entre poeta y pensador es sólo aparente – para desventaja de ambos” (717), existe una “simultaneidad del pensar y no pensar” (769), “toda ciencia será poesía” (684) [los numerales envían a la disposición de los aforismos en la traducción inglesa, Novalis, *Notes for a Romantic Encyclopedia*, Albany: SUNY Press, 2007]. A lo largo de este artículo veremos cómo el espíritu abierto de Novalis se materializa vía una *teoría de la ambigüedad* que recogen Galois, Riemann y Felisberto.

<sup>2</sup> Lo estático debe extenderse a lo dinámico, lo positivo a lo negativo, lo absoluto a lo relativo, lo racional a lo imaginario. La idiosincrásica puntuación misma de Novalis (guiones constantes, paréntesis no cerrados a derecha) invita a la *apertura*. En particular, el *tránsito hacia lo negativo* –que puede verse autorreflexivamente como una suerte de *diagonal* de la razón– constituye uno de los fundamentos mayores de la invención. El surcar una *umbral* es prerrequisito de novedad, de conquista parcial de lo desconocido. Allende un entorno acotado, luminoso, de aguas cristalinas –desviación propia de la filosofía analítica– la inmersión en lo oscuro, fantasmal y *enlodado* –exaltación propia de un Felisberto– se convierte en el *proceso natural* de extensión de la razón requerido para explorar la complejidad del mundo.

**Citación:** Zalamea F. Galois, Riemann y Felisberto. Fragmentos de un arte de la ambigüedad en la narrativa temprana. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49(193):872-897, octubre-diciembre de 2025. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.3302>

**Editor:** Clara Helena Sánchez

**\*Correspondencia:**

Fernando Zalamea;  
[fernandozalamea@gmail.com](mailto:fernandozalamea@gmail.com)

**Recibido:** 25 de septiembre de 2025

**Aceptado:** 11 de noviembre de 2025

**Publicado en línea:** 3 de diciembre de 2025



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

entre razón y sensibilidad (la “razonabilidad”<sup>3</sup> según Vaz Ferreira, 1908-1910), entre exactitud y plasticidad, entre orden y libertad, se sitúan algunas de las expresiones mayores de la creatividad. Dentro de esa mediación entre matemática y poesía, Florenski, tal vez el último genio universal de la modernidad, indica en sus *Poesías* (1900-1907) cómo “nos hala con una sonrisa caritativamente falsa, algo fluctuante, una teoría de espíritus nebulosos”<sup>4</sup>; “las tinieblas se espesan y, pegándose a nosotros, llegan los esqueletos (...) estrujándose en espirales cada vez más cercanas”<sup>5</sup>; “los días se escapan (...) rasgados por vórtices”<sup>6</sup>. Una geometría de espirales y vórtices gobierna los linderos borrosos de la creatividad.

A lo largo de la inmensa empresa de los *Cuadernos* (1894-1945)<sup>7</sup>, Valéry explora con minuciosidad las múltiples ramificaciones del acto creativo. El entorno *horótico*<sup>8</sup> de la invención queda patente en los comentarios de Valéry sobre las “deformaciones espontáneas”<sup>9</sup> de lo creativo, sobre cómo “el desorden es esencial para la creación”<sup>10</sup>, sobre las “penumbras”<sup>11</sup> asociadas a la “libertad del sistema de nuestro espíritu”<sup>12</sup>. El sistema resulta ser altamente inestable, y, precisamente gracias a ello, permite generar ricas invenciones: “La mente que produce parece (...) buscar el imprimir a su obra caracteres completamente opuestos a los suyos propios. Parece huir en una obra de inestabilidad, incoherencia, inconsecuencia, que se reconocen y que constituyen su régimen más frecuente”<sup>13</sup> – “La inestabilidad, la incoherencia, la inconsecuencia (...), que suponen molestias y límites en su empresa de construcción o de composición bien ordenada, son igualmente tesoros de posibilidades”<sup>14</sup>. En ese sistema complejo, la matemática y la poesía se convocan, como lo aseveraban Novalis y Florenski, y como lo expresa paradójicamente Valéry: “Si el lógico nunca pudiera ser más que lógico, no sería y no podría ser lógico, y si el otro únicamente fuera poeta, sin la menor esperanza de abstraer y razonar, no dejaría tras él ninguna huella poética”<sup>15</sup>.

Proponemos en este artículo seguir estas pistas de Valéry y mostrar cómo un entendimiento de la teoría matemática de la ambigüedad, creada por los dos matemáticos mayores del siglo XIX, Galois y Riemann, redonda en un entendimiento novedoso de la narrativa de Felisberto Hernández. La Sección 1 presenta brevemente a Galois y a Riemann para lectores no matemáticos. La Sección 2 acerca la teoría matemática de la ambigüedad

<sup>3</sup> “Razonabilidad” resulta ser el pegamiento de los extremos del péndulo “razón” y “sensibilidad”. Cfr. Carlos Vaz Ferreira, *Lógica viva. Moral para intelectuales* (1908-1910), Caracas: Biblioteca Ayacucho, 1979.

<sup>4</sup> “En las alturas” (1904), en: Pavel Florenskij, *Poesie* (1900-1907) (ed. Coco), Milano: Aragno, 2024, p. 79.

<sup>5</sup> “Danzas macabras” (1904), *ibid.*, p. 85.

<sup>6</sup> “Beethoveniana” (1904), *ibid.*, p. 113.

<sup>7</sup> Se trata de una obra monumental (cerca de 27.000 páginas), que puede considerarse como una de las grandes hazañas del pensamiento reflexivo de todos los tiempos. Contamos con las siguientes versiones de los *Cuadernos*: Paul Valéry, *Cahiers* (facsimilar íntegro), París: CNRS, 29 vols., 1957-1961; Paul Valéry, *Cahiers* (selección anotada por Judith Robinson), París: Gallimard (“Bibliothèque de la Pléiade”), 2 vols., 1973-1974; Paul Valéry, *Cahiers 1894-1914*, XIII vols. (eds. Nicole Celeyrette-Pietri, Judith Robinson-Valéry), París: Gallimard, 1987-2016. Entre lo  *sintético* (facsimilar íntegro del CNRS) y lo  *analítico* (indexación de la *Pléiade*), las dos visiones complementarias de los *Cuadernos* resultan fundamentales. Ha aparecido una cuidada selección en español: Paul Valéry, *Cuadernos (1894-1945)* (ed. Andrés Sánchez), Barcelona: Galaxia Gutenberg, 2007.

<sup>8</sup> Neologismo (Perry, Zalamea, 2010), proveniente de *horos* (en griego, frontera, borde). Como veremos, la narrativa de Felisberto vive permanentemente en el *horos*.

<sup>9</sup> “La invención estética” (1938), en: Paul Valéry, *Teoría poética y estética* (c. 1920-1940), Madrid: La Balsa de la Medusa, 1990, p. 183.

<sup>10</sup> *Ibid.*

<sup>11</sup> “Primera lección del curso de poética” (1937), *ibid.*, p. 109.

<sup>12</sup> *Ibid.*, p. 110.

<sup>13</sup> *Ibid.*, p. 108.

<sup>14</sup> *Ibid.*, p. 109.

<sup>15</sup> “Poesía y pensamiento abstracto” (1939), *ibid.*, p. 71.

con la narrativa “ambigua” de Felisberto. La Sección 3 revisa los entornos de vida del joven Felisberto (1915-1925), donde se fragua su peculiar mirada. Las Secciones 4 a 7 estudian en detalle algunos fragmentos de la narrativa temprana de Felisberto: *Fulano de tal* (1925), *Libro sin tapas* (1929), *La cara de Ana* (1930) y *La envenenada* (1931), acentuando lecturas provenientes de la teoría matemática de la ambigüedad galoisiana y riemanniana.

## 1. Galois y Riemann, maestros de la matemática moderna (1830-1860)

Évariste Galois (Francia, 1811-1832) puede considerarse el epítome del genio matemático romántico, muerto muy joven<sup>16</sup> en un trágico duelo por amor, y capaz de cambiar enteramente el panorama de la matemática. La revolución de Galois es tajante. Al plantear nuevas dialécticas en el tratamiento de las ecuaciones algebraicas –*múltiples ecuaciones* vs. una ecuación dada, *relacionalidad cualitativa* vs. operatoria cuantitativa, *raíces en su conjunto* vs. raíces aisladas, *irresolubilidad* vs. solución, *potencial* vs. actual, *negativo* vs. positivo, *transformable* vs. determinado, *mediado* vs. aislado, *estructurado* vs. singular, *exterior* vs. interior, *ruptura de simetría* vs. simetría–, y al acentuar en estas pendularidades los términos a la izquierda, la matemática se abre a un espectro enteramente original<sup>17</sup>. Para poder hacer matemáticas profundas, Galois expresa su credo fundamental: “Saltar a pies juntillas sobre los cálculos, agrupar las operaciones, clasificarlas según sus dificultades y no según sus formas; tal es, a mi parecer, la misión de los geómetras futuros”<sup>18</sup>. La “paradoja” de hacer matemáticas sin cálculos sorprenderá tal vez al literato, pero la revolución galoisiana consiste precisamente en entender las matemáticas vía estructuras cualitativas (grupos, campos, dualidades), en detrimento de cálculos cuantitativos (aproximaciones, acotaciones, desigualdades). El “análisis del análisis” y la conciencia de las *limitantes del entendimiento* –“se encontrará a menudo la fórmula «no lo sé»”, “el libro más preciado del más sabio sería aquel donde diría todo lo que no sabe”<sup>19</sup>– enfatizan la revolución metodológica galoisiana.

La dinámica *conceptual* de la teoría de Galois se articula alrededor de cuatro procesos centrales: (i) reconocer *estructuras* (campos, extensiones; grupos, descomposiciones normales) y *operaciones* (suma, multiplicación, división; adjunción, simetría, racionalidad); (ii) estudiar las *dualidades, transformaciones e invarianzas* asociadas a esas operaciones sobre estructuras; (iii) aprovechar el *revés* y las *dialécticas inversas* emergentes (construcción de rupturas de simetría, vía la función auxiliar  $V$ ; descomposición con índices minimales, vía subgrupos normales maximales; elaboración de teoremas de limitación, vía irresolubilidad algebraica; representación lineal de lo aritmético/algebraico/análítico/geométrico, vía el grupo modular); (iv) *convertir obstrucciones/ambigüedades en objetos matemáticos* (usualmente grupos). Este último proceso constituye lo que Galois denomina la “Teoría de la Ambigüedad”: “Se trata de ver *a priori* en una relación entre

<sup>16</sup> En contraste con la literatura, que alcanza tal vez sus mayores logros con la madurez expresiva de la edad (Proust, Musil, Borges, por ejemplo), la matemática se beneficia en cambio de un cierto *talante revolucionario*, que se da con mayor frecuencia en una juventud dispuesta al quiebre (Galois, Riemann, Hilbert, Gödel, Grothendieck, por ejemplo).

<sup>17</sup> Para breves presentaciones conceptuales de la obra de Galois, ver, por ejemplo, Fernando Zalamea “La emergencia abismal de la matemática moderna. (I) Galois (1811-1832)”, *Mathesis* IV (1) (2019): 1-23, y Fernando Zalamea, *Modelos en haces para el pensamiento matemático*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2021, pp. 61-65, 103-108, 138-142, 185-188. Para las obras completas de Galois, ver Évariste Galois, *Écrits et mémoires mathématiques* (eds. Bourge, Azra), París: Jacques Gabay, 1997 (1ª ed. 1962). Para una presentación histórica precisa, ver Caroline Herhardt, *Évariste Galois. La fabrication d'un icône mathématique*, París: EHESS, 2011.

<sup>18</sup> Galois, *Écrits et mémoires mathématiques, op. cit.*, [79b]. Las referencias entre corchetes cuadrados remiten a la paginación [Xy] de los *Manuscrits* (Ms 2108), en la Bibliothèque del Institut de France (ahora disponibles en red).

<sup>19</sup> *Ibid.*

cantidades o funciones trascendentes cuáles cambios pueden hacerse, cuáles cantidades pueden substituirse a las cantidades dadas sin que la relación deje de tener lugar. Esto permite reconocer de inmediato la imposibilidad de muchas expresiones que pudiesen buscarse<sup>20</sup>. En el caso específico de las “cantidades” algebraicas, se tiene que las raíces de un polinomio irreducible sobre un campo  $K$  se pueden substituir entre ellas, sin que las relaciones de simetría entre las raíces dejen de tener lugar<sup>21</sup>. Por tanto, las raíces son *indiscernibles* a los ojos de  $K$ , acentuando su carácter *ambiguo, negativo, obstructivo*. Las substituciones entre las raíces (es decir, los focos de *invisibilidad* a los ojos de  $K$ ) generan el grupo de Galois del campo de descomposición, grupo que se convierte así en una suerte de *medidor/mediador de las obstrucciones* en el conocimiento de las raíces. El *vaivén inverso entre ambigüedad y discernibilidad* determina las tensiones mayores de la teoría: *ascenso en campos* –raíces ambiguas sobre la base, que adquieren una progresiva discernibilidad en las adjunciones– y *descenso en grupos* –grupo de Galois ambiguo global, que adquiere una progresiva discernibilidad en su descomposición normal–.

“La belleza y a la vez la dificultad de la teoría”<sup>22</sup> se expresan con fuerza en esa teoría de la ambigüedad (**Figura 1**) que *media* entre las grandes dialécticas introducidas<sup>23</sup>: vaguedad vs. precisión, plasticidad vs. estabilidad, *verso* vs. *recto*. En esa mediación se observa cómo la matemática va *mucho más allá* de lo demostrativo, lo tautológico, lo bien ordenado, y cómo necesita también un *denso imaginario, ambiguo, plástico, analógico*. Más aún, en la emergencia misma de la creatividad esa contraparte “oscura” resulta ser prioritaria, pues, como lo observara André Weil, uno de los fundadores de Bourbaki, “nada es más fecundo, lo saben todos los matemáticos, que esas oscuras analogías, esos reflejos turbios de una teoría en otra, esas caricias furtivas, esas inexplicables contrariedades”<sup>24</sup>. La analogía, el reflejo, la caricia se *potencian* mediante el encuentro con lo oscuro, lo turbio, lo contrario. El *arkhê* –simultáneamente comienzo (*arkhō*) y comando (*arkhên*)– gobierna el entendimiento desde una profundidad aparentemente inescrutable, que, no obstante, puede ser conquistada. La potenciación de la creatividad se consigue entonces mediante una *observación fina de la oscuridad*, desbrozada por el *grupo de transformaciones de los indiscernibles*. El arsenal de contrapuntos, deslices e inversiones de Galois se urde así sobre el subyacente entrecruzamiento abismal de Novalis.

Bernhard Riemann (Alemania, 1826-1866) conforma junto con Galois la base del pensamiento matemático moderno, y es sin duda el matemático más influyente del siglo XIX<sup>25</sup>. Posiblemente el mayor geómetra de todos los tiempos, al ocuparse de las *ecuaciones diferenciales* Riemann inventa –casi de la nada– la geometría de las variedades *complejas* (superficies de Riemann, teorema de representación conforme, teorema de uniformización), las variedades *diferenciales* (geometría “riemanniana”, tensores, formas diferenciales), las variedades *algebraicas* (dimensiones holomorfas y meromorfas, teorema de Riemann-Roch, integrales abelianas), las variedades *numéricas* (números complejos,

<sup>20</sup> *Ibid.*, [11a].

<sup>21</sup> Ejemplo fundamental: el polinomio  $X^2 - 2$  posee dos raíces indistinguibles sobre los números racionales ( $\sqrt{2}$ ,  $-\sqrt{2}$ ), que pueden intercambiarse a voluntad desde el punto de vista del álgebra del polinomio. Esto da lugar a una *ambigüedad* entre las raíces, una “obstrucción de visibilidad” ante los “ojos ciegos” (Tarkovski) del campo racional ( $K = \mathbb{Q}$ ), y a dos automorfismos naturales en la extensión  $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$  sobre  $\mathbb{Q}$ : la identidad y la inversión ( $\sqrt{2} \rightarrow -\sqrt{2}$ ). Estas dos transformaciones conforman el *Grupo de Galois* de la extensión: precisamente *gracias a la ambigüedad, a la obstrucción, a la indiscernibilidad*, es cómo surge una estructura matemática que gobierna la situación.

<sup>22</sup> *Ibid.*, [59b].

<sup>23</sup> Valéry capta muy bien la dialéctica entre lo ambiguo y lo discernible: “Todo acto del espíritu mismo está siempre acompañado de cierta atmósfera de indeterminación más o menos sensible”, *cfr.* Valéry, *Teoría poética y estética*, *op. cit.*, p. 107.

<sup>24</sup> André Weil, “De la métaphysique aux mathématiques”, *Sciences* 60 (1960): 52-56, cita, p. 53.

<sup>25</sup> Las referencias a Galois y a Riemann siguen siendo aún hoy en día (2025) las más extensas en la *Mathematics Subject Classification* de la American Mathematical Society.

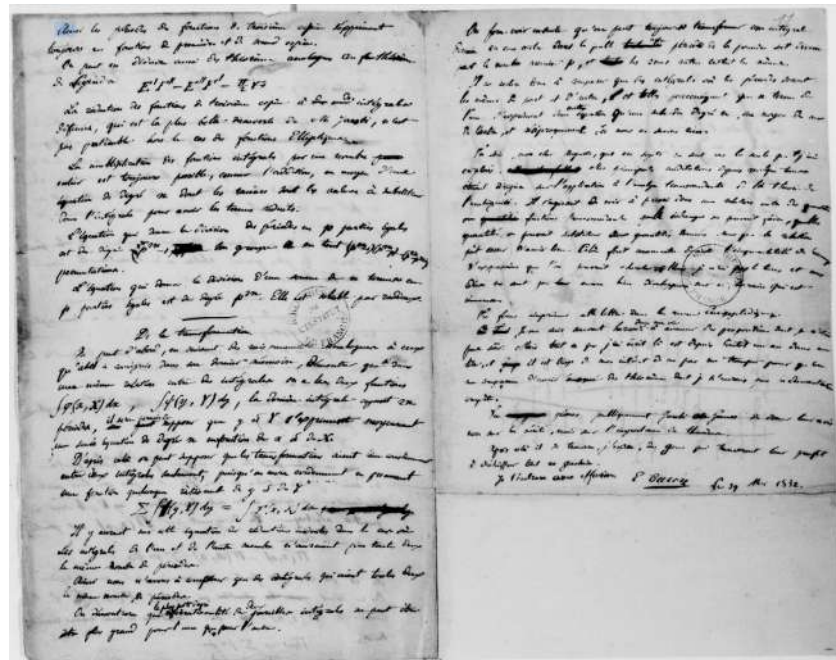


Figura 1. La teoría de la ambigüedad en Galois (1832) [10b, 11a]

función Zeta, hipótesis de Riemann)<sup>26</sup>. Con Galois y Riemann<sup>27</sup> pueden (i) observarse los *fondos románticos* del pensamiento matemático moderno, (ii) estudiarse las transiciones matemáticas de ese pensar y sus *abismos contradictorios*, (iii) calibrar nuevas formas de *hacer matemáticas*, (iv) registrar algunos momentos cruciales en la *emergencia de la creatividad matemática*, asociados a una tipología/topología “no estándar” (*negación, oscuridad, puntos ciegos*). Con Riemann, en particular, se obtienen concreciones notables de los temas (i)-(iv): *tránsito abismal* de las superficies de Riemann, *armonía negativa* de las funciones (meromorfas) de variable compleja, *sitios de estratificación local-global* (continuación analítica, transformaciones conformes, geometría riemanniana), enlaces entre *corazones profundos* del hacer matemático (teoría de números, variable compleja, geometría algebraica). Resaltan en su obra lo multivalente y lo multidimensional, lo representable y lo proyectable, lo plástico y lo armónico, lo suave y lo cualitativo.

Llamaremos “armonía negativa” la *red de motivos y variaciones que lleva de ciertas negatividades/obstrucciones a correspondientes armonías/tránsitos*. Se trata de una *fundamentación abismal* de las matemáticas, que vimos prefigurada en Novalis y que

<sup>26</sup> Para breves presentaciones conceptuales de la obra de Riemann, ver, por ejemplo, Fernando Zalamea, “Géométrie, Topologie, Riemann, et les nuances vivantes de la pensée mathématique chez Bachelard (avec un contrepoint autour de Simone Weil)”, *Bachelard Studies* 2022 (1-2) : 69-78, y Zalamea, *Modelos en haces...*, *op.cit.*, pp. 65-72, 103-108, 142-145, 188-193. Para las obras completas de Riemann, ver Bernhard Riemann, *Oeuvres mathématiques*, Paris: Jacques Gabay, 1990 (1ª ed. 1898). Para una presentación histórica precisa, ver Detlef Laugwitz, *Bernhard Riemann 1826-1866. Turning Points in the Conception of Mathematics*, Boston: Birkhäuser, 2008 (1ª ed. 1999). Para la mejor comprensión filosófica conjunta de Galois y Riemann en los albores conceptuales de la matemática moderna, ver Albert Lautman, *Ensayos sobre la dialéctica, estructura y unidad de las matemáticas modernas (1935-1942)* (ed. Zalamea), Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011. Aún hoy (2025), la *Hipótesis de Riemann* (1859) sigue siendo considerada como el problema abierto más profundo de la matemática moderna y contemporánea.

<sup>27</sup> Riemann no alcanzó a conocer la obra de Galois, que se publicó póstuma catorce años después de la muerte del joven francés (Liouville, 1846) y sólo empezó a ser plenamente apreciada en sus reformulaciones posteriores (Dedekind, 1858; Jordan, 1870).

adquiere en Riemann una de sus expresiones más profundas. La razón –*Grund*, ínsita en los *Grundlagen*<sup>28</sup>– se fundamenta en el abismo –*Abgrund* (idea básica que retomará Heidegger)–. Para Riemann, como lo será más tarde para Florenski<sup>29</sup>, la *antinomia* es el abismo mismo que impulsa el pensamiento: “Los sistemas conceptuales de la antítesis son precisamente conceptos determinados mediante *predicados negativos*, pero no son representables positivamente. Justamente por eso (...) se puede construir un sistema conceptual situado dentro de lo *representable* que se transforma en el sistema dado por *pura variación de las relaciones de magnitud*” (c. 1853)<sup>30</sup>. La matemática riemanniana procede en efecto *a través de teoremas de representación* que permiten transformar obstrucciones (negativas) en tránsitos (positivos).

La Tesis Doctoral de Riemann (1851)<sup>31</sup> es uno de esos raros “milagros” de la matemática que abren campos enteramente nuevos para la invención. La primera aparición “milagrosa” en la Tesis ocurre muy rápido, cuando el joven (a la sazón con 26 años) describe la emergencia de sus *superficies*, y responde de manera precisa a la dialéctica genérica de *cómo pegar continuamente lo múltiple en lo uno*. Las superficies aparecen en el §5, donde Riemann *estratifica* el dominio de definición de una relación algebraica  $r(z,w) = 0$  entre dos variables complejas  $z, w$ , e incluye varias copias *superpuestas* del dominio de  $z$ , de tal manera que los eventuales valores *múltiples*  $(z,w_1), \dots, (z,w_n)$  satisfechos en la relación puedan entenderse como valores únicos  $(z^{(1)}, w_1), \dots, (z^{(n)}, w_n)$  cuando se recorren las distintas copias  $z^{(i)}$  superpuestas del dominio. Las “superficies superpuestas” se entroncan unas con otras cuando la *multivalencia se reduce*, es decir, cuando algunas raíces de la ecuación  $r(z,w) = 0$  coinciden. En ese caso, tenemos lo que se llaman “puntos de ramificación”. El estudio de las superficies de Riemann se va a concentrar entonces en *ramificaciones y circulaciones* del saber. En el §14 Riemann muestra que el carácter singular de los puntos de ramificación (cuyas expresiones *meromorfas* locales incluyen términos de la forma  $z^{-n/m}$ ) puede obviarse desde el *punto de vista global* de las “superficies superpuestas”, y demuestra cómo el tránsito geométrico en los puntos de ramificación resulta *holomorfo* desde esa perspectiva global (de hecho, una parametrización adecuada alrededor de los puntos de ramificación asegura que lo “coincidente” se “pegue”: términos de Riemann). El acorde continuo así conseguido, partiendo de singularidades locales, constituye una *profunda inversión* matemática. La fluidez y la *lisura* obtenidas gracias a una estructura geométrica y topológica que *invierte una aparente debilidad en fortaleza* constituyen una notable consecución técnica dentro de los pares dialécticos uno/múltiple y continuo/discontinuo. Las superficies de Riemann concretan entonces uno de los mayores sueños de la filosofía griega: por un lado, lo *múltiple* (relación) se torna *uno* (superficie); por otro lado, el *tránsito continuo* entre lo uno y lo múltiple se controla con precisión (puntos de ramificación).

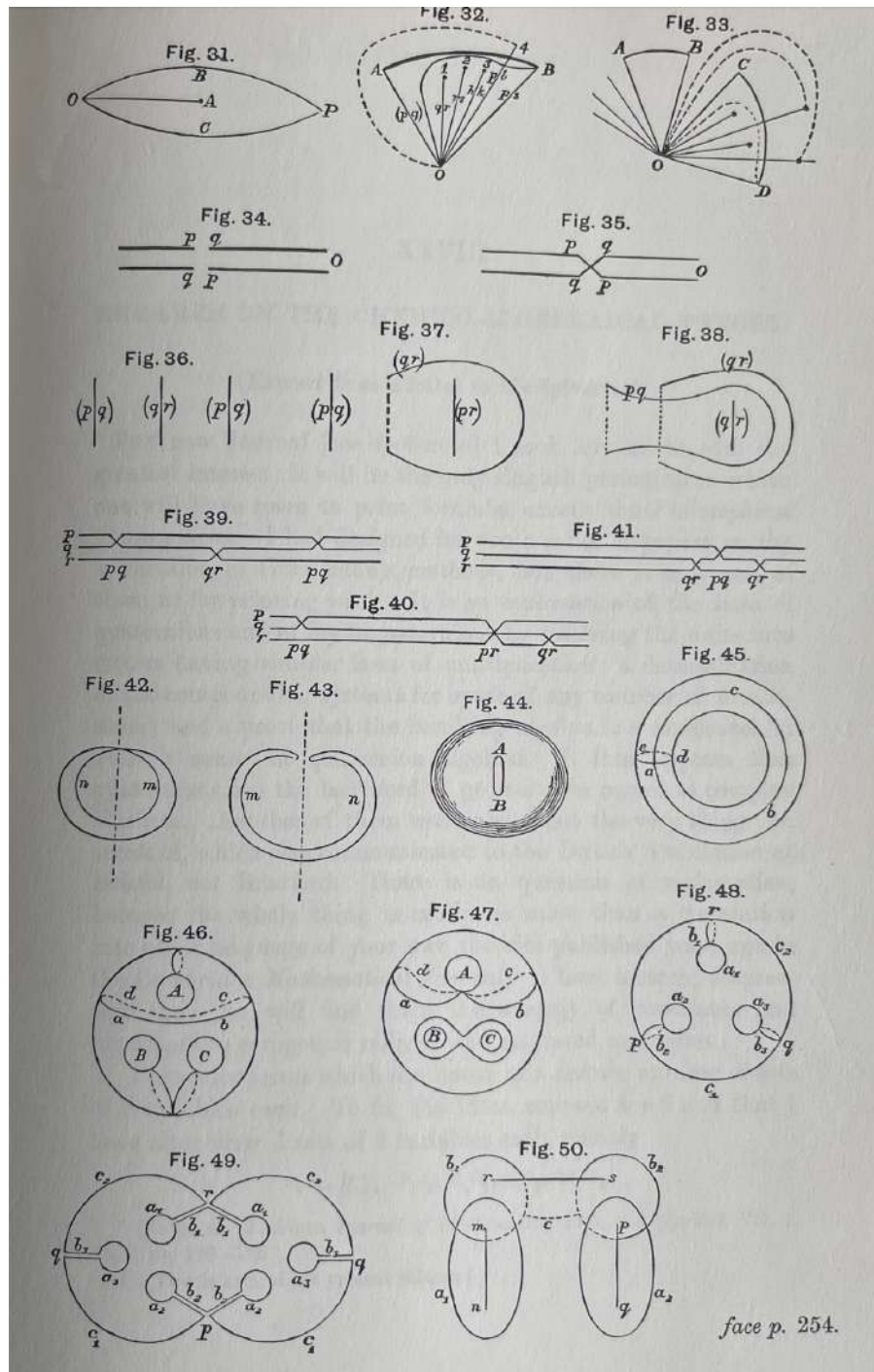
La Tesis introduce muchas otras *inversiones fundamentales* en el entendimiento geométrico *global* de la variable compleja (**Figura 2**), donde ciertos procesos específicos (disección, representación, suavización, conformización) transforman objetos *geométricos*, situados en un *primer nivel arquetípico*, en objetos *analíticos*, situados en un *segundo nivel regulatorio*, que permiten resolver los problemas principales de la teoría. De manera aún más precisa, diversos párrafos de la Tesis exhiben notables resoluciones *locales* correspondientes a *fondos armónicos negativos*, por medio de formas duales esenciales del proceder matemático (factorizaciones y ramificaciones, derivaciones e integraciones). El

<sup>28</sup> Tesis Doctoral de Riemann (*Grundlagen für eine allgemeine Theorie der Functionen einer veränderlichen complexen Grösse; Fundamentos para una teoría general de las funciones de variable compleja*), 1851.

<sup>29</sup> Cfr. Pavel Florenskij, *Ai confini dei mondi* (1904-1914) (ed. Coco), Milano: Aragno, 2023; Pavel Florensky, *La perspective inversée suivie de L'Iconostase* (1919-1922), Lausanne: L'Age d'Homme, 1992; Pavel Florenskij, *Gli immaginari in geometria. Estensione del dominio delle immagini bidimensionali nella geometria* (1922) (eds. Oppo, Spano), Milano: Mimesis, 2021.

<sup>30</sup> Bernhard Riemann, *Riemanniana selecta* (ed. Ferreirós), Madrid: CSIC, 2000, p. 98, nuestros énfasis.

<sup>31</sup> Riemann, *Oeuvres mathématiques, op. cit.*, pp. 1-60.



**Figura 2.** Hojas y ramificaciones en una superficie de Riemann, según Clifford (1877).  
 William Kingdon Clifford, “On the Canonical Form and Dissection of a Riemann’s Surface” (1877), en: William Kingdon Clifford, *Mathematical Papers*. New York: Chelsea, 1968 (1ª ed. 1882), pp. 241-255. Para conexiones interesantes entre Clifford y Borges, orientadas a entender temas borgesianos que también pueden verse como felisbertianos –disolución de lo singular e inmersión en el entorno, vaivén pendular entre macrocosmos y microcosmos, visión de estratos y capas del saber a lo largo de sombras y penumbras, alcance de mixturas alternativas, comprensión de variedades materiales en la dialéctica uno-múltiple–, ver Fernando Zalamea, “Estratificaciones de lo invisible. Borges y Clifford”, *Variaciones Borges*, por aparecer (2026).

resultado provee un entramado sofisticado de *teoremas abstractos de representación que luego se subespecifican a los contornos cualitativos de los problemas en cuestión*: toda una nueva forma de *pensar y hacer* matemáticas, que tendrá gigantescas consecuencias en el desarrollo posterior de la disciplina.

## 2. Felisberto Hernández, la teoría matemática de la ambigüedad y la crítica

De acuerdo con el breve recuento que hemos presentado de temas centrales en las obras de Galois y Riemann, pueden resaltarse algunas características de la *teoría matemática de la ambigüedad* –pendularidades y dialécticas, limitantes del entendimiento y estructuraciones profundas, negaciones y puntos ciegos, obstáculos y transferencias, indiscernibilidades y rupturas de simetría, *versos* y *rectos*, contradicciones y abismos, multiplicidades y unidades– que tienen muy *naturales contrapartes felisbertianas*: objetualidades vivas, fantasmagorías materiales, realidades fantásticas, lógicas a la deriva, encarnaciones desencarnadas, alteridades internas, misterios concretos, disociaciones del yo, silencios escuchados, visiones perdidas, etc. En todos estos casos, ciertos *fondos antinómicos* (a la Florenski) gobiernan los entornos de los relatos. Más interesante aún, precisamente a partir de la antinomia *emerge* en la narrativa de Felisberto una estructura estética que cifra la riqueza del ambiente, *del mismo modo* como la estructura del grupo de Galois cifra la ambigüedad subyacente de las raíces de un polinomio, o como la estructura de una superficie de Riemann cifra la ambigüedad subyacente de las multiplicidades de una función de variable compleja.

Las tres categorías fenomenológicas de Peirce –primeridad: aquello “en sí”, ámbito de lo posible; segundidad: aquello “en otro”, entorno actual; terceridad: aquello “en medio”, ámbito de lo necesario<sup>32</sup> ayudan a desbrozar el panorama. El énfasis de la primeridad, de la inmediatez, de la frescura, del subconsciente, es claro en Felisberto. En un doble juego permanente entre realidad y ficción, él mismo indica en su famosa “Explicación falsa de mis cuentos” (1955) que su narrativa vive en un lindero entre conciencia rectora y libre naturalidad, en una contraposición misteriosa entre terceridad y primeridad de la que surge triunfante esta última:

Obligado o traicionado por mí mismo a decir cómo hago mis cuentos, recurriré a explicaciones exteriores a ellos. No son completamente naturales, en el sentido de no intervenir la conciencia. Eso me sería antipático. No son dominados por una teoría de la conciencia. Esto me sería extremadamente antipático. Preferiría decir que esa intervención es misteriosa. Mis cuentos no tienen estructuras lógicas. A pesar de la vigilancia constante y rigurosa de la conciencia, ésta también me es desconocida. En un momento dado pienso que en un rincón de mí nacerá una planta. [...] Ella debe ser como una persona que vivirá no sabe cuánto, con necesidades propias, con un orgullo discreto, un poco torpe y que parezca improvisado. Ella misma no conocerá sus leyes, aunque profundamente las tenga y la conciencia no las alcance. No sabrá el grado y la manera en que la conciencia intervendrá, pero en última instancia impondrá su voluntad. Y enseñará a la conciencia a ser desinteresada<sup>33</sup>.

La “explicación falsa” de Felisberto contiene elementos lúdicos, evocativas sugerencias y fragmentos de análisis. La “falsedad” se introduce al tratar de elevar a la conciencia los procesos de construcción narrativa; sin embargo, a pesar del filtro deformador y “exterior” de la reflexión, quedan importantes indicaciones sobre la forma en que surge la obra: en un mixto de organicidad, naturalidad, intuición y toques ligeros de la conciencia, crece

<sup>32</sup> Para una introducción al sistema de Peirce y sus aplicaciones a la lógica, la literatura y las artes, ver Fernando Zalamea, “Signos triádicos. Lógica, literatura, artes. Nueve cruces latinoamericanos”, *Mathesis* III.1 (2006): 1-155.

<sup>33</sup> Felisberto Hernández, “Explicación falsa de mis cuentos”, *Entregas de La Licorne* 5-6 (1955): 97.

una planta con “hojas de poesías”, que no debe recurrir a la teoría, ni a fundamentos, ni leyes, “aunque profundamente las tenga” (teoría de las hojas de una superficie de Riemann). Ese *extrañamiento* buscado de la conciencia da lugar a la peculiaridad de su narrativa, a su sorpresiva frescura y aparente inmediatez (el carácter “un poco torpe y que parezca improvisado” de la planta). Felisberto se aleja de la conciencia, pero lo hace muy conscientemente: en términos peirceanos, destaca fragmentos de primeridad sobre un fondo tercero que permanece cuidadosamente oculto.

A la aparente falta de “estructuras lógicas” de la narrativa de Felisberto, Cortázar respondería años después, al descubrirlo maravillado: “la realidad no tiene nada de lógica, Felisberto [...]”<sup>34</sup>. Creemos aquí —en cambio— que la narrativa de Felisberto sí posee estructuras lógicas profundas y que la realidad sí puede, en parte, ser captada por la lógica matemática. No la lógica rígida, clásica o escolástica, en que seguramente pensaban Felisberto o Cortázar, sino una lógica mucho más amplia: la lógica como semiótica universal peirceana, en la que se integran muchas de las extensiones y de las conquistas de la matemática contemporánea (lógica intuicionista, lógica multivaluada, lógica de los topos, lógica de los haces, lógica paraconsistente, etc.). El acercamiento literario de Felisberto a una realidad fugaz y ensoñadora es un caso único, en la literatura, de una cristalización casi pura de la primeridad peirceana. Sin embargo, esa primeridad sí cuenta con unas leyes profundas, que no necesita para crecer (como las plantas de Felisberto), pero que subyace hondamente en la terceridad que la sostiene (teoría matemática de la ambigüedad).

En la crítica felisbertiana muchos textos han insistido en la importancia de la *ambigüedad* para entender su narrativa. Las perspectivas son múltiples, pero pueden reintegrarse en un todo, de la misma manera en que los topos de Grothendieck reintegran todas las perspectivas de los haces subyacentes<sup>35</sup>. Además de los trabajos esenciales de José Pedro Díaz (1965, 2000)<sup>36</sup>, Norah Giraldi Dei Cas (1975, 1998)<sup>37</sup> y María del Carmen González de León (2022)<sup>38</sup>, que revisaremos en la Sección 3 abajo, dentro de las monografías que se ocupan con una cierta extensión de la *problemática de la ambigüedad* en Felisberto destacan los trabajos de Rosario Ferré (1986)<sup>39</sup>, Jorge Panesi (1993)<sup>40</sup>, Graciela Monges Nicolau (1994)<sup>41</sup>, Horacio Xaubet (1995)<sup>42</sup>, Julio Rosario-Andújar (1999)<sup>43</sup> y Gustavo Lespada (2014)<sup>44</sup>. Como es de esperar, ninguna de estas lecturas menciona en ningún

<sup>34</sup> Julio Cortázar, “Carta en mano propia” (1980), en: Felisberto Hernández, *Novelas y cuentos* (ed. Díaz), Caracas: Biblioteca Ayacucho, 1985, pp. ix-xiv, cita p. xiii.

<sup>35</sup> Cfr. Fernando Zalamea, *Grothendieck. Una guía a la obra matemática y filosófica*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2019.

<sup>36</sup> José Pedro Díaz, *El espectáculo imaginario. Juan Carlos Onetti y Felisberto Hernández ¿Una propuesta generacional?*, Montevideo: Arca, 1986 (incluye la semi-monografía “F.H. Una conciencia que se rehúsa a la existencia”, 1ª ed., 1965); José Pedro Díaz, *Felisberto Hernández. Vida y obra* (2000), Buenos Aires: El Cuenco de Plata, 2015.

<sup>37</sup> Norah Giraldi Dei Cas, *Felisberto Hernández. Del creador al hombre*, Montevideo: Ediciones de la Banda Oriental, 1975; Norah Giraldi Dei Cas, *Felisberto Hernández. Musique et littérature*, París: Indigo & Côté-femmes éditions, 1998.

<sup>38</sup> María del Carmen González de León, *El palimpsesto intencionado. El proyecto literario de Felisberto Hernández*, Montevideo: Quiroga Ediciones, 2022.

<sup>39</sup> Rosario Ferré, *El acomodador. Una lectura fantástica de Felisberto Hernández*, México: Fondo de Cultura Económica, 1986.

<sup>40</sup> Jorge Panesi, *Felisberto Hernández*, Rosario: Beatriz Viterbo Editora, 1993.

<sup>41</sup> Graciela Monges Nicolau, *La fantasía en Felisberto Hernández a la luz de la poética de Gaston Bachelard*, México: UNAM, 1994.

<sup>42</sup> Horacio Xaubet, *Desde el fondo de un espejo: autobiografía y (meta)ficción en tres relatos de Felisberto Hernández*, Montevideo: Linardi y Risso, 1995.

<sup>43</sup> Julio A. Rosario-Andújar, *Felisberto Hernández y el pensamiento filosófico*, New York: Peter Lang, 1999.

<sup>44</sup> Gustavo Lespada, *Carencia y literatura. El procedimiento narrativo de Felisberto Hernández*, Buenos Aires: Corregidor, 2014.

modo la matemática o la *teoría matemática de la ambigüedad galoisiana y riemanniana*, pero debe resultar claro en este momento que muchos de los temas abordados en la crítica felisbertiana especializada *resuenan naturalmente* con nuestra aproximación. En particular, la tabla siguiente (**Tabla 1**)<sup>45</sup> revela algunas *reverberaciones armónicas* entre la crítica y la *matemática*<sup>46</sup>.

La narrativa de Felisberto se exhibe en el *revés*<sup>47</sup> de la hoja de escritura. En el *verso* se circula en efecto con la enorme *libertad* de la que gusta el autor. Gracias a la *ambigüedad* de los entornos semióticos que están en juego –sintácticos: escritura “rota”; semánticos: objetos “vivos”; pragmáticos: acciones “misteriosas”–, la escritura va y viene con enorme plasticidad entre lo material y lo imaginario, entre lo cotidiano y lo fantástico.

**Tabla 1.** Contrapuntos armónicos entre la crítica felisbertiana y la teoría matemática de la ambigüedad

<b>Crítico(a)</b>	<b>Temas felisbertianos</b>	<b>Resonancias matemáticas</b>
Ferré	ambigüedad (25ss, 37ss, 53ss, 63ss) fantasía (25ss, 57ss, 66ss) misterio (32ss, 35ss)	ambigüedad (Galois) ramificación (Riemann) indiscernibilidad (Galois), puntos ciegos (Riemann)
Panesi	inadecuación (11ss, 38ss, 44ss, 98ss) materialidad desdoblada (24ss, 46ss, 106ss) memoria duplicada (28ss, 34ss, 67ss)	ascensos y descensos (Galois) vaivén entre campos y grupos (Galois) hojas duplicadas (Riemann)
Monges Nicolau	inconsciente (61ss, 91ss, 106ss) ensoñación (65ss, 75ss, 120ss) movilidad semántica (69ss, 115ss, 194ss)	estructuras invisibles (Galois, Riemann) extensiones (Galois), cubrimientos (Riemann) automorfismos (Galois), representaciones (Riemann)
Xaubet	variación musical (19ss, 80ss, 104ss) alteridad (97ss, 105ss, 110ss) dialéctica (69ss, 84ss, 116ss)	variedades algebraicas (Galois), variedades complejas (Riemann) multiplicación (extensiones de Galois y de Riemann) dualidad (grupo de Galois)
Rosario- Andújar	desconocimiento (27ss, 72ss, 47ss) <i>possibilia</i> (36ss, 89ss, 115ss) ojos “otros” (34ss, 56ss, 108ss, 113ss)	fondos oscuros (Galois, Riemann) iteración cualitativa (Galois, Riemann) armonía negativa (Riemann)
Lespada	enrarecimiento (51ss, 212ss, 253ss) recursión (98ss, 226ss, 247ss) transgresión (132ss, 159ss, 175ss)	no normalidad (Galois) uniformización (Riemann) no separabilidad (Galois)

<sup>45</sup> La Tabla señala, en la primera columna, nombres de críticos, en la segunda columna, temas de la crítica (incluyendo entre paréntesis los números de páginas y siguientes –xy(ss)– de la monografía crítica asociada), y, en la tercera columna, contrapartes con la teoría matemática de la ambigüedad galoisiana y riemanniana.

<sup>46</sup> Para un desarrollo extenso de estas consideraciones, allende el caso particular de Felisberto, ver Fernando Zalamea, *Crítica matemática*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, por aparecer (2026).

<sup>47</sup> De manera similar, según Peirce, en el *revés* de la hoja de aserción de los gráficos existenciales emerge el mundo de los posibles (lógicas modales vía el corte punteado, 1903), *cfr.* Fernando Zalamea, *Peirce’s Logic of Continuity*, Boston: Docent Press, 2012, Capítulo 8. Y, según Florenski, en el *revés* del plano complejo (2 dimensiones) se multiplican (4 dimensiones) las coordenadas del espacio-tiempo (1922), *cfr.* Florenskij, *Gli immaginari...*, *op. cit.*

Los desdoblamientos, las duplicaciones, las transgresiones permiten recorrer geometrías *flexibles*, donde lo orgánico y lo artificial se transmutan entre sí, generando una extraña sensación de desorientación. La alteridad, el inconsciente, la inadecuación, el desconocimiento, el enrarecimiento conforman un tejido de la ensoñación que se contrapone dialécticamente con el soporte material de la narración. Mediante “ojos otros”<sup>48</sup> se *ramifica* la complejidad de la vida (y de la muerte), y se exploran fantasmagóricos intersticios de la “razonabilidad”<sup>49</sup>. Las variaciones musicales y los ejercicios de la memorialística multiplican el espectro de los sentidos, y, recursivamente, se expande el espectro de los *possibilia*.

Todo ello adquiere un contrapunto natural –una “explicación plausible”<sup>50</sup>– en la *teoría matemática de la ambigüedad*. Los ascensos y descensos galoisianos entre extensiones intermedias de campos (de los racionales o de campos finitos a la Galois) desbrozan estratos de materialidad (bases) y de idealidad (extensiones), de manera similar a como Felisberto contrasta sus muebles y sus muñecas con los sentimientos humanos. Las duplicaciones, ampliaciones y ramificaciones presentes en las superficies de Riemann permiten transitar hacia lo “otro”, a través de puntos de ramificación, así como, en Felisberto, diversas circulaciones se insertan en los intersticios de lo ignoto, el “yo” se duplica, y se entrelazan rastros materiales, ficciones y metaficciones. La armonía negativa, los puntos ciegos, los fondos oscuros en los que se sumergen Galois y Riemann convocan los misterios, las fantasmagorías, las ensoñaciones de Felisberto. Las rupturas de simetría (no normalidad, no separabilidad en Galois; no conformalidad en Riemann) responden a los momentos de enrarecimiento e inadecuación en Felisberto. Las variaciones musicales en Felisberto van más allá de motivos originarios subyacentes, tal como las variedades algebraicas (Galois) y las variedades complejas (Riemann) trascienden en su multiplicidad los arquetipos de un saber matemático fijo. Todo resulta ser entonces *fluxión, plasticidad y movilidad*, en entornos polivalentes de luz, penumbra y oscuridad, donde diversos fragmentos de una *ambigüedad ramificada* enriquecen el acto creativo.

### 3. Entornos ambiguos, marginalidad y música en el joven Felisberto (1915-1925)

El primer texto de extensión importante escrito sobre Felisberto, “F.H. una conciencia que se rehúsa a la existencia” (1965)<sup>51</sup>, incluye ya algunos de los temas fundamentales de la crítica felisbertiana posterior. José Pedro Díaz abre compuertas sobre una gran variedad de perspectivas: fragmentación, impenetrabilidad, otredad, atemporalidad, rememoración, desorientación, duplicación, fantasía, fantasmagoría, objetualidad<sup>52</sup>. Todas estas resultan ser variaciones de una “ambigüedad esencial”<sup>53</sup> en la que se sumergen (a menudo, acusadamente<sup>54</sup>) los relatos. Los vaivenes de la memoria –radicados en el profundo sustrato de la juventud, ver el final de esta Sección 3– dinamizan y multiplican el espectro de los sentidos y las vivencias. Díaz revela, en la obra de Felisberto,

el drama de una conciencia que se debate en una angustiada relación con su contorno, que quiere evadirse de él, que no puede hacerlo sin que la tensión de su rechazo ilumine estéticamente su prosa, que busca un imposible paraíso infantil,

<sup>48</sup> Superando así nuestros “ojos ciegos”, en el decir de Tarkovski: “La imagen es una impresión de la verdad que nos está dada para percibir con nuestros ojos ciegos”, *cf.* Andrei Tarkovski, *Le temps scellé* (1985), París: Cahiers du cinéma, 2004, p. 123.

<sup>49</sup> Razón + Sensibilidad, siguiendo a Vaz Ferreira. Ver *Nota 3* arriba.

<sup>50</sup> Complementando así, gracias a un nuevo revés, la “Explicación falsa de mis cuentos”. Ver *Nota 33* arriba.

<sup>51</sup> Ver *Nota 36* arriba.

<sup>52</sup> Díaz, *El espectáculo imaginario...*, *op.cit.*, pp. 119, 121, 123, 124, 125, 128, 131, 132, 149, 149, 153, respectivamente.

<sup>53</sup> *Ibid.*, p. 123.

<sup>54</sup> *Ibid.*, pp. 160ss.

que niega el tiempo y cae enredado en su hebra que no porque él no quiera hilarla cesará de manar, que aspira, sin saberlo, a un tiempo anterior a los tiempos, a sumergirse en un agua tibia y adormecedora, a una apenas fetal conciencia naciente en la que todavía no se insinúe siquiera su saber de sí o de su cuerpo: una conciencia desdichada<sup>55</sup>.

Vemos aquí cómo diversas formas propias del *revés* o de la *negación* (debate, evasión, rechazo, imposibilidad, atemporalidad, desdicha) estructuran una proyección de vida sobre un subconsciente limpio (paradisíaco, tibio, naciente). No de otra manera procede la *teoría matemática de la ambigüedad* galoisiana y riemanniana: precisamente gracias a diversas *obstrucciones* (indiscernibilidad de las raíces en Galois, multiplicidad de la meromorfa en Riemann) sobre bases limpias y bien fundamentadas (números racionales o complejos) es como emergen estructuras potentes (grupos de Galois, superficies de Riemann) que logran calibrar, siguiendo una *armonía negativa*, las limitantes y los avances del saber matemático.

*Felisberto Hernández. Musique et littérature* (1998)<sup>56</sup>, la obra teórica de Norah Giraldi Dei Cas, complementa la visión entretejida, mediada, dialectizada de José Pedro Díaz. La lectura intertextual entre el músico y el escritor<sup>57</sup>, deshilvanando las fronteras de la sonoridad, la repetición, el palimpsesto, la polimodalidad<sup>58</sup>, explora el tejido polivalente de la narración musical felisbertiana –parte de la “ambigüedad” fundamental según Díaz–. Cercana a la música, la práctica literaria de Felisberto hace proliferar las variaciones, transcripciones, citas, paráfrasis<sup>59</sup>. Entre lo implícito y lo explícito –terreno de la *ambigüedad*– se entrelazan de manera compleja las figuras y los significados, generando la impresión de algo totalmente diferente y nuevo<sup>60</sup>. En un intimismo literario que convoca el impresionismo de Debussy, Felisberto retoma el *adagio* de Vaz Ferreira en *Moral para intelectuales*: “no pensar por sistemas, sino tener en cuenta las ideas”<sup>61</sup>. Las ideas sueltas, captadas por una suerte de *digitación suelta* de la escritura, rondan entonces entre las personas y los objetos con una extraña ligereza. Son también las enseñanzas que se derivan de Clemente Colling<sup>62</sup>, visto como encarnación metafórica de un tiempo fragmentario y ambivalente<sup>63</sup>. La multiplicación, la alteración, la desarticulación<sup>64</sup> de la armonía musical se reflejan en la ambigüedad de la memorialística. La polisemia, la polifonía, la polimodalidad<sup>65</sup> permiten construir enlaces ambiguos entre la música y la literatura.

La última gran monografía crítica sobre la obra de Felisberto, *El palimpsesto intencionado. El proyecto literario de Felisberto Hernández*<sup>66</sup>, de María del Carmen González de León, incide en los temas fundamentales de lo limítrofe, el abismo, la dialéctica ruptura/continuidad, la fragmentación, el misterio, y erige el palimpsesto como una figura metafórica central para cifrar la obra<sup>67</sup>. Desde el “no saber” se estimula la escritura y “lo otro” emerge naturalmente<sup>68</sup>; se produce “desde el margen”, tanto materialmente como conceptualmente<sup>69</sup>; se transgreden los niveles del “yo”<sup>70</sup>; se construye

<sup>55</sup> *Ibid.*, p. 165.

<sup>56</sup> Ver *Nota 37* arriba.

<sup>57</sup> Giraldi Dei Cas, *Felisberto Hernández. Musique et littérature*, *op.cit.*, Capítulo 2.

<sup>58</sup> *Ibid.*, Capítulos 3, 4, 5, 6, respectivamente.

<sup>59</sup> *Ibid.*, p. 43.

<sup>60</sup> *Ibid.*, p. 45.

<sup>61</sup> *Ibid.*, p. 44.

<sup>62</sup> Felisberto Hernández, *Por los tiempos de Clemente Colling*, Montevideo: González Panizza, 1942.

<sup>63</sup> Giraldi Dei Cas, *Felisberto Hernández. Musique et littérature*, *op.cit.*, p. 86.

<sup>64</sup> *Ibid.*, pp. 87, 90.

<sup>65</sup> *Ibid.*, pp. 109, 115.

<sup>66</sup> Ver *Nota 38* arriba. “Última gran monografía” a día de hoy (2025).

<sup>67</sup> González de León, *El palimpsesto intencionado...*, *op.cit.*, Capítulos 1, 3, 5, 6 y Conclusiones.

<sup>68</sup> *Ibid.*, p. 57.

<sup>69</sup> *Ibid.*, p. 58.

<sup>70</sup> *Ibid.*, p. 62.

una escritura “abierta”, sensible a la ausencia y al abismo<sup>71</sup>. Las contrapartes de estas observaciones tienen claros reflejos armónicos en la *teoría matemática de la ambigüedad*: desde fondos ciegos (Riemann) se estimula la matemática y emergen “estructuras otras” (grupos de Galois, superficies de Riemann), desde los márgenes y las obstrucciones (Galois) se elevan nuevas visiones, se transgreden los niveles de holomorfía y meromorfía (Riemann), una matemática abierta (Galois) explora armonías negativas (Riemann). En este entorno ambiguo, propiedades supuestamente “negativas” como disociación, divergencia, deformación, incorrección<sup>72</sup> alcanzan un carácter enteramente opuesto, fuente de inventividad y originalidad, tanto en Felisberto, como en Galois y Riemann.

En *Felisberto Hernández. Del creador al hombre*<sup>73</sup>, Norah Giraldi Dei Cas presenta un recuento detallado de la vida de Felisberto, en particular su infancia y adolescencia. Entre 1915 y 1925, Felisberto cuenta a la sazón entre 13 y 23 años. No es difícil rastrear allí cómo un *difuso entorno de ambigüedad* va fraguando la sensibilidad del joven: impresión extraordinaria” producida por “El Nene” tocando piano, “iniciación en la música clásica” y primer encuentro con Clemente Colling (1915)<sup>74</sup>; pianista-acompañante en las películas de cine mudo, impulsando sus dotes de improvisación y “creación espontánea”, y enlace entre su mundo íntimo y el entorno empresarial externo (1917)<sup>75</sup>; creación del “Conservatorio Hernández” en un balcón de su casa, donde da clases particulares de piano, practica incesantemente el instrumento, inicia apuntes taquigráficos y lee profusamente en paralelo, con especial atención novelas “de misterio” (1918, ¡solo tiene 16 años!)<sup>76</sup>; conocimiento de María Isabel Guerra en unas vacaciones en Maldonado, quien se convierte en su discípula de piano<sup>77</sup>, e impulsa su sensibilidad amorosa (“fui por sentimiento a ella, no por razonamiento”) (1919)<sup>78</sup>; estudios de composición y armonía con Clemente Colling (1920)<sup>79</sup>; pianista de cartel en Montevideo, conocimiento de Carlos Vaz Ferreira (filosofía de la vida, intuicionismo) (1922)<sup>80</sup>; matrimonio con María Isabel, vida en El Prado –cerca de la quinta de Vaz Ferreira– en un lugar “en cuyo aire lo real y lo fantástico jugaban una desconcertante partida ajedrecística” (1925)<sup>81</sup>, e inicio de su obra literaria (*Fulano de tal*). Como se puede observar, son una iniciación y una práctica incesante del arte del piano, con sus digitaciones profundas<sup>82</sup>, sus armonías extrañas, sus variaciones y modalidades, sus ritmos continuos o recortados, las que proveen al joven Felisberto de una *técnica precisa de la ambigüedad* –improvisación, creación espontánea, notación musical, composición, armonía, variación– que transmitirá luego a su obra literaria.

Otras lecturas detalladas de los primeros años de Felisberto aparecen en *Felisberto Hernández. Vida y obra*<sup>83</sup>, de José Pedro Díaz, y en *El palimpsesto intencionado. El proyecto literario de Felisberto Hernández*<sup>84</sup>, de María del Carmen González de León. Díaz trae a colación cómo Felisberto recuerda la forma extraña en que tocó un nocturno en su travesía de los Andes (1917): “al principio tenía acordes grandes, de sonidos graves, que yo hacía

<sup>71</sup> *Ibid.*, p. 66.

<sup>72</sup> *Ibid.*, pp. 335, 336.

<sup>73</sup> Ver Nota 37 arriba.

<sup>74</sup> Giraldi Dei Cas, *Felisberto Hernández. Del creador al hombre*, op.cit., p. 33.

<sup>75</sup> *Ibid.*, p. 34.

<sup>76</sup> *Ibid.*, pp. 35-36. Como subraya con fuerza Giraldi Dei Cas, “El hábito adquirido en la labor musical intensa, la educación fecunda del espíritu, la progresiva sensibilización de su inspiración, fueron seguramente de importancia significativa en la gestación del estilo y del mundo literario de Felisberto Hernández”, *ibid.*, p. 36.

<sup>77</sup> Ver más abajo, al final de esta Sección 3, las composiciones escritas en conjunto con María Isabel.

<sup>78</sup> *Ibid.*, pp. 37-38

<sup>79</sup> *Ibid.*, pp. 38-39.

<sup>80</sup> *Ibid.*, pp. 42-43.

<sup>81</sup> *Ibid.*, p. 44. Testimonio de Esther de Cáceres, quien será gran amiga de Felisberto.

<sup>82</sup> Diría más adelante Felisberto, en sus clases de música, que hay que “tener conciencia en todos los dedos”, testimonio de su alumna Norah, *ibid.*, p. 39.

<sup>83</sup> Ver Nota 36 arriba.

<sup>84</sup> Ver Nota 38 arriba.

con las manos abiertas y con la lentitud de un espiritista al ponerlas sobre la mesa y mientras espera que lleguen los espíritus<sup>85</sup>; la materialidad de la interpretación (manos abiertas, lentitud, mesa) se correlaciona estrechamente con la fantasmagoría circundante (gravedad, espiritismo), ejemplo de la *horótica*<sup>86</sup> ambigua de la narrativa posterior, donde los muebles y las emociones se intercambian a voluntad. Díaz resalta también la importancia de los maestros en el periodo de formación del joven: José Pedro Bellán, maestro de Felisberto en la escuela y siempre referente intelectual, para quien Felisberto toca música de Grieg en el estreno de una de sus obras de teatro (1928)<sup>87</sup>; Clemente Colling, su gran maestro musical y singular ejemplo de vida<sup>88</sup>; Carlos Vaz Ferreira, el sumo Maestro del Uruguay, quien acogió e impulsó la escritura extraña y las “locuras inteligentes” de Felisberto<sup>89</sup>.

Por su lado, González de León resalta la *marginalidad* y el *eclecticismo* de las primeras invenciones de Felisberto (ver Secciones 4-7 abajo), donde, siguiendo a Vaz Ferreira, importa más el *proceso* que el producto<sup>90</sup>. La ambigüedad del devenir escritural cabalga sobre la ambigüedad de la interpretación musical. Con el tiempo, Felisberto inventará todo tipo de nuevos recursos literarios para lograr captar ese devenir, pero el todo se eleva sobre el *fluir natural*, musical (Colling) y filosófico (Vaz), de su juventud. Según González de León, Felisberto “dramatiza la complejidad, ficcionaliza ese proceso, camina por pasadizos de un nivel a otro”<sup>91</sup>. Alternan un “impulso vitalista” (a la Vaz) y un proceso lleno “de escollos, de saltos, de silencios” (a la Colling), “porque escribir no es buscarse a sí mismo sino *hacerse a sí mismo* en un proceso interminable”<sup>92</sup>. Las contrapartes armónicas con la *teoría matemática de la ambigüedad* son aquí patentes: la arquitectónica matemática se eleva interminablemente, a través de complejos pasadizos, a lo largo de obstrucciones y tránsitos, en un constante alternar entre lo continuo (topología, Riemann) y lo discreto (álgebra, Galois).

Las composiciones tempranas de Felisberto –“Canción de cuna” (1920), “Un poco a lo Mozart” (1921), “Primavera” (1922), “Crepúsculo” (c. 1924), “Tres preludios. I. Mimosismos; II. Canción repreciosa; III. El niño dormido” (c. 1925)–<sup>93</sup> exhiben, en las apreciaciones

<sup>85</sup> Díaz, *Felisberto Hernández. Vida y obra, op.cit.*, p. 23. Tomado de la “Autobiografía literaria” de Felisberto (1964).

<sup>86</sup> Ver Nota 8 arriba.

<sup>87</sup> Díaz, *Felisberto Hernández. Vida y obra, op.cit.*, p. 25.

<sup>88</sup> *Ibid.*, pp. 27-29.

<sup>89</sup> *Ibid.*, pp. 26, 29. Para un estudio extenso de “la lectura/escucha que Felisberto hizo de Vaz Ferreira”, ver Carina Blixen, “El hilo perdido de Felisberto”, en: AA.VV., *Felisberto*, Montevideo: *Revista de la Biblioteca Nacional* 10 (2015): 293-309. Sobre las “locuras inteligentes” de Felisberto, según el juicio de Vaz Ferreira, ver *ibid.*, p. 295, nota 1. Blixen indica que la literatura primera de Felisberto “trata de recrear el ritmo del pensamiento y generar un *fluir* entrecortado que es el sustrato de la percepción y la invención”, *ibid.*, p. 293. Ritmo, *fluir* entrecortado, sustrato perceptivo, provienen tanto de la práctica pianística, como de las enseñanzas de Vaz Ferreira. En este ámbito, resulta fundamental “la corriente total y libre de *toda* la vida, sentida en su más extraña forma de totalidad, sintiendo circular el misterio que no puede sentirse con cualidad pensante” (carta de Felisberto a Amalia Nieto, 21 de agosto 1940), *ibid.*, p. 299. La amplitud extraña, total y misteriosa de la vida surge precisamente de su *ambigüedad*.

<sup>90</sup> González de León, *El palimpsesto intencionado. El proyecto literario de Felisberto Hernández, op.cit.*, p. 111.

<sup>91</sup> *Ibid.*, p. 112.

<sup>92</sup> *Ibid.*

<sup>93</sup> Cfr. Sergio Elena, *Felisberto Hernández. Música completa para piano*, CD Audio, Buenos Aires: AADI - CAPIE SADAIC, 2008, en: Amalia Nieto, *Cartas a Felisberto*, Buenos Aires: Galería Jorge Mara - La Ruche & Montevideo: Centro Cultural de España, s. f. Las partituras de las composiciones aparecen en: Felisberto Hernández, *Cartas y Partituras* (ed. Morena), Córdoba: Buena Vista Editora, 2018, pp. 374-375 (“Canción de cuna”), 371-372 (“Un poco a lo Mozart”), 365-368 (“Primavera”), 379-381 (“Crepúsculo”), 377 (“Tres Preludios. I. Mimosinos”, compuesto con María Isabel Guerra), 378 (“Tres Preludios. II. Canción repreciosa”, compuesto con María Isabel Guerra), 369-370 (“Tres Preludios. III. El niño dormido”, compuesto con María Isabel Guerra).

de sus contemporáneos, un temperamento delicado, una técnica extraña, un intimismo impresionista<sup>94</sup>. Un análisis de tres de esas composiciones –“Primavera”, “Crepúsculo”, “El niño dormido”– revela la riqueza de los “dedos ágiles y profundos”<sup>95</sup> de Felisberto. Como muestra una de sus primeras cartas, el pianista y pronto escritor registra la importancia de una “elasticidad” y de una “expansión”<sup>96</sup> donde la razón y la sensibilidad se conectan, siguiendo las enseñanzas de Vaz Ferreira sobre la “razonabilidad”. A partir de la *materialidad de su digitación*, en las orillas de la pulsación pianística, mezclando imaginación musical y control técnico –*desde el margen*– es como parecen surgir entonces sus composiciones, al ir de lo concreto (práctica interpretativa) a lo conceptual (tejido rítmico y armónico), *invirtiendo* el cauce de la invención musical, que procede usualmente al revés.

En efecto, en el *Andantino quasi allegretto* que inicia la “Primavera” (1922), los arpeggios de la mano derecha, que terminan en trémolos, acordes y breves silencios, se contraponen luego con figuras similares en la mano izquierda hasta concluir en ligaduras armónicas descendientes<sup>97</sup>: los “dedos ágiles” van y vienen entre capas profundas del sentimiento y la conciencia; luego, en un tiempo *Un poco più lento*, las dos manos inician un corto diálogo contrapuntístico, con múltiples acordes invertidos<sup>98</sup>, antes de lanzarse a rápidas semicorcheas en las que la mano derecha lanza temas para luego descansar, mientras la mano izquierda las complementa<sup>99</sup>; la pieza concluye con un breve regreso al motivo inicial y a acordes completos de las dos manos al unísono<sup>100</sup>. Dedicada a María Isabel Guerra, la composición refleja el espíritu enamorado de Felisberto, sentimiento amplio naturalmente impulsado por la amplitud de apertura física de sus manos.

“Crepúsculo” (c. 1924), en cambio, no requiere la habilidad técnica de Felisberto, pero justamente, en contraposición, la sencillez de la digitación se corresponde con la sencillez del temperamento buscado. Todas las notas resultan ser esencialmente acordes sueltos de la mano izquierda, con ligeros adornos, excepto en un breve pasaje intermedio donde dialogan las dos voces<sup>101</sup>; la pieza termina con acordes en la mano derecha y trémolos en la izquierda antes de que todo converja en un largo acorde ligado<sup>102</sup>. Más interesante, “El niño dormido” (c. 1925), escrito en colaboración con María Isabel, muestra, en su extrema sencillez descarnada (**Figura 3**), una digitación suelta que capta perfectamente la simplicidad del sueño<sup>103</sup>. Las notas desgranadas, dislocadas y en alternancia estricta entre las dos manos parecen ser una suerte de prefiguración de la escritura disonante y alterada<sup>104</sup> que está por surgir en Felisberto.

<sup>94</sup> Cfr. Sergio Elena, “Del músico al escritor”, conferencia, 2022, disponible en YouTube. Para un estudio del período de giras musicales maduras, del período 1935-1942, ver Mariana Moraes, “De gira con Felisberto Hernández”, en: AA.VV., *Felisberto en borrador*, Montevideo - Biblioteca Nacional: *Lo que los archivos cuentan* 4 (2016): 107-145.

<sup>95</sup> *Ibid.*

<sup>96</sup> “Si por descuido de nosotros (porque no siempre se está para fingir, a veces somos espontáneos y explotamos) nos descubren un detalle que aunque vago nos pinta de cuerpo entero lo atribuyen a la locura, la rareza o neurastenia, de ahí tenemos que ser elásticos” (carta a su madre, 1922). Espontaneidad, explosión, rareza, elasticidad, confluirán en los detalles con que Felisberto pintará luego de cuerpo entero a sus personajes, ya sean seres vivientes u objetos. “Fuera de esa lucha existe la expansión y es cuando las almas se elevan y se juntan” (carta a su madre, 1922). Cfr. Felisberto Hernández, *Correspondencia reunida* (ed. Bajter), Barcelona: Ediciones Sin Fin, 2022, pp. 3, 4.

<sup>97</sup> Cfr. Partitura manuscrita de “Primavera”, en: Hernández, *Cartas y Partituras*, *op.cit.*, pp. 365-366.

<sup>98</sup> *Ibid.*, p. 366.

<sup>99</sup> *Ibid.*, pp. 366-368.

<sup>100</sup> *Ibid.*, p. 368.

<sup>101</sup> *Ibid.*, pp. 379-380.

<sup>102</sup> *Ibid.*, p. 381.

<sup>103</sup> *Ibid.*, pp. 369-370.

<sup>104</sup> Es famoso el testimonio de Onetti: “Por amistad con alguno de sus parientes pude leer uno de sus primeros libros: *La envenenada*. Digo libro generosamente: había sido impreso en alguno de los agujeros donde Felisberto pulsaba pianos que ya venían desafinados desde su origen. El papel era el que se usa para la venta de fideos; la impresión, tipográfica, estaba lista para ganar cualquier concurso de fe de erratas; el cosido había sido hecho con recortes de alambrado. Pero el libro, apenas un cuento, me deslumbró” (1975). Cfr. Juan Carlos Onetti, “Felisberto el «naïf»”, en: Juan Carlos Onetti, *Obras completas III*, Barcelona: Galaxia Gutenberg, 2019, pp. 532-535, cita, p. 533.

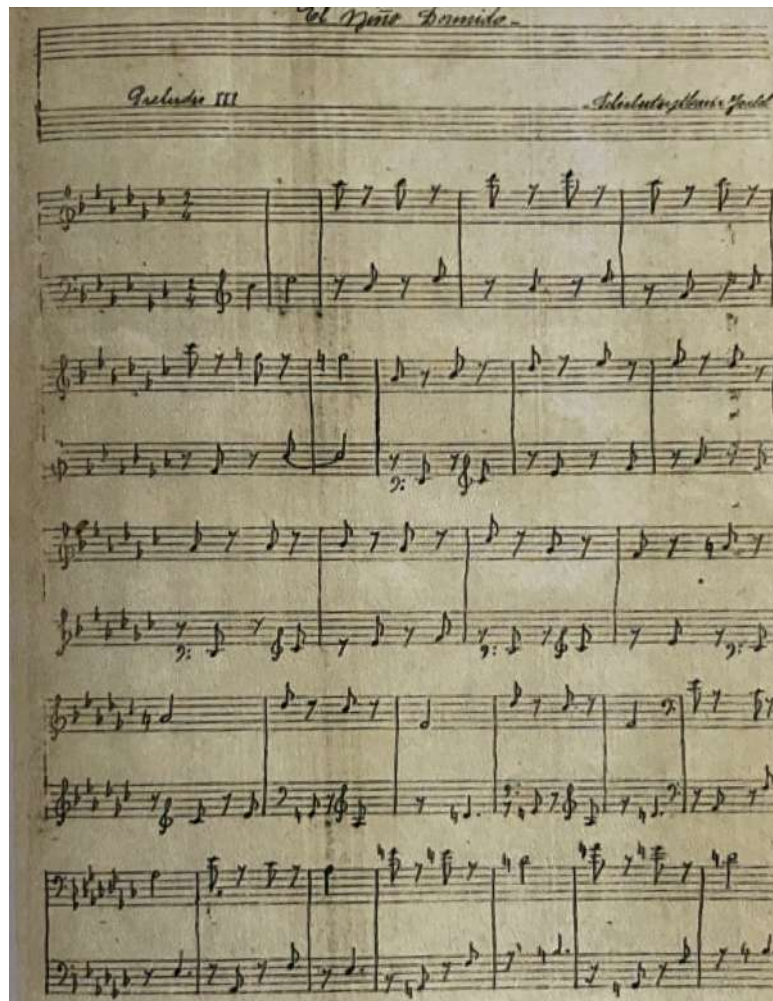


Figura 3. Folio 1 de “El niño dormido”, partitura manuscrita (c. 1925). *Ibid.*, p. 369.

#### 4. *Fulano de tal* (1925)

El centenario de *Fulano de tal*<sup>105</sup> nos convoca a leer los cuentos iniciales de Felisberto con “ojos otros”. De entrada, estos primeros textos difícilmente podrían denominarse “cuentos”, siendo más bien *fugaces giros y pliegues* de una mirada material y musical convertida en estrategia de escritura. Desde el margen<sup>106</sup>, desde la frontera, desde el *horos*

<sup>105</sup> Felisberto Hernández, *Fulano de tal* (1925), en: Felisberto Hernández, *Los libros sin tapas* (1925-1931) (eds. Diconca, Monteleone), Buenos Aires: El Cuenco de Plata, 2010, pp. 35-44.

<sup>106</sup> Margen –del latín *margo*: borde, orilla– es, en español, según el *Diccionario de la Real Academia*, un sustantivo ambivalente, cuyo acorde masculino o femenino queda a libre arbitrio del intérprete. Extremidad, límite o espacio en blanco, el margen representa, física y simbólicamente, aquello que queda de lado, alejado de un conjetural centro. Sin género y sin lugar, el margen es, no obstante, precisamente gracias a su misma *indefinición, ambigüedad y genericidad*, un concepto de una extraordinaria riqueza y ductilidad para poder ver más ampliamente el mundo, gracias a un entramado de *medias tintas* disponible desde el revés mismo de los acontecimientos. Al situarse en un borde, en una orilla, en una frontera, la visión se multiplica: percibe varios territorios a la vez, varias interpretaciones, varios *rectos y versos* de una misma situación. Lo aparentemente unidimensional se torna adecuadamente multifacético, y la percepción de la cultura desde sus márgenes adquiere mayor densidad y hondura. La obra de Felisberto explora, con fantástica originalidad, las *variedades del margen*.

*ambiguo* entre sensibilidad y racionalidad, entre improvisación libre y técnica acotada, entre exaltación y angustia, entre amor y decepción, entre memoria y olvido, entre el yo y su entorno “otro”, emerge la “escritura extraña”, casi cortada a cuchillo, de *Fulano de tal*. El *extrañamiento* del autor, desencuadrado<sup>107</sup>, confuso<sup>108</sup>, improvisado<sup>109</sup>, dolorido<sup>110</sup>, nos golpea directamente como una cachetada. El extrañamiento es también una componente esencial de la *teoría matemática de la ambigüedad*. Las raíces de un polinomio separable, bases de las extensiones de Galois, son “extrañas unas a otras” en una doble acepción fuerte: singularmente, son *indiscernibles* entre ellas, holísticamente, dan lugar a *distintos* automorfismos del grupo de Galois. De manera similar, las diferentes hojas superpuestas de una superficie de Riemann permiten la separación de vecindades locales inscritas en cada hoja, aunque puedan luego encontrarse caminos de continuidad entre ellas. La ambigüedad, la marginalidad, el extrañamiento permiten explorar los intersticios de otredad en la imaginación y en el saber.

Una reseña temprana (1931) de *Fulano de tal*, recobrada por Bajter y Hamada<sup>111</sup>, resalta la espontaneidad y la naturalidad<sup>112</sup> del volumen. La reseña, muy laudatoria en tiempos de completo desconocimiento de Felisberto, anota altas aptitudes de la prosa: “sorpresa”, “gran espíritu”, “caudal interior rico y abundante”, “exacto sentido de la realidad”, “depurada inteligencia”, “humorismo e ironía de muy fina calidad y de firme y hondo trazado”, “inclinación marcada al pensamiento filosófico”, “bellas páginas de vivo colorido”, “firme posición en la vida”<sup>113</sup>. Son todas cualidades que hubiesen encantado al espíritu, la inteligencia y el caudal vital de sus Maestros<sup>114</sup>. Unas décadas después, otro gran Maestro del pensamiento en el Uruguay, Ángel Rama, quien recuperaría la obra de Felisberto con sendos apuntes críticos y con la edición de su *Obra completa* (Arca, 6 vols., 1967-1974), diría que sus textos “eran cuentos, apuntes, reflexiones, análisis de movimientos, acecho de operaciones mentales, invalidación incesante de los modos de apropiarse de la realidad”<sup>115</sup>. De manera similar a como sucede con la *teoría matemática*

<sup>107</sup> “Yo”, “él”, “otro”, “éste” (5). Los numerales entre paréntesis de la Sección 4 remiten a la edición original de *Fulano de tal* (Montevideo: Rodríguez Riet, 1925), reproducida en facsímil en Hernández, *Los libros sin tapas*, op. cit.

<sup>108</sup> “Los teósofos juegan al gallo ciego y si abrazan el tronco de un árbol, dicen que es el talle de una jóven, y si les sacan el pañuelo de los ojos, dicen que la jóven se convirtió en árbol, y si les muestran la jóven, dicen que es la reencarnación, y si la jóven dice que no, dicen que es falta de fé” (23) (*sic*, ver el comentario de Onetti, *Nota 104* arriba).

<sup>109</sup> “...Este celebrado pianista nos invitó a cenar. Nos habló de otros pianistas: a uno de ellos le llaman «El Mago de la Memoria». Toca toda la obra de un autor. Otro que ahora está en Norte América, improvisa en los estilos Bach, Beethoven, etc., con solo tres notas que le den” (35). Recuérdese la composición de Felisberto “Un poco a lo Mozart” (1921), *Nota 93* arriba.

<sup>110</sup> “Sé desde ya que todo esto será como darme dos inyecciones de distinto dolor: el dolor de no haber podido decir cuanto me propuse y el dolor de haber podido decir algo de lo que me propuse. Pero el que se propone decir lo que sabe que no podrá decir, es noble, y el que se propone decir como es María Isabel hasta dar la medida de la inteligencia, sabe que no podrá decir no más que un poco de como es ella” (43).

<sup>111</sup> Ignacio Bajter, Kazunori Hamada, “Una reseña sobre *Fulano de tal* publicada en 1931. Un momento en las primeras lecturas de Felisberto Hernández”, en: AA. VV., *Felisberto, Revista de la Biblioteca Nacional* 10 (2015): 45-53.

<sup>112</sup> *Ibid.*, pp. 46-47.

<sup>113</sup> *Ibid.*, p. 53.

<sup>114</sup> Y cuyo encantamiento expresó Vaz Ferreira: “Tal vez no haya en el mundo diez personas a las cuales les resulte interesante y yo me considero una de las diez” (1929), *ibid.*, p. 46.

<sup>115</sup> Ángel Rama, “Medio siglo de literatura latinoamericana” (1922-1972), en: Ángel Rama, *La novela en América Latina. Panoramas 1920-1980*, México / Montevideo: Universidad Veracruzana / Fundación Ángel Rama, 1986, cita p. 122. Para una visión sucinta de las aportaciones críticas de Rama sobre Felisberto, ver Mario Rivas Cortés, “Felisberto Hernández visto por Ángel Rama”, *Revista Iberoamericana* LXXI (211) (2005): 381-385. Sobre Rama y Felisberto, véanse también los apuntes de la alumna de Rama, Rosario Ferré, en: Ferré, *El acomodador...*, op. cit., pp. 16, 19-22, 25.

de la ambigüedad, desde la fragmentación, el movimiento, la operación, la negación, se genera una sensibilidad abierta, que capta la multiplicidad de estratos de la realidad. En *Capítulo oriental. La historia de la literatura uruguaya* 29, Rama subraya cómo

La actitud creativa de Felisberto Hernández estuvo siempre lejos de la que distingue al profesional de las letras. Escribió poco y lentamente, haciendo y rehaciendo sus planos en una serie a veces nutridísima de versiones sucesivas, donde las obras iban conquistando su forma casi a despecho de la voluntad del autor. Si por una parte no dejó de trabajar nunca a pesar de su aparente desamor por la publicación, a la vez fue tenazmente respetuoso del dictado de voces interiores, de ese nacimiento oscuro de la obra de arte en los mapas del inconsciente, permitiendo que allí se formara y se organizara como una criatura viva, o, como alguna vez explicó “falsamente”, como una planta, para la cual ambicionaba algunas hojas de poesía<sup>116</sup>.

Desde la oscuridad, desde la ambigüedad, con disciplina tenaz, Felisberto acumula planos y hojas que revelan la complejidad de la realidad, a la manera de una superficie de Riemann. Los *puntos de ramificación* de su inventiva (“serie a veces nutridísima de versiones sucesivas”) enriquecen la obra de arte y le permiten alcanzar el estatus de una verdadera criatura viva.

Algunas lecturas posteriores de *Fulano de tal* ofrecen otras pistas sobre el “caudal interior rico y abundante” de la narrativa. Para Ferré (1986), en el “Diario” de *Fulano de tal* se inicia el “cuestionamiento de los límites entre la materia y el espíritu”, que caracterizará la literatura de Felisberto<sup>117</sup>. Para Díaz (2000), el volumen es “el menos interesante” de los *Libros sin tapas*, pero pone “en evidencia el deseo del autor de encarar su escritura”<sup>118</sup>. Para Lespada (2014), sorprende el “minúsculo formato de ocho por diez centímetros” de la edición original, con sus “formulaciones abstractas, fragmentarias”, su ironía socarrona y sus gestos burlones, su exploración de los movimientos cotidianos, su incursión en la “lateralidad” y en lo “fronterizo”<sup>119</sup>. Para González de León (2022), en contraposición con el juicio somero de Díaz, *Fulano de tal* alcanza ya en cambio toda la riqueza propia de la narrativa felisbertiana: fuerza de la parodia y del “tono menor”, juego entre el autor y su *alter ego*, autorreflexión sobre la escritura y sus dificultades, negación y emergencia de la conciencia sobre una nada seminal, entretenimiento como actividad en suspenso, enlace de los órdenes filosófico, psicológico, coloquial y cotidiano, fragmentación y figuración, improvisación y ejecución, tema y variaciones<sup>120</sup>. La misma crítica detectaba unos pocos años antes (2015) cómo “hacerse escritura” constituía las “variaciones de un tema” central en la prosa de Felisberto, encarnada en *Fulano de tal* como “significante de la insignificancia”<sup>121</sup>. Para Corona Martínez (2015), *Fulano de tal* abre una “literatura des-autorizada, des-encuadrada”<sup>122</sup>, donde la precariedad y la liminaridad se convierten paradójicamente en atributos, donde la substracción, la carencia, la “incomodidad” y la “irrisión” impulsan el acto creativo<sup>123</sup>.

<sup>116</sup> Ángel Rama, *Capítulo Oriental. La historia de la literatura uruguaya*, No. 29 (Felisberto Hernández), Montevideo: Centro Editor de América Latina, 1968, pp. 450, 452.

<sup>117</sup> Ferré, *El acomodador...*, *op.cit.*, p. 33.

<sup>118</sup> Díaz, *Felisberto Hernández. Vida y obra*, *op.cit.*, pp. 155-156.

<sup>119</sup> Lespada, *Carencia y literatura...*, *op.cit.*, pp. 56-59. González de León mide un tamaño ligeramente diferente: “9 centímetros de ancho y 11,5 centímetros de alto”, *cfr.* González de León, *El palimpsesto intencionado...*, *op.cit.*, p. 121. Este es el tamaño coincidente con el facsímil incluido ahora en Hernández, *Los libros sin tapas*, *op.cit.*

<sup>120</sup> González de León, *El palimpsesto intencionado...*, *op.cit.*, pp. 120-130.

<sup>121</sup> María del Carmen González de León, “Por las tierras de la escritura: la escena de Felisberto Hernández (primeros textos)”, en: AA. VV., *Felisberto, Revista de la Biblioteca Nacional* 10 (2015): 55-70, citas pp. 55, 65.

<sup>122</sup> Término tomado de Julio Prieto (2002) según la autora.

<sup>123</sup> Laura Corona Martínez, “Beginnings de Felisberto Hernández: los primeros libros bajo otra perspectiva”, en: AA. VV., *Felisberto, Revista de la Biblioteca Nacional* 10 (2015): 13-43, citas pp. 16-17, 21, 23.

Todas estas percepciones pueden reintegrarse en un *topos arquetípico* (a la Grothendieck<sup>124</sup>), donde caben simultáneamente la variedad y la unidad. Desde entornos *negativos* –propios de la ambigüedad– se elevan perspectivas iconoclastas, miradas liminares, perspectivas quebradas, en un *ir y venir de gradaciones* literarias, musicales, filosóficas, psicológicas, y, podemos decir también ahora, matemáticas. La *totalidad* de esas modulaciones retorna sobre el motivo inicial –así como el “Prólogo” final de *Fulano de tal* retorna, *ampliado*, sobre su “Prólogo” inicial–, a la manera de un *tema y variaciones* hipermoderno. Anticipación literaria de una posterior *música concreta*, *Fulano de tal* abre un mundo insospechado.

### 5. Libro sin tapas (1929)

Los tres años 1929 (*Libro sin tapas*), 1930 (*La cara de Ana*), 1931 (*La envenenada*), conforman la plena eclosión de la narrativa felisbertiana. Los cuentos, ahora sí merecedores de una tal apelación, consiguen ahondar profundamente en el “cuestionamiento de los límites entre la materia y el espíritu” (Ferré)<sup>125</sup>. *Libro sin tapas*<sup>126</sup> –plenamente abierto<sup>127</sup> a la invención– incluye ya algunos de los mejores relatos de Felisberto. “La casa de Irene” (72-76) describe las visitas de un enamorado a su cortejada, en medio de una casa cuyos objetos adquieren una vida plena, testigos de la relación. Un fugaz “misterio blanco” (72) sobrevuela en el ambiente y le da un sentido extraño a las acciones de los enamorados. En la espontaneidad de Irene “está el misterio blanco” (72), que se distribuye en las cosas con “una nueva calidad” (72): un piano, las manos libres y caprichosas de Irene, como sus labios, el entendimiento único de ella con el piano, “los dos unidos por continuidad” (72-73). En un entorno donde “parece que los objetos se entendieran con ella” (72), el *misterio blanco* da vida a las sillas donde los enamorados se sientan, otorgándoles un cariz vital (“las sillas entre ellas se entendían”) (74-75). Sin embargo, un acercamiento fugaz (tomada de manos, beso) (75) rompe el encanto del misterio (“poco a poco fue desapareciendo el misterio blanco”) (76), y se contraponen el “blanco exagerado e insulso” de las manos de Irene con las manos “nudosas y negras” del visitante (76). Mientras las teclas blancas y negras del piano parecen reflejarse en los cuerpos mismos de los protagonistas, el espíritu y la materia entran en una inevitable disociación final, después de haber conseguido acercarse incomprensiblemente<sup>128</sup>. La *ambigüedad* se encuentra aquí en su máxima expresión, permitiendo el enlace *continuo* de los entes y su posterior disgregación *discreta*. Los conceptos, los sentimientos y los objetos materiales entran en un diálogo complejo, lleno de intersticios y ramificaciones, de planos superpuestos, de reflejos e inversiones.

<sup>124</sup> Ver Nota 35 arriba.

<sup>125</sup> Ver Nota 117 arriba.

<sup>126</sup> Felisberto Hernández, *Libro sin tapas*, sin lugar, sin pie de impresora, sin fecha (Rocha: La Palabra, 1929), incluido en: Hernández, *Los libros sin tapas*, op.cit., pp. 45-83. El libro aparece dedicado “Al doctor Carlos Vaz Ferreira” (47). Los numerales entre paréntesis de la *Sección 5* remiten a páginas de la edición del *Libro sin tapas* en: Hernández, *Los libros sin tapas*, op.cit.

<sup>127</sup> “Este libro es sin tapas porque es abierto y libre: se puede escribir antes y después de él” (45).

<sup>128</sup> Díaz demerita un “librito” donde “no aparece todavía el escritor que leeremos más tarde” (opinión que no compartimos), pero indica que, en “La casa de Irene”, “ya narra sin dejar de *narrarse* a la vez, esto es: acentuando la singularidad de su mirada, y analizándola”, cfr. Díaz, *Felisberto Hernández, Vida y obra*, op.cit. pp. 156-157. Lespada acentúa “una identidad signada por la falta” y el “desposeimiento”, y subraya, en “La casa de Irene”, “una percepción singular, una impresión máxima, extraña y misteriosa en tanto nueva, única”; “animación” e “inacción”, elusión y elisión desconfiguran a los personajes y los objetos; cfr. Lespada, *Carencia y literatura*, op.cit., pp. 71, 78-81. González de León señala la “escenificación de los sentimientos” y la “metaforización del enfrentamiento yo/mundo”, a partir de los cuales, en “La casa de Irene”, “cuando el deseo se concreta desaparece el misterio blanco, la fabulación se cancela y como consecuencia la escritura”, cfr. González de León, *El palimpsesto intencionado...*, op.cit., pp. 144, 266-267. Corona Martínez enfatiza el carácter fragmentario, disgregado, deshilachado, del *Libro sin tapas*, girando alrededor de una “juntura de formas breves, brevísimas y heteróclitas”, cfr. Corona Martínez, “*Beginnings...*”, op.cit., p. 25.

Toda una “teoría de la gradación”, expresada con suma originalidad en “La piedra filosofal” (58-62), se encuentra aquí en acto. Entre los objetos y los seres humanos existen soluciones de continuidad, *invisibles* para nuestros “ojos ciegos” (Tarkovski): “uno de los grandes secretos es que no existen cosas duras y cosas blandas simplemente: existe entre ellas una progresión, existen grados” (58). Una “gran cantidad de vibraciones” nos acerca a comprender “la curiosidad de la realidad objetiva: la graduación” (59). La piedra filosofal, protagonista del relato en primera persona, antes de ser quebrada sardónicamente por un albañil (62), dice de sí misma: “soy muy degenerada”, “he tenido la virtud de poder ser dura y blanda al mismo tiempo” (60). Diversas “leyes” sobre la dureza y la blandura cifran las “enseñanzas” de la piedra: “cuanto más dureza más simplicidad y más salud, cuanto más blandura más complejidad y más enfermedad. Por eso es a veces tan complejo y enfermo el espíritu del hombre” (60), “cuanto más blandura más propósito, cuanto más dureza más inercia” (62)<sup>129</sup>. Las lecciones de la filosofía vitalista de Vaz Ferreira adquieren una forma literaria extremadamente original.

Al lado de “La casa de Irene”, “El vestido blanco” (63-65) constituye el otro alto logro literario del *Libro sin tapas*. El relato cuenta cómo las dos ventanas de un balcón –alrededor del cual el protagonista va y viene entre el “lado de afuera” (63) y el interior del “espacio esos lacayos de ventanas” (64)– viven entre el “límite de enfrentarse” (63) y la “violenta necesidad física (...) de estar juntas” (64). En un momento, el protagonista y su amada se encuentran “con las ventanas en la cara” (64) y el relator siente cómo las ventanas les sepultan “entre el balcón y ellas” (64). En una transfiguración final de los objetos, las puertas de un ropero convocan las ventanas del balcón, y emerge “un vestido blanco de Marisa que parecía Marisa sin cabeza, ni brazos, ni piernas” (65)<sup>130</sup>. Límites y pulsiones, enfrentamientos y enlaces, vida y muerte, transformaciones y transmuciones se incrustan materialmente en la narración. El *extrañamiento conforme*<sup>131</sup> de los objetos y los seres –en la doble acepción contradictoria de comunión y extrañeza– gobierna la pulsión fantasmagórica del texto.

<sup>129</sup> González de León considera “La piedra filosofal” como uno de los relatos “más interesantes del libro”, estudia las relaciones de Felisberto con el ocultismo de la época, muestra las rupturas con el binarismo, exhibe las ventajas de la “indefinición” y la ambigüedad, y desbroza con cuidado las “leyes” de lo duro y lo blando, *cfr.* González de León, *El palimpsesto intencionado...*, *op.cit.*, pp. 158-168. Esto trae a colación las fórmulas de Valéry sobre la *riqueza primigenia de lo indefinido*: “Todo aquello que podemos definir se distingue de inmediato del espíritu productor y se opone”, “En la producción de la obra, la acción llega con el contacto de lo indefinible” (1937), *cfr.* Valéry, *Teoría poética y estética*, *op.cit.*, pp. 105, 114. De modo similar, los *fondos indefinibles* de la *teoría matemática de la ambigüedad* (indiscernibilidad a la Galois, armonía negativa a la Riemann) constituyen el insumo imprescindible para la elevación del edificio matemático moderno y contemporáneo. La oscuridad es el sustrato necesario para la luz; en el *horos intermedio* viven las *sombras y penumbras* esenciales de la vida y del entendimiento.

<sup>130</sup> Según Ferré, “A medida que progresa el relato, el narrador se siente invadido por el miedo”, y debe enfrentarse “a una percepción exaltada (neurótica) de sus sentidos, o a la presencia de un hecho insólito, que desafía las leyes de lo racional”; los temas principales –la locura posible del narrador, la erotización de las ventanas– resultan ser entonces *esencialmente ambiguos*; *cfr.* Ferré, *El acomodador...*, *op.cit.*, pp. 33-34. Para Díaz, “el interés radica en la insólita fuerza con que opera sobre él [el protagonista] su propia entrega a la presencia de los objetos”, *cfr.* Díaz, *Felisberto Hernández, Vida y obra*, *op.cit.* p. 156. Para Lespada, “El vestido blanco” “quizá sea su primer relato con personajes y donde la prosopopeya se instala como recurso narrativo de humanización del objeto”, situándose en un *topos* donde “la *apertura* del relato coincide con la descripción de una *apertura*, en tanto límite del adentro y el afuera”, *cfr.* Lespada, *Carencia y literatura*, *op.cit.*, pp. 72-75, cita p. 72. Aperturas, bordes, pegamientos dialogan naturalmente con las *topologías* subyacentes de la *teoría matemática de la ambigüedad*.

<sup>131</sup> Esto convoca el *Teorema de Representación Conforme* de Riemann (1851), donde se demuestra –en contra de cualquier percepción “razonable”, es decir, allende nuestros “ojos ciegos”– que, módulo homeomorfismo, solo existe un dominio acotado simplemente conexo (es decir, sin huecos) en el plano complejo: el disco unidad. *Extrañamente*, todos los tipos de dominios se añan en la inesperada *comunión arquetípica* del disco.

Tres textos orientados directamente a calibrar cómo ciertos objetos inanimados cobran vida se incluyen en el *Libro sin tapas*: “Historia de un cigarrillo” (69-71), “La barba metafísica” (77-78) y “Genealogía” (66-68). “Historia de un cigarrillo” cuenta las peripecias de unos cigarrillos en su cajilla, de un cigarrillo roto y del efecto de su manipulación en la mente del narrador. Este “hacía mucho rato que pensaba en el espíritu en sí mismo; en el espíritu del hombre en relación a los demás hombres; en el espíritu del hombre en relación a las cosas, y no sabía si pensaría en el espíritu de las cosas en relación a los hombres” (69). Progresivamente, las cosas adquieren un lugar preponderante sobre los seres vivos. Entre obsesiones y reacciones del protagonista (71), el cigarrillo enfila una existencia propia que le lleva finalmente a su desaparición cuando cae a un piso mojado, “una cosa activa que ahora ocurría en el piso: el cigarrillo se iba ensombreciendo a medida que el tabaco absorbía el agua” (71)<sup>132</sup>. Vida, translocación y muerte de un objeto se reflejan en la mente de un hombre, como si se tratara de su propia experiencia.

“La barba metafísica” se inspira en la famosa barba de su amigo y empresario Venus González Olaza. Un aditamento corporal, local e inane, capta la globalidad viva del hombre, y este no puede desprenderse del símbolo que lo representa. El todo no es tan “despegable” (77) como se quisiera, “las ideas de un hombre son la continuación de un hombre” (77), el hombre anda “con su obra por la calle” (77). La barba alcanza “una fuerza subconsciente que él no había previsto y que no tenía nada que ver con él” (78). Allende la “curiosidad”, y “unas violentísimas ganas de saber cómo sería él sin barba”, sigue “el misterio, y la constante inquietud del espíritu” (78). Por su lado, “Genealogía” nos regala un curioso *divertimento matemático* donde se encadenan diversas figuras, a lo largo de una irónica y extraña vida generativa de las formas en la geometría euclidiana. Una “joven circunferencia” camina “tranquila, lentamente e indiferentemente” (66); toma luego “la forma de una elipse”, con una “gracia ondulada” (67); mientras tanto, “un vigoroso triángulo” se precipita sobre ella (67); el triángulo considera “muy bruscos sus pasos” y se vuelve “un moderado pentágono” y “un alegre cuadrilátero” (67); entre “eclipses” y “armoniosas curvas”, la circunferencia termina por abrirse, y queda “hecha una línea curva y después una recta” (68); lentamente, se llena entonces “el espacio de muchas líneas horizontales infinitas” (68). Un inesperado Felisberto inventa así una *geometría dinámica de las formas* donde devela jocosamente la ambigüedad del devenir matemático.

## 6. La cara de Ana (1930)

*La cara de Ana*<sup>133</sup> incluye un cuento principal, “La cara de Ana” (1-13), que da el título a la compilación, dos relatos complementarios a los temas del cuento central, “Amalia” (14-16) y “La suma” (17-20), y otras dos improvisaciones “musicales”, “El convento” (21-27) y “El vapor” (28-34). Los cinco textos inciden explícitamente en explorar el sentido “raro” (4, 15, 18, 20, 31) del protagonista (todos discurren en primera persona), su “manera especial” (6, 12) de sentir “las cosas, las personas, las ideas y los sentimientos” (6), “la sensación disociativa, dislocada y absurda” de captarlos (3), el entendimiento parcial de los mismos según su “posición”<sup>134</sup> (3), la “simultaneidad extraña” (6) de la materia y el sentimiento, su “sentido distraído de las cosas” (22), su percepción de tonalidades (32), acordes (7) y ritmos (4) con un “encanto distinto” (27). “La cara de Ana” narra el encuentro

<sup>132</sup> Para Ferré, la “desazón”, la “rebeldía”, la “locura incipiente”, el “desarreglo” de los sentidos, expresan el límite ambiguo entre el relato fantástico y la inquisición subjetiva, *cf.* Ferré, *El acomodador...*, *op.cit.*, p. 35. Para Lespada, la “Historia de un cigarrillo” representa una “conspiración de lo mínimo”, donde los desajustes y las complicaciones de la experiencia se cifran en un juego que “se le escapa de entre los dedos”, dando lugar a una “naturalidad antinatural” que desconcierta y desorienta al lector, *cf.* Lespada, *Carencia y literatura*, *op.cit.*, pp. 75-77.

<sup>133</sup> Felisberto Hernández, *La cara de Ana*, Mercedes: sin pie de impresora, 1930. Los numerales entre paréntesis de la *Sección 6* remiten a páginas de esa primera edición.

<sup>134</sup> Esto convoca la *geometría de posición* (*Analysis Situs*, c. 1670) de Leibniz, precursora de la topología moderna.

de dos niños –luego adolescentes– distintos, especiales, llenos de una “curiosidad libre” (4). Entre el silencio y la carcajada discurre el enamoramiento soterrado de los jóvenes, sus desencuentros con el mundo adulto, sus quietudes y aceleraciones, sus complicidades en un mundo disociado: “Ninguna de estas cosas tenían que ver unas con otras: me parecía que cada una de ellas me pegaran en un sentido como si fueran notas; que yo las sentía todas juntas como un acorde y que a medida que pasaba el tiempo unas quedaban tenidas y otras se movían” (7). Las ligaduras y los *staccatos* del Felisberto pianista encarnan aquí en la “simultaneidad extraña” que siente el niño. La belleza de Ana adolescente golpea al protagonista –“estaba altísima, delgada y muy linda” (10)– quien se encuentra finalmente algo sorprendido por la “única sensación (...) de que la cara de Ana era linda” (13). Sinuosas formas del destino, equilibrios ocultos, misteriosas evanescencias fraguan una retícula compleja de emociones, razones y vacíos del entendimiento<sup>135</sup>.

Los encuentros y desencuentros de los seres, las cosas, los conceptos, las metáforas musicales, se describen en un lenguaje siempre elusivo, que escapa a los cánones de una narración “clasificable”, a la vez subjetiva, sensitiva, material, pero también enteramente abstracta, filosófica, ideal. *El ascenso y el descenso* constantes entre estratos de lo imaginario y de lo concreto –lo aéreo, lo acuoso, lo terrenal– aseguran la “manera especial”, el sentimiento “extraño” de la narrativa. Los fragmentos de una teoría de *ambigüedades, ramificaciones y estratificaciones*<sup>136</sup> se materializan de manera muy original en *La cara de Ana*. Con ello, las *compuertas reales de la creatividad* se abren en el *doble nivel* del relato y el metarelato, en las incursiones de los protagonistas y en la constante reflexión de los mismos sobre sus acciones. Una de las espléndidas largas frases de Rama analiza en detalle los complejos procesos creativos de Felisberto:

(...) fue la ininterrumpida confesión de los procesos centrales de la vida de un hombre: la irisación y el constante cuestionamiento del universo en la conciencia de un artista. De ahí el carácter fragmentario de la mayoría de sus escritos, sobre todo en los primeros tramos de su actividad literaria. Recién en sus últimos años estableció estructuras más cerradas que parecieron cuentos y que así se dieron a conocer, aunque muchas veces no disimulan ese rango interno de fragmentos de una única y evolutiva invención. Su manera de entrar en los asuntos; su

<sup>135</sup> Para Díaz, *La cara de Ana* recoge un “cruce de evocación y autoanálisis” donde “aparece constantemente, junto a lo que [se] muestra, el análisis de quien mira”, *cfr.* Díaz, *Felisberto Hernández, Vida y obra*, *op.cit.* p. 157. Para Lespada, *La cara de Ana* introduce “novedades en lo que concierne a los procedimientos” y realmente “encarna el proyecto literario de Felisberto”; Lespada acentúa una simbiosis “entre lo elevado y lo bajo, lo prohibido y lo autorizado, lo sagrado y lo profano”, donde se acortan las distancias, se acercan los objetos y pueden convivir las contradicciones, las rarezas, los sentimientos extraños; la “conjunción de lo disímil” adquiere entonces una fuerza literaria inesperada; *cfr.* Lespada, *Carencia y literatura*, *op.cit.*, pp. 81-91, citas pp. 81, 88, 84, 90. González de León nota por su parte las disfunciones y pulsiones de Ana, subraya una “*lujuria de ver*” que Felisberto retomará luego (*Por los tiempos de Clemente Colling*, “El acomodador”), detecta el “ambiente gótico” del texto y muestra cómo “se abren nuevas posibilidades de pensar la realidad sin categorías preexistentes”; *cfr.* González de León, *El palimpsesto intencionado...*, *op.cit.*, pp. 279-284, citas pp. 281, 282, 283.

<sup>136</sup> Sobre las “estratificaciones” véanse los apuntes del *Diario* de Florenski: “El Yo se duplica” (1901); “Escrutando mi alma, oyendo sus sonidos subterráneos, yo, a lo largo del tiempo, penetro cada vez más profundamente en sus vísceras, vivo en los estratos de mi alma. (...) Bajo la corteza externa encuentro los estratos del radicalismo, de la ciencia, de la filosofía (...) Esto explica mi pasión por la física, la matemática, la geología, etc. etc. (...) La lejanía llama (...) siempre más abajo. Algunos elementos indefinidos. Estratificaciones acuosas (...)” (1905); “Para descender al fondo, hay que afrontar también la subida: a lo largo de la vía de la caída está la altura. (...) No rara vez, para alcanzar lo alto hay que pasar por lo bajo y para alcanzar lo bajo hay que pasar por lo alto” (1909); *cfr.* Pavel Florenskij, *Ai confini dei mondi*, *op.cit.*, pp. 5, 11, 13, 15, 17, 23. Se trata de temas también eminentemente felisbertianos, alrededor de la otredad, la oscuridad, la lejanía, la indefinición, la profundidad, lo acuoso.

desprendimiento repentino de la materia que está elaborando, para recuperarla, en otras articulaciones, en los textos siguientes que encaraba; su costumbre de arrastrar durante largos años algunos escritos que le resultaban particularmente enigmáticos y a los que volvía obsesivamente, intercalándolos con otros que nacían con mayor rapidez y organicidad; la vinculación atmosférica o tonal de muchas de sus narraciones y su total desvío por las formas consagradas de lo que debía ser un cuento o una novela en la preceptiva oficial de su época, todavía marcada por la lección quiroguiana, apuntan a esa naturaleza protoplásmica de su creación, a ese devenir incesante, moroso y cargado, de una literatura que se va haciendo en el interior y de la cual ciertos fragmentos van siendo arrojados a la publicación. Alguna vez serán cuentos, otras apuntes, otras páginas sueltas, en cierto momento paneles narrativos o meras situaciones que lo fascinan por esa calidad irresistible que lo movilizaba: el misterio<sup>137</sup>.

Irisación, fragmentación, invención evolutiva, desprendimiento, articulación, intercalación, vinculación tonal, desvío, impulsión protoplásmica, devenir incesante: Rama capta en lo profundo, con la proverbial agudeza de sus análisis estructurales, propiedades del *hacer* felisbertiano, que resultan ser también, como hemos visto, propiedades del *hacer* matemático galoisiano y riemanniano. La “calidad irresistible” del misterio en la literatura, y de la maravilla en la matemática, se afianza gracias a su *trato ambiguo*.

## 7. La envenenada (1931)

La *envenenada*<sup>138</sup>, última compilación de las denominadas *Primeras invenciones*<sup>139</sup>, reúne cuatro relatos orientados a personajes femeninos<sup>140</sup>, “La envenenada” (1-15), “Ester” (16-22), “Hace dos días” (22-27), “Elsa” (27-30). “La envenenada” narra las tribulaciones de un literato, que se contrapone sardónicamente con colegas que creen tener en sus manos “el destino de la humanidad” (8), cuando se encuentra con el cadáver de una envenenada. Con una inusual precisión de fechas y horas (1-2, 7), inesperada en Felisberto, el literato da cuenta de su sequía creativa y de cómo debe salir a la calle para encontrar sobre qué escribir: “si quiero asunto tengo que meterme en la vida” (2). Entre poses y gestos artificiales que el literato asume para poder pasar desapercibido en sus pensamientos mientras se acerca al “espectáculo” (6) de la envenenada –“cara hacia el frente” (3), “silencio” (3), “entrecejo” fruncido (5), “seña” de espera (9)–, discurren precisas descripciones anatómicas de la situación (6-7) y múltiples metáforas asociadas, alrededor del arroyo, la vida y la muerte (5), alrededor de un asta y su bandera (11-12), alrededor del cuerpo del literato, su mente y sus pies (14). Entre “dos límites –el nacimiento y la muerte–” (13), el narrador oscila como un “elástico” (5) entre el “pelotón” (5) del espíritu y la materialidad gruesa de la situación. Se superponen entonces estratos muy diversos de realidad –“el vaso y ella [la envenenada]

<sup>137</sup> Ángel Rama, *Capítulo Oriental...*, *op.cit.*, p. 452. La frase interminable de Rama (1968) recuerda la longitud de las frases de Proust, con quien Felisberto fue comparado, no por sus muy distintas puntuaciones, sino por sus minuciosas rememoraciones (*A la búsqueda del tiempo perdido*, *Por los tiempos de Clemente Colling*): “A ratos parece el autor un primo hermano de Proust”, *cf.* José Santos González Vera (1959, rememorando una lectura de 1949), en: Rama, *Capítulo Oriental...*, *op.cit.*, p. 464.

<sup>138</sup> Felisberto Hernández, *La envenenada*, Florida: sin pie de impresora, 1931. Los numerales entre paréntesis de la *Sección 7* remiten a páginas de esa primera edición

<sup>139</sup> Felisberto Hernández, *Primeras invenciones* (ed. Giraldi Dei Cas), Montevideo: Arca, 1969. Según Rama, “En este primer término de la obra de Hernández está más a la vista que en sus creaciones posteriores la dominante mental que se traduce en la atenta exégesis de las situaciones, en la ausencia de connotaciones concretas, en un manejo lúdico y a veces desaprensivo de las realidades del mundo. Estas primeras invenciones son sus exploraciones y el afinamiento de sus instrumentos de percepción”, *cf.* Rama, *Capítulo Oriental...*, *op.cit.*, p. 455.

<sup>140</sup> Rama las llama “*filles du feu*”, “con quienes se ejerce la esgrima amorosa, con un sistema de pases todavía muy juguetón, pero donde ya se percibe el adentramiento en las zonas profundas de la sensibilidad que algún día devendrán peligrosas e inquietantes”, *cf.* Rama, *Capítulo Oriental...*, *op.cit.*, p. 455.

eran dos realidades parecidas” (8)–, “lo infinito” y “lo desconocido” (3, 4) se cuelan entre los intersticios de la (sin)razón, la dislocación y la extrañeza –“se dislocadan y eran estrañas” (7, *sic*<sup>141</sup>)– perturban el entorno, “la muerte” adquiere “una vida especial” (11). “A grandes pasos y a profundos pensamientos” (tema inicial, 1; coda final, 15), el literato se sumerge en la existencia, sin que finalmente le importen “la vida, ni su misterio anterior ni el posterior” (15)<sup>142</sup>. Escepticismo, ironía, hipérbole, extrañamiento, autorreflexión constituyen algunas de las múltiples *ramificaciones* del relato: más allá de cualquier visión plana, las complejidades del realismo y de la fantasía conviven en hojas que se intersecan y se repelen a la vez<sup>143</sup>. Una mirada *distante y distinta*<sup>144</sup> nos permite adentrarnos entonces en capas del entendimiento usualmente inaccesibles para nuestros “ojos ciegos”.

Los otros tres cuentos de *La envenenada* se adentran en las múltiples capas de una “razonabilidad” extendida (Vaz Ferreira)<sup>145</sup>, en las espirales y vórtices florenskianos, en las deformaciones y desórdenes valéryanos<sup>146</sup>. “Ester” explora la “velocidad” (17) de una muchacha que fascina a su vidente enamorado, encantado con las puntas “dobladas” de su sombrero y de su saco convertidas en dobleces del alma (18, 22), embelesado por su belleza envuelta en una extraña “vida al aire” (18), dolido de una tenaz incertidumbre en comprenderla (“no se sabría nunca”, 18), molesto por una perseverante aparición de lo “imprevisto” (20, 21, 22) que desconfigura el encuentro amoroso y que asegura una afilada separación entre “ella” y el narrador (“descoincidía”, acción tres veces repetida en el último párrafo de la página 21). Las metáforas –“plantas” por muchachas (16), “esquinas” por movimientos del destino (17), “paredes” por estratos mentales (19), “fuego” por violencia de las ideas (20), “ferro-carril” (*sic*) por conexión de los seres (22)– redundan en el carácter *ambiguo* del texto<sup>147</sup>. Por su lado, “Hace dos días” relata un amor a distancia “en plena enfermedad de amarnos” (23), intentando luchar entre “el mayor número de detalles” (24) y la “impresión” (25, *sic*). Una “semioscuridad” (26) produce “momentos extraordinarios” y “momentos extraños” (27). Finalmente, “Elsa” explora cómo, para crear un amor (y un personaje: Elsa), “lo suponemos al revés y al derecho” (29), y, en

<sup>141</sup> Ver el apunte de Onetti, *Nota 104* arriba.

<sup>142</sup> Según Ferré, “La envenenada” es un “relato revolucionario” donde “la reflexión sobre el «misterio» de la realidad pasa a ser por primera vez una reflexión sobre el «misterio» de la escritura en sí”, gracias a un personaje (el literato) que “actúa el dilema de la escritura ante el lector”, y donde se ayuda a innovar “en cuanto a sus técnicas narrativas”: “los condicionantes, el imperfecto, la objetivación y la personificación, todas dirigidas a lograr una mayor ambigüedad”, *cfr.* Ferré, *El acomodador...*, *op. cit.*, pp. 37-40, citas pp. 37, 38, 40. Por su parte, Lespada resalta los “deslizamientos por contigüidad” de la prosa, sus “formas de animación” transgresiva, su “circularidad”, el “deslizamiento entre los diferentes niveles del texto”, las realidades e irrealidades superpuestas: “no hay nada más irreal que la ilusión referencial del realismo”, *cfr.* Lespada, *Carencia y literatura, op. cit.*, pp. 98-104, citas pp. 101, 103, 104.

<sup>143</sup> Como en una superficie de Riemann o en la visión cuatridimensional de los números complejos según Florenski, *cfr.* Florenskij, *Gli immaginari in geometria, op. cit.*

<sup>144</sup> “A lo largo de la serie [*Fulano de tal, Libro sin tapas, La cara de Ana, La envenenada*] se ve surgir la mirada distinta que Hernández tenía para el mundo y los temas obsesivos que harían la trama de su obra mayor”, *cfr.* Rama, *Capítulo Oriental...*, *op. cit.*, p. 455.

<sup>145</sup> Ver *Nota 3* arriba.

<sup>146</sup> Ver *Sección 0* arriba.

<sup>147</sup> Ferré revela cómo “el uso de los condicionantes («me parecía», «tal vez», etc.), y del imperfecto («desafiaba», «se doblaban», etc.) da la sensación de que el personaje está siendo creado poco a poco, y de que sus atributos y características no son todavía definitivos. La ambigüedad no es aquí, por lo tanto, una ambigüedad fantástica (no se trata de si el suceso es insólito o no), sino una ambigüedad literaria: todavía no estamos seguros de si Ester existe definitivamente como presencia literaria”, *cfr.* Ferré, *El acomodador...*, *op. cit.*, pp. 36-37, cita p. 37. Algo similar ocurre con la *ambigüedad matemática*: “no estamos seguros” de si las estructuras arquetípicas (*e.g.*, grupo de Galois, superficie de Riemann) existen *a priori*; sobre un fondo de misterio (indiscernibilidad galoisiana, armonía negativa riemanniana), éstas adquieren su existencia solo gracias a su descripción “poco a poco”, su definición evolutiva, su teorematización y su uso.

realidad, más “al revés que al derecho” (30, *sic*). Desde el inicio del cuento –“el nombre Elsa de ella es otro nombre Elsa” (27)–, la visión se apoya sobre un entorno negativo –“no se imaginarán exactamente, como es lo malo que me pasa” (28)–, al igual que la *teoría matemática de la ambigüedad* se apoya sobre las carencias de estructura que dan lugar posteriormente a la elevación del edificio matemático.

-----

Debe señalarse que el ejercicio que hemos aquí realizado, concentrándonos en la *narrativa temprana* de Felisberto, podría extenderse ampliamente a su obra completa. No obstante, ese desarrollo llevaría a un volumen entero, que por supuesto no podemos abordar aquí.

## Referencias

- Felisberto.** (2015). Montevideo: *Revista de la Biblioteca Nacional*, 10.
- Felisberto en borrador.** (2016). Montevideo - *Biblioteca Nacional: Lo que los archivos cuentan*, 4.
- Bajter, I. & Hamada, K.** (2015). *Una reseña sobre Fulano de tal publicada en 1931. Un momento en las primeras lecturas de Felisberto Hernández*. *Revista de la Biblioteca Nacional*, 10, 45-53.
- Blixen, C.** (2015). El hilo perdido de Felisberto. *Revista de la Biblioteca Nacional*, 10, 293-309.
- Bourgne, R. & Azra, J.-P. (Eds).** (1962). *Écrits et mémoires mathématiques D'Évariste Galois*. Jacques Gabay.
- Coco, L. (Ed).** (2023). *Florenskij, Pavel. Al confine dei mondi (1901-1914)*. Aragno.
- Coco, L. (Ed).** (2024). *Pavel Aleksandrovič Florenskij. Poesie (1900-1907)*. Nino Aragno Editore.
- Corona-Martínez, L.** (2015). Beginnings de Felisberto Hernández: los primeros libros bajo otra perspectiva”. *Revista de la Biblioteca Nacional*, 10, 13-43.
- Díaz, J. P.** (1986). *El espectáculo imaginario. Juan Carlos Onetti y Felisberto Hernández ¿Una propuesta generacional?* Arca.
- Díaz, J. P.** (2015). *Felisberto Hernández. Vida y obra*. El Cuenco de Plata.
- Elena, S.** (2008). *Felisberto Hernández. Música completa para piano*. CD Audio. AADI - CAPIE SADAIC.
- Elena, S.** (2022). *Del músico al escritor*. [Conferencia]. Disponible en YouTube.
- Ferré, R.** (1986). *El acomodador. Una lectura fantástica de Felisberto Hernández*. Fondo de Cultura Económica.
- Ferreirós, J.** (2000). *Riemanniana selecta*. CSIC.
- Giraldi Dei Cas, N.** (1975). *Felisberto Hernández. Del creador al hombre*. Ediciones de la Banda Oriental, 1975.
- Giraldi Dei Cas, N.** (1998). *Felisberto Hernández. Musique et littérature*, Indigo & Côté-femmes éditions.
- González de León, M. del C.** (2022). *El palimpsesto intencionado. El proyecto literario de Felisberto Hernández*. Quiroga Ediciones.
- González de León, M. del C.** (2015). Por las tierras de la escritura: la escena de Felisberto Hernández (primeros textos). *Revista de la Biblioteca Nacional*, 10, 55-70.
- Herhardt, C.** (2011). *Évariste Galois. La fabrication d'un icône mathématique*. EHESS.
- Hernández, F.** (2018). *Cartas y Partituras* (Introducción y notas Daniel Morena). Buena Vista Editora.
- Hernández, F.** (2022). *Correspondencia reunida (1917-1958)*. (Edición de Ignacio Bajter). Ediciones Sin Fin.
- Hernández, F.** (1925). *Fulano de tal*, sin lugar, sin pie de impresora, sin fecha (Montevideo: Rodríguez Riet, 1925).
- Hernández, F.** (1930). *La cara de Ana*. Mercedes: sin pie de impresora.
- Hernández, F.** (1931). *La envenenada*. Florida: sin pie de impresora.
- Hernández, F.** (1929). *Libro sin tapas*. Sin lugar, sin pie de impresora, sin fecha (Rocha: La Gaceta, 1929).
- Hernández, F.** (2010). *Los libros sin tapas* (Prólogo de Jorge Monteleone). El Cuenco de Plata.
- Hernández, F.** (1985). *Novelas y cuentos*. (Prólogo de Julio Cortázar. Selección, notas, cronología y bibliografía de José Pedro Díaz). Biblioteca Ayacucho.
- Hernández, F.** (1942). *Por los tiempos de Clemente Colling*. González Panizza Hermanos editores.
- Hernández, F.** (1969). *Primeras invenciones* (Prólogo: Norah Giraldi de Deilas. Arca.
- Larchet J.-C. & Florensky, P.** (1992). *La perspective inversée suivi de L'iconostase. L'Âge d'Homme, 1992, (Sophia). Revue d'histoire et de philosophie religieuses, 73e année n°1,*

- Janvier-mars 1993, 105-106.
- Laugwitz, D.** (2008). *Bernhard Riemann 1826-1866. Turning Points in the Conception of Mathematics*. Birkhäuser.
- Lautman, A.** (2011). *Ensayos sobre la dialéctica, estructura y unidad de las matemáticas modernas (1935-1942)* (edición de Fernando Zalamea). Universidad Nacional de Colombia.
- Lespada, G.** (2014). *Carencia y literatura. El procedimiento narrativo de Felisberto Hernández*. Corregidor.
- Monges-Nicolau, G.** (1994). *La fantasía en Felisberto Hernández a la luz de la poética de Gaston Bachelard*. UNAM.
- Moraes, M.** (2016). De gira con Felisberto Hernández. *Lo que los archivos cuentan 4* - Montevideo - Biblioteca Nacional.
- Nieto, A.** (2008). *Cartas a Felisberto*. Catálogo. Galería Jorge Mara - La Ruche.
- Novalis.** (1976). *La Enciclopedia (Notas y fragmentos)*. Editorial Fundamentos.
- Novalis.** (2007). *Notes for a Romantic Encyclopedia: Das Allgemeine Brouillon (Traducción, notas, introducción David W. Wood)*. State University of New York Press.
- Onetti, J. C.** (2019). *Obras completas III, Felisberto el «naïf»* pp. 532-535. Galaxia Gutenberg.
- Oppo, A. & Spano, M.** (Eds). 2021. *Pavel Aleksandrovic Florenskij. Gli immaginari in geometria. Estensione del dominio delle immagini bidimensionali nella geometria Mimesis*.
- Panesi, J.** (1993). *Felisberto Hernández*. Beatriz Viterbo Editora.
- Rama, Á.** (1969). *Capítulo Oriental. La historia de la literatura uruguaya*, No. 29 (*Felisberto Hernández*), Montevideo: Centro Editor de América Latina, 1968.
- Rama, Á.** (1986). *La novela en América Latina. Panoramas 1920-1980*, “Medio siglo de literatura latinoamericana” (1922-1972)”. Universidad Veracruzana / Fundación Ángel Rama.
- Riemann, B.** (1990). *Oeuvres mathématiques*. (1ª ed. 1898). Jacques Gabay.
- Rivas-Cortés, M.** (2005). Felisberto Hernández visto por Ángel Rama. *Revista Iberoamericana*, LXXI (211), 381-385.
- Rosario-Andújar, J. A.** (1999). *Felisberto Hernández y el pensamiento filosófico*. Peter Lang.
- Tarkovski, A.** (2002). *Le Temps scellé*. Cahiers du cinéma.
- Tucker, R. (Ed)**. (1968). *Mathematical Papers by William Kingdon Clifford*. AMS Chelsea Publishing.
- Valéry, P.** (1957). *Cahiers* (Facsimilar íntegro). Centre National de la Recherche Scientifique [1957-1961].
- Valéry, P.** (1974). *Cahiers* (Edición establecida, presentada y anotada por Judith Robinson-Valéry. Gallimard (Bibliothèque de la Pléiade).
- Valéry, P.** (1990). *Cahiers 1894-1914*, XIII vols. (editados por Nicole Celeyrette-Pietri, Judith Robinson-Valéry). Gallimard.
- Valéry, P.** (2007). *Cuadernos (1894-1945)* (editados por Andrés Sánchez). Galaxia Gutenberg.
- Valéry, P.** (1990). *Teoría poética y estética* (c. 1920-1940). La Balsa de la Medusa.
- Vaz Ferreira, C.** (1979). *Lógica viva. Moral para intelectuales* (1908-1910). Biblioteca Ayacucho.
- Weil, A.** (1960). De la métaphysique aux mathématiques. *Sciences*, 60, 52-56.
- Xaubet, H.** (1995). *Desde el fondo de un espejo: autobiografía y (meta)ficción en tres relatos de Felisberto Hernández*. Linardi y Risso.
- Zalamea, F.** (2026). “Estratificaciones de lo invisible. Borges y Clifford”, *Variaciones Borges*, por aparecer (2026).
- Zalamea, F.** (2026). *Crítica matemática*. [Manuscrito por publicar]. Universidad Nacional de Colombia.
- Zalamea, F.** (2022). Géométrie, Topologie, Riemann, et les nuances vivantes de la pensée mathématique chez Bachelard (avec un contrepoint autour de Simone Weil). *Bachelard Studies*, (1-2), 69-78.
- Zalamea, F.** (2019). *Grothendieck. Una guía a la obra matemática y filosófica*. Universidad Nacional de Colombia.
- Zalamea, F.** (2019). La emergencia abismal de la matemática moderna. (I) Galois (1811-1832). *Mathesis*, IV (1), 1-23.
- Zalamea, F.** (2021). *Modelos en haces para el pensamiento matemático*. Universidad Nacional de Colombia.
- Zalamea, F.** (2012). *Peirce’s Logic of Continuity*. Docent Press.
- Zalamea, F.** (2006). Signos triádicos. Lógica, literatura, artes. Nueve cruces latinoamericanos. *Mathesis*, III.1, 1-155.

## Ensayo/ Assay

### Premio Nobel de Física 2025: los galardonados, el motivo, el legado

#### Nobel Prize in Physics 2025: the laureates, the reason, the legacy

El año 2025 fue proclamado por la Asamblea General de las Naciones Unidas como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas para conmemorar los 100 años de la mecánica cuántica y su importancia y aplicaciones en la vida diaria. El Premio Nobel de Física 2025 fue otorgado a John Clarke, Michel H. Devoret y John M. Martinis por el “descubrimiento del efecto túnel macroscópico de la mecánica cuántica y la cuantización de la energía en un circuito eléctrico”, y cobra especial relevancia por haberse otorgado en este año. Según palabras de uno de los galardonados, el Prof. Clarke, el Nobel reconoce cómo los principios fundamentales de la mecánica cuántica, establecidos hace 100 años, se extienden a sistemas visibles a escala humana, un avance que sentó las bases de la tecnología cuántica actual y su aplicación práctica en muchos equipos de alta tecnología, abriendo el sendero hacia la computación cuántica, es decir, el uso práctico de estados cuantizados en forma de cúbits (unidad básica de información en la computación cuántica - superconductora). Los experimentos que condujeron a estos resultados se realizaron en la Universidad de California Berkeley en 1984 y 1985, siendo Clarke el director del laboratorio, Martinis estudiante de doctorado y Devoret investigador postdoctoral. En el laboratorio de Clarke se investigaba en ese entonces en los campos de la superconductividad y la electrónica superconductora, explorando los efectos cuánticos en circuitos superconductores.

Los galardonados tienen en común una trayectoria académica y científica similar. Clarke, nacido en 1942 en Cambridge, Reino Unido, obtuvo en el laboratorio de Cavendish de la Universidad de Cambridge su licenciatura en Física en 1964 y su doctorado en 1968,



John Clarke, Michel H. Devoret y John M. Martinis.  
Foto tomada de Physics Today <https://doi.org/10.1063/pt.axiw.hoep>

en tanto que el postdoctorado (1969) lo obtuvo en la Universidad de California en Berkeley, donde continuó su carrera académica y científica como profesor. La investigación de Clarke se ha centrado desde el inicio de sus estudios de física en la superconductividad y la electrónica superconductora, en particular el desarrollo y la aplicación de los dispositivos superconductores de interferencia cuántica SQUID (*Superconductor Quantum Interference Device*). Fascinado por los SQUID, su trabajo reveló que la cuantización de la energía y el efecto túnel podían aprovecharse en dispositivos de ingeniería, conectando de forma fundamental la teoría cuántica con la tecnología cuántica. Sus contribuciones abarcan desde los fundamentos de los dispositivos cuánticos hasta aplicaciones multidisciplinarias que abarcan campos como la medicina (diagnóstico médico), la geofísica, la cosmología, la física de partículas, la información cuántica e, incluso, la búsqueda de materia oscura. El trabajo pionero de Clarke le ha valido numerosos reconocimientos y membresías.

Michel H. Devoret nació en París, Francia, en 1953; se doctoró en física de la Universidad de Paris-Orsay (1982) en el campo de la investigación en física cuántica molecular. Hizo su posdoctorado en el laboratorio de Clarke, en donde midió por primera vez los niveles cuánticos mesoscópicos de una juntura Josephson. Posteriormente regresó a la Universidad de Paris-Saclay, donde fundó el grupo de *Quantronics (QUANTum physics and electRONICS)* en el IRAMIS-CEA. Allí alcanzó grandes logros como la invención de la bomba de electrones, el desarrollo de un bit cuántico superconductor, la primera medición del efecto de la valencia atómica en la conductancia de un solo átomo y la primera observación de las franjas de Ramsey de un átomo artificial superconductor (quantrionio), entre otros. Actualmente Devoret es profesor de física experimental de estado sólido con énfasis en la electrónica mecanocuántica en el Instituto Cuántico de Yale. También es profesor en la Universidad de California, Santa Bárbara.

John Martinis nació en San Pedro, California, en 1958. Obtuvo su doctorado en 1987 en el laboratorio de Clarke en Berkeley, con una tesis motivada por una charla del físico teórico Anthony Leggett en la que especulaba teóricamente si el efecto túnel podía ocurrir en objetos macroscópicos, un reto que aceptó como tema de su tesis doctoral. Hizo su posdoctorado en el Comisariado de Energía Atómica de Saclay (Francia), donde continuó su investigación sobre el efecto Josephson; trabajó en la división de tecnología electromagnética del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Boulder (Colorado), y en el 2004 se vinculó a la Universidad de California, Santa Bárbara, centrando su labor en la computación cuántica (2014-2019), para luego incorporarse al equipo de computación cuántica de Google; allí participó en el avance que llevó a la declaración de “supremacía cuántica” de esa empresa tecnológica. Es cofundador y actual director de tecnología de Qolab, *startup* de computación cuántica que se ha enfocado en el desarrollo de cúbits.

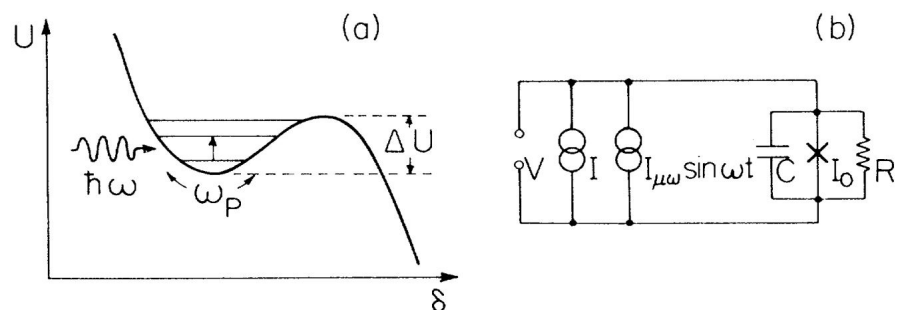
Como se mencionó anteriormente, el vínculo de Clarke con la superconductividad se inició siendo estudiante, bajo la tutoría de Brian Pippard. Su proyecto requería desarrollar un voltímetro extremadamente sensible, capaz de detectar un picovoltio. Casualmente, Clarke había asistido a un seminario que impartió Brian Josephson en 1964 sobre la cuantificación del flujo magnético en un bucle superconductor y el tunelamiento que hacen los pares de Cooper de un superconductor a otro a través de una barrera aislante sin generar voltaje en ella; el flujo de pares de Cooper constituye una «supercorriente», la cual genera una diferencia de fase entre las fases de los parámetros de orden en los dos superconductores. Dos junturas Josephson conectadas en paralelo en un circuito superconductor constituyen el corazón de un SQUID, lo cual se desarrolló experimentalmente en el laboratorio de investigación de Ford. La supercorriente crítica que un SQUID puede soportar, bajo la acción de un campo magnético aplicado, oscila con un período dado por el cuanto de flujo magnético. A Pippard y Clarke se les ocurrió la idea de usar este dispositivo para lograr un voltímetro, acoplado inductivamente una bobina superconductora al SQUID; así, una corriente que pasara por la bobina produciría oscilaciones en la corriente crítica

del SQUID. Si se conectara una resistencia en serie con la bobina se crearía un voltímetro que, según cálculos sencillos, debería tener una sensibilidad del orden de femtovoltios por segundo. En una entrevista (**Pulizzi, 2011**) Clarke afirma que este fue un punto de inflexión en su carrera, pues marcó el rumbo de la investigación que ha seguido durante casi cinco décadas. Clarke se trasladó luego de Cambridge a la Universidad de California en Berkeley, pero siguió trabajando con los SQUID.

El punto esencial es que los SQUID son detectores extremadamente sensibles de señales magnéticas y eléctricas de cualquier origen y convierten un experimento impracticable en algo extremadamente viable (**Clarke, 1971**). Ya en 1986 Clarke nos hablaba del posible uso de los SQUID (**Clarke, 1986**), por ejemplo en biomagnetismo, pues pueden detectar los campos magnéticos débiles que emanan del cerebro humano, así como los movimientos submicroscópicos de los detectores de ondas gravitacionales. Debe tenerse en cuenta que los SQUID operan a temperaturas de helio líquido (4K) y que su energía de ruido aumenta con la temperatura absoluta, de modo que son más silenciosos a 1K que a 4 K o a 77 K.

Antes de los experimentos de los galardonados, se conocía el efecto túnel, el efecto Josephson (Premio Nobel de Física en 1973) en superconductores, los saltos de Shapiro (observados hacia 1968), y se sabía que tanto el efecto túnel como la superposición ocurrían a escala atómica, pero no se habían observado en sistemas macroscópicos. A finales de la década de 1970, Anthony Leggett (Premio Nobel de Física en 2003 por su trabajo teórico sobre superconductores) había predicho teóricamente que, a temperaturas extremadamente bajas, estados macroscópicamente distintos de los superconductores podrían exhibir el comportamiento mecánico cuántico de efecto túnel. Hubo intentos de observar el efecto. En la década de 1980, Martinis recuerda que se tomaron muy en serio la pregunta de Legget y se propusieron demostrarlo.

Para la observación del efecto túnel cuántico macroscópico el trío realizó un experimento riguroso en junturas Josephson a temperaturas de milikelvin (para reducir el ruido). En 1984 observaron (**Devoret et al., 1984**) en una unión Josephson polarizada por corriente  $I$ , y bajo la acción de una perturbación de microondas débil, que cuando la frecuencia de microonda  $\omega$  se aproxima a la frecuencia del plasma de la juntura  $\omega_p$ , aparece un nuevo fenómeno de activación resonante que saca al sistema del estado de voltaje cero. Concluyeron en ese artículo que el efecto proporciona una medición *in situ* de los parámetros de la juntura, información muy útil para investigar el efecto cuántico macroscópico. Un año después (**Martinis et al., 1985**) presentaron la primera observación de niveles de energía cuantizados para la variable macroscópica (la diferencia de fase  $\delta$ ) en una juntura Josephson polarizada por corriente en su estado de voltaje cero, como se esquematiza en la **Figura 1**.



**Figura 1. a)** Gráfica que muestra la dependencia del potencial  $U$  con la variable macroscópica  $\delta$ ; se indican los niveles de energía del pozo con la frecuencia del plasma  $\omega_p$ , la energía de la microonda  $\hbar\omega$ , y la energía del salto cuántico  $\Delta U$ . **b)** Este es un esquema del circuito equivalente de la juntura Josephson con corriente de polarización  $I$  y perturbación de microondas  $I_{\mu\omega}$ . Figura extraída de la referencia **Martinis et al.** (1985), licencia RNP/25/NOV/098547 de la revista *Physical Review Letters*

Los investigadores observaron diferentes posiciones resonantes en las cuales la juntura Josephson (polarizada por corriente y bajo acción de microondas) escapa del voltaje cero, posiciones que concuerdan cuantitativamente con un cálculo mecánico cuántico basado en los parámetros de la juntura medidos según lo reportado en 1984. En esta configuración, los pares de Cooper del sistema actúan como una sola partícula. Concluyeron que estos resultados representaban evidencia de la naturaleza cuántica de la variable macroscópica  $\delta$  y encontraron que la coherencia cuántica entre un estado excitado y el estado fundamental (voltaje cero) puede mantenerse durante tiempos de hasta 40 ns, dependiendo del nivel energético. Al estudiar el régimen térmico (por debajo de 25 mK) de la tasa de escape desde el estado de voltaje cero encontraron que dicha tasa de escape es independiente de la temperatura (por debajo de 25 mK), cuyo valor coincide con la predicción a temperatura cero para el efecto de túnel cuántico macroscópico (**Devoret et al.**, 1985). Se puede afirmar, entonces, que las leyes cuánticas gobiernan no solo las partículas a nivel atómico, sino también estados colectivos en sistemas superconductores macroscópicos.

En opinión de Daniel Domínguez, María José Sánchez y Leandro Tosi (Instituto Balseiro, Argentina), expertos en el campo, la tunelización cuántica macroscópica y la cuantificación de energía en circuitos superconductores han sentado las bases para el uso práctico de estados cuantizados en forma de cúbits, “Ahí la genialidad fue que utilizaron circuitos superconductores, que son muy coherentes, sin disipación, y junturas Josephson que permiten que los niveles sean como los de un átomo artificial; demostraron que el estado del circuito cuántico podría describirse con una función de onda macroscópica, en el sentido que el sistema es mucho mayor que un solo átomo”. Según el director ejecutivo del American Institute of Physics, el premio es un ejemplo de cómo la teoría rigurosa ligada a la experimentación transforma el conocimiento básico en un conjunto de herramientas cuánticas diseñadas para diversas aplicaciones. Este logro histórico inspira a promover contribuciones que sean a la vez conceptualmente claras, experimentalmente rigurosas y tecnológicamente facilitadoras, a medida que vamos pasando de «la ciencia es cuántica» a «la cuántica es ciencia y tecnología», en palabras del editor en jefe de Applied Physics Letter Quantum. Olle Eriksson, físico de la Universidad de Uppsala (Suecia) y presidente del Comité Nobel de Física, afirma que “Es maravilloso celebrar cómo la mecánica cuántica, con un siglo de antigüedad, ofrece continuamente nuevas sorpresas; la mecánica cuántica es la base de toda la tecnología digital”. El trabajo del trío es un ejemplo de “cómo la ciencia guiada por la curiosidad, construida sobre el conocimiento acumulado de generaciones, es la que traza el camino hacia las revoluciones tecnológicas del futuro”, según Ramón Aguado (Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC). Robert Schoelkopf de Yale afirma que hoy en día hablamos de cuántica 1.0 y cuántica 2.0; la primera revolución cuántica tuvo lugar a principios del siglo XX cuando se intentaba comprender qué sucede en la escala de los átomos individuales. El trabajo de Clarke, Devoret y Martinis es la raíz de la cuántica 2.0”.

El legado de este experimento ha sido trascendental. Aquel efecto creado en Berkeley, llamado por algunos “átomo artificial”, se convirtió en el primer ladrillo para desarrollar un cúbits. El legado ha tenido unos avances espectaculares en apenas 25 años, por ejemplo, se han observado cúbits que mantienen su coherencia cuántica hasta varios milisegundos.

Por último, deseo transmitir a la comunidad científica y académica, tal como lo considera Clarke, la importancia de la formación básica y del trabajo colaborativo multidisciplinario. Las aplicaciones de la mecánica cuántica tanto a nivel subatómico como macroscópico requieren de científicos y de ingenieros en diferentes disciplinas con fundamentación cuántica, tal como lo plantean diversos autores (**Rainò et al.**, 2021).

**Maria Elena Gómez**

Miembro de Número

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

## Referencias

- Clarke, J.** (1971). Electronics with superconducting junctions. *Physics Today*, 3037. <https://doi.org/10.1063/1.3022881>
- Clarke, J.** (1986). SQUIDs brains and gravity waves. *Physics Today*, 30-44. <https://doi.org/10.1063/1.881054>
- Devoret, M.H., Martinis, J.M., Esteve, D., Clarke, J.** (1984). Resonant Activation from the Zero-Voltage State of a Current Biased Josephson Junction. *Physical Review Letters*, 53(13), 1260-1262. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.53.1260>
- Devoret, M.H., Martinis, J.M., Clarke, J.** (1985). Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction. *Physical Review Letters*, 55(18), 1908-1911. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1908>
- Martinis, J.M., Devoret, M.H., Clarke, J.** (1985). Energy-Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current Biased Josephson Junction. *Physical Review Letters*, 55(15), 1543-1546. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1543>
- Pulizzi, F.** (2011). Interview: SQUIDs for everything. *Nature Materials*, 10, 262-263. <https://doi.org/10.1038/nmat2996>
- Rainò G., Novotny, L., Frimmer, M.** (2021). Quantum engineers in high demand. *Nature Materials*, 20, 1449. <https://doi.org/10.1038/s41563-021-01080-6>

Ensayo/ Assay

## Premio Nobel de Fisiología o Medicina Linfocitos T reguladores: de la teoría del *horror autotoxicus* al Premio Nobel 2025

### Nobel Prize in Physiology or Medicine Regulatory T lymphocytes: from the horror autotoxicus theory to the Nobel Prize 2025

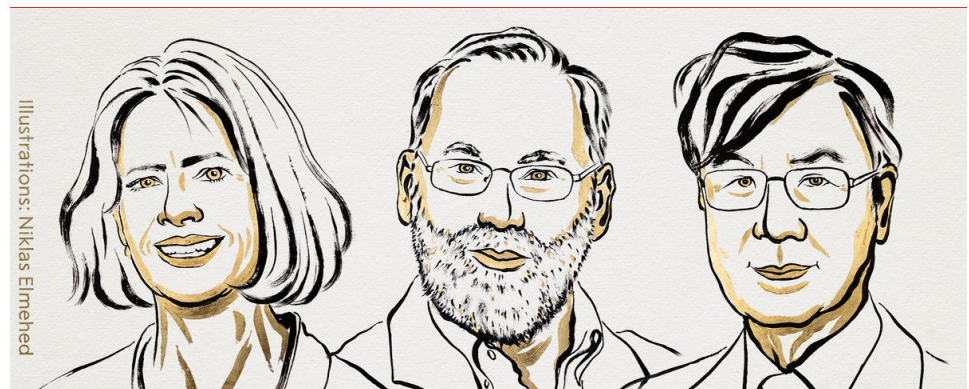
*En la práctica de la tolerancia, nuestro enemigo es el mejor maestro.*

Dalai Lama XIV

Durante la clase sobre los linfocitos T del curso de Inmunología que dicto en el pregrado de Medicina desde hace 20 años, siempre finalizaba hablando de los linfocitos T reguladores y mencionaba que el investigador japonés que los describió inicialmente algún día ganaría el Premio Nobel. El 6 de octubre de 2025 se anunció que el Premio Nobel de Fisiología o Medicina había sido otorgado al japonés Shimon Sakaguchi y a dos norteamericanos, Mary E. Brunkow y Fred Ramsdell, por sus descubrimientos sobre la tolerancia inmune periférica y el papel de los linfocitos T reguladores, conocidos simplemente como Tregs.

La respuesta inmune, una vez activada, debe ser controlada. Este es un principio esencial de la homeostasis inmunológica, ya que una reacción desproporcionada puede manifestarse como hipersensibilidad y daño de los propios tejidos. Para evitarlo, el sistema inmune cuenta con mecanismos de tolerancia que permiten reconocer el “yo” y no atacarlo. Cuando esta tolerancia se rompe, aparecen las enfermedades autoinmunes, que afectan aproximadamente entre un 5 y un 10 % de la población mundial.

La idea de que debían existir mecanismos que impidieran la autodestrucción inmunológica se remonta a finales del siglo XIX, con Paul Ehrlich y su concepto de *horror autotoxicus*, una propuesta teórica que planteaba que el sistema inmune debía poseer alguna forma interna para no atacar su propio organismo. La evidencia experimental surgió a mediados del siglo XX gracias a Peter Medawar, quien demostró la posibilidad de inducir tolerancia adquirida mediante sus experimentos de trasplante en ratones. Estos hallazgos dieron origen al concepto de tolerancia adquirida y le valieron el Premio Nobel



Mary Brunkow, Fred Ramsdell, and Shimon Sakaguchi ganaron el Premio Nobel de Fisiología o Medicina de este año. Tomado de <https://www.nobelprize.org/>

de Medicina en 1960, compartido con Frank Macfarlane Burnet, quien desarrolló la teoría de tolerancia central, explicada por la eliminación clonal de linfocitos T autorreactivos en el timo (Schwartz, 2012).

Siempre se había sospechado la existencia de los linfocitos T reguladores, pero solo hasta 1995 Shimon Sakaguchi describió de manera clara las células T reguladoras (Tregs) como un mecanismo esencial de la tolerancia inmune periférica (Sakaguchi *et al.*, 1995).

### El fenotipo regulador CD4<sup>+</sup>CD25<sup>+</sup>

Durante las décadas de 1970 y 1980 hubo múltiples intentos para identificar subpoblaciones de linfocitos T con capacidad de inducir tolerancia inmunológica, principalmente en modelos murinos. Aunque diversos estudios mostraban indicios de células con propiedades supresoras, no se había logrado definir un marcador específico que permitiera caracterizarlas con claridad. En estos periodos se describieron los linfocitos CD4<sup>+</sup> que expresaban marcadores como el CD5<sup>alto</sup> o el CD45R<sup>bajo</sup>, los cuales parecían estar asociados a funciones reguladoras. Sin embargo, estos marcadores resultaban demasiado comunes dentro del repertorio linfocitario y carecían de la precisión necesaria para delimitar una población celular. Esta falta de definición generó escepticismo y llevó a que, por un tiempo, la existencia de células T con función reguladora fuese considerada más una hipótesis que una realidad demostrada.

Fue entonces cuando se determinó la molécula CD25 (cadena  $\alpha$  del receptor de IL-2) como un marcador más específico de los linfocitos T reguladores. La depleción de linfocitos CD25<sup>+</sup>CD4<sup>+</sup> en ratones produjo un amplio espectro de enfermedades autoinmunes, mientras que la co-transferencia de un pequeño número de células CD25<sup>+</sup>CD4<sup>+</sup> prevenía la aparición de dichas enfermedades (Sakaguchi *et al.*, 1995).

Posteriormente, diversos estudios demostraron que el CD25 no es solo un marcador celular, sino que resulta esencial para la función de las células T reguladoras: los ratones deficientes en IL-2 desarrollaban autoinmunidad y mostraban una reducción en el número de linfocitos T CD25<sup>+</sup>CD4<sup>+</sup>; los ratones deficientes en CD25 o en CD122 (cadena  $\beta$  del receptor de IL-2) también desarrollaban autoinmunidad, y la neutralización de IL-2 con anticuerpos en ratones normales reducía selectivamente las células CD25<sup>+</sup>CD4<sup>+</sup> y provocaba la enfermedad autoinmune.

Estos hallazgos consolidaron la idea de que IL-2 es un factor crítico de crecimiento y supervivencia para las células T reguladoras, y que el CD25, como parte del receptor de alta afinidad para la IL-2 (CD25), es indispensable para su mantenimiento y función. También la eliminación de esta población celular incrementó la respuesta inmune frente a antígenos extraños, mientras que la reconstitución de células CD4<sup>+</sup>CD25<sup>+</sup> normalizaba dicha respuesta. Así, los linfocitos T CD4<sup>+</sup>CD25<sup>+</sup> son esenciales para mantener la tolerancia periférica, suprimiendo tanto respuestas autoinmunes como respuestas excesivas frente a antígenos extraños (Sakaguchi *et al.*, 2007).

### Caracterización del fenotipo regulador CD4<sup>+</sup>CD25<sup>+</sup>FOXP3<sup>+</sup>

El fenotipo de las Tregs se completó a partir de estudios en modelos animales. Previamente se habían descrito síndromes linfoproliferativos en ratones, entre ellos el ratón *scurfy*, que presenta una expansión excesiva de linfocitos T CD4<sup>+</sup>CD8<sup>-</sup> infiltrantes en múltiples órganos, con producción descontrolada de citocinas y manifestaciones de autoinmunidad. Este modelo corresponde a un mutante con una transmisión recesiva ligada al cromosoma X y se sospechaba que su patología se debía a una falla en los mecanismos de regulación de la actividad de los linfocitos T. Finalmente, se identificó un gen mutado perteneciente a la familia forkhead/winged-helix, al que se denominó *Foxp3*. La función normal de *Foxp3* es esencial para la homeostasis inmune, pues controla la proliferación y la actividad de los linfocitos T. Cuando ocurre una mutación de este gen, se produce una alteración grave en la regulación inmunológica, lo que desencadena autoinmunidad sistémica acompañada de linfoproliferación exacerbada (Brunkow *et al.*, 2001).

## La prueba del concepto de las Tregs

La primera descripción clínica del síndrome IPEX (*immune dysregulation, polyendocrinopathy, enteropathy, x-linked*) se remonta a 1982, cuando se reportó una familia con varios niños afectados por una enfermedad grave de inicio temprano. Los pacientes presentaban diabetes mellitus neonatal insulino dependiente de inicio precoz, enteropatía grave con diarrea crónica, dermatitis eczematosa, además de anemia hemolítica autoinmune y otras manifestaciones de autoinmunidad sistémica. El análisis de los antecedentes familiares permitió establecer un patrón de herencia recesiva ligada al cromosoma X (Powell *et al.*, 1982). Casi dos décadas después, en 2001, se confirmó la base genética de este síndrome, no solo se identificaron mutaciones en el gen *Foxp3* en ratones *scurfy*, también se describieron dos familias de pacientes con IPEX y mutaciones en el mismo gen, lo que confirmó que su disfunción es la causa directa del síndrome humano; en ambos trabajos participaron los galardonados Mary E. Brunkow y Fred Ramsdell (Bennett *et al.*, 2001).

Estos hallazgos representan la prueba definitiva del concepto de las células T reguladoras (Tregs), al demostrar que el gen *Foxp3* es indispensable para el desarrollo y la función de las Tregs y que su ausencia conduce a una pérdida de la tolerancia inmune y a una autoinmunidad sistémica grave.

## El futuro de estos hallazgos

En la actualidad, uno de los grandes retos consiste en modular la función de las Tregs de manera específica y controlada. En el contexto de las enfermedades autoinmunes, el objetivo es potenciar la actividad reguladora para restaurar la tolerancia inmune y frenar el daño tisular. En contraste, en el cáncer las Tregs pueden suprimir la respuesta antitumoral, por lo que se busca inhibirlas selectivamente para potenciar la inmunidad frente a su aparición.

El conocimiento derivado de modelos como el ratón *scurfy* y del síndrome humano IPEX también ha impulsado el desarrollo de terapias génicas y estrategias de edición genética (CRISPR/Cas9) orientadas a corregir mutaciones en el *Foxp3* u otros genes asociados a la disfunción inmunológica. Asimismo, se exploran terapias celulares basadas en la expansión y transferencia adoptiva de Tregs que ya se encuentran en fases clínicas tempranas para prevenir el rechazo en trasplantes y controlar enfermedades inflamatorias crónicas. En el registro de ensayos clínicos de Estados Unidos (*ClinicalTrials.gov*), se encuentran 71 estudios que emplean linfocitos T reguladores (Tregs) en sus protocolos de investigación.

A más de un siglo del *horror autotoxicus* de Ehrlich, el reconocimiento del Premio Nobel a los descubridores de los linfocitos T reguladores simboliza no solo la validación de una hipótesis visionaria, sino también la promesa de nuevas terapias capaces de restaurar la tolerancia inmune y transformar la medicina personalizada en el siglo XXI.

### John M. González MD, Ph.D.

Profesor Titular - Universidad de los Andes

Miembro Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

## Referencias

Bennett, C.L., Christie, J., Ramsdell, F., Brunkow, M.E., Ferguson, P.J., Whitesell, L., Kelly T.E., Saulsbury, F.T., Chance, P.F., Ochs, H.D. (2001). The immune dysregulation, polyendocrinopathy, enteropathy, X-linked syndrome (IPEX) is caused by mutations of FOXP3. *Nature Genetics* 27(1), 20-1. <https://doi.org/10.1038/83713>

- Brunkow, M.E., Jeffery, E.W., Hjerrild, K.A., Paeper, B., Clark, L.B., Yasayko, S.A., Wilkinson, J.E., Galas, D., Ziegler, S.F., Ramsdell, F.** (2001). Disruption of a new forkhead/winged-helix protein, scurfy, results in the fatal lymphoproliferative disorder of the *scurfy* mouse. *Nature Genetics*, 27(1), 68-73. <https://doi.org/10.1038/83784>
- Powell, B.R., Buist, N.R., Stenzel, P.** (1982). An X-linked syndrome of diarrhea, polyendocrinopathy, and fatal infection in infancy. *The Journal of Pediatrics*, 100(5), 731-737. [https://doi.org/10.1016/s0022-3476\(82\)80573-8](https://doi.org/10.1016/s0022-3476(82)80573-8)
- Sakaguchi, S., Sakaguchi, N., Asano, M., Itoh, M., Toda, M.** (1995). Immunologic self-tolerance maintained by activated T cells expressing IL-2 receptor  $\alpha$ -chains (CD25): Breakdown of a single mechanism of self-tolerance causes various autoimmune diseases. *Journal of Immunology*, 155(3), 1151-64. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.155.3.1151>
- Sakaguchi, S., Wing, K., Miyara, M.** (2007). Regulatory T cells – a brief history and perspective. *European Journal of Immunology*, 37(Suppl 1), S116-23. <https://doi.org/10.1002/eji.200737593>
- Schwartz RH.** (2012). Historical overview of immunological tolerance. *Cold Spring Harbor Perspective Biology*, 4(4), a006908. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a006908>. PMCID: PMC3312674. PMID: 2239509

## Premio Nobel de Química a los diseñadores de estructuras metalorgánicas

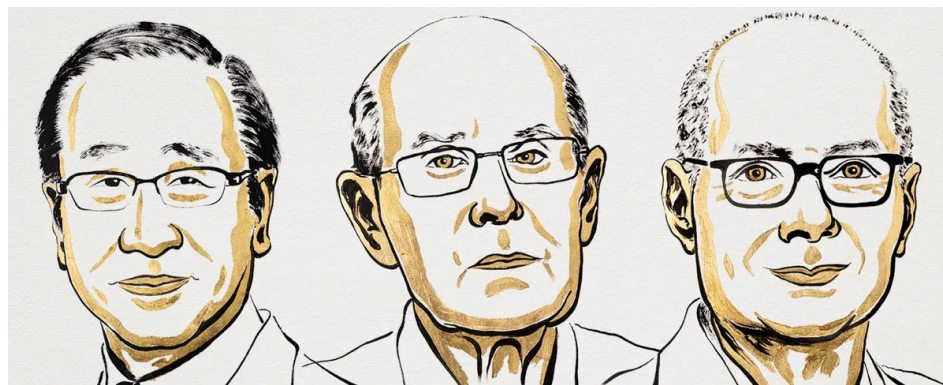
### Nobel Prize in Chemistry awarded to designers of metal-organic frameworks

La Real Academia Sueca de Ciencias otorgó el Premio Nobel de Química de 2025 a tres científicos por la síntesis de estructuras metalorgánicas (*metal-organic frameworks* - MOF) de singular importancia. Al hacer el anuncio, el presidente del Comité Nobel de Química, profesor Heiner Linke, comentó que este material sintético se parecía a la cartera de Hermione.

Para los lectores de este comentario que no conozcan las historias de Harry Potter hay que explicar que Hermione era su mejor amiga en Hogwarts, la academia de magia donde los dos estudiaban. Hermione era una estudiante muy aventajada y en su pequeña cartera llevaba, obviamente por arte de magia, mil cosas que por fuera ocupaban un volumen inmensamente mayor que el de la carterita. Para ser más claro, y que me entiendan también quienes fueron niños antes de Harry Potter, diría que esa carterita se parecía a la de Mary Poppins, de la que ella sacaba lámparas, percheros, muebles y hasta matas bien crecidas.

Los lectores serios de esta reseña me perdonarán si les parece esta una introducción infantil, pero no es ocurrencia mía; así fue presentado el premio y así apareció la noticia en casi todos los diarios del mundo. Hay que decir que el profesor Linke no estaba muy lejos de la verdad.

El primer premiado es Richard Robson, Profesor Honorario de la Escuela de Química en la Universidad de Melbourne en Australia. En 1989 el Profesor Robson publicó los detalles de la síntesis de una estructura química interesante, no existente en la naturaleza (**Hoskins & Robson**, 1989). Según explicó, inspirado en el cristal de diamante, se le ocurrió que podría construir algo parecido y, así, diseñó con sus colaboradores un material de forma piramidal con átomos de cobre en los vértices, unidos por cadenas orgánicas de diversos tipos. Los espacios internos del cristal de diamante son pequeños, pero en estas nuevas estructuras imaginadas por Robson los espacios seguramente serían mucho más grandes y podrían albergar moléculas diversas. A medida que continuó desarrollándolas, muchos otros grupos se unieron al esfuerzo y desde entonces se han creado decenas de miles de estructuras MOF con ese mismo esquema (**Robson**, 2024).



Susumu Kitagawa, Richard Robson, and Omar Yaghi ganaron el Premio Nobel de Química de este año. Imagen tomada de <https://www.nobelprize.org/>

Hacia el final de la década de 1990, Susumu Kitagawa, Profesor Distinguido del Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de Kyoto, Japón, desarrolló un tipo de MOF que podía ‘llenarse’ con moléculas de agua y era suficientemente estable para ser secado subsecuentemente, de manera que dejara espacios internos que podrían llenarse con un gas o con otras moléculas diferentes (Susumu & Mitsuru, 1984). Estos avances fueron de radical importancia para las aplicaciones que ya se preveían. Además, se podían generar condiciones sencillas, generalmente un calentamiento suave, para que el material atrapado se liberara cuando fuera necesario. Las uniones del material extraño en el interior de las estructuras eran adsorciones débiles que podían romperse fácilmente con calor u otros medios.

El tercer honrado con el Nobel es Omar M. Yaghi, Profesor de Química de la Universidad de California en Berkeley y fundador y director del Instituto de Ciencia Global de Berkeley, cuya misión es construir centros de investigación en países subdesarrollados para dar oportunidades de formación de excelencia a jóvenes científicos de esos países. Yaghi logró crear estructuras mucho más estables usando grupos (*clusters*) de iones metálicos, como los de zinc y oxígeno, unidos con cadenas diversas, generalmente las que tienen grupos carboxilo incorporados (Yaghi *et al.*, 1995). Logró, además, aumentar significativamente la superficie interna de las estructuras, alargando esas cadenas mucho más que las de estudios precedentes. Las estructuras MOF obtenidas por él resultaron extraordinariamente estables, incluso a temperaturas relativamente altas, de alrededor de 300 °C, lo que permitía intercambiar las moléculas atrapadas dentro de la estructura con mucha mayor facilidad.

La característica excepcionalmente interesante de estas estructuras metalorgánicas, que ya mencioné, pero quizás sin el énfasis suficiente, es que conforman en su interior una red extensa y compleja de ‘túneles y cuevas’ que les confiere una enorme superficie interna, disponible para la adsorción o captura de muy diversas moléculas. Para dar una idea de la magnitud de dicha superficie, uno de los productos mejor conocidos, la MOF CALF 20 (que hoy se elabora industrialmente), tiene una superficie interna de 7.000 m<sup>2</sup> por gramo de material, lo que equivale a decir que una MOF del tamaño de un cubo de azúcar contiene en su interior la superficie correspondiente a una cancha de fútbol. El material resulta ser una especie de esponja capaz de absorber, retener y liberar (cuando es necesario) grandes cantidades de gases o líquidos. De ahí la presentación del profesor Linke comparándolo con la cartera de Hermione, y la mía, más anticuada, con la maleta de Mary Poppins.

El Comité Nobel de Química destacó el gran ingenio de los investigadores para construir moléculas de alta complejidad, inexistentes en forma natural, capaces de crear en su interior nichos moleculares que, además de una dimensión inmensa, pueden diseñarse a la medida para ‘albergar’ las diferentes moléculas que quieran atraparse y separarse.

En el tiempo transcurrido desde los trabajos preliminares de diseño y síntesis piloto, se ha creado una gran variedad de MOF con objetivos precisos, y se han empezado a desarrollar proyectos de aplicación ingeniosos y de gran utilidad. Mencionaré solo algunos pocos para dar una idea del impacto real, pero ya hay en la literatura miles de artículos científicos en este campo.

Una de las primeras aplicaciones contempladas fue la captura del CO<sub>2</sub> expelido por las chimeneas de plantas industriales y calderas. Dadas las muy conocidas implicaciones que ello tiene para el cambio climático global, no es necesario argumentar demasiado sobre la importancia ambiental que entraña la posibilidad de atrapar el CO<sub>2</sub> antes de que se libere a la atmósfera. Eso que en teoría se concibió como una posibilidad mediante el uso de las MOF, hoy ya es una realidad en la producción industrial. La multinacional europea BASF-SE produce cientos de toneladas del sorbente CALF 20, el cual captura CO<sub>2</sub> separándolo de otros gases, como el N<sub>2</sub> del aire. La empresa suiza NovoMOF AG tiene un producto similar, algo menos avanzado que el anterior, pero que también se produce a nivel industrial. Decarbontek, Inc., otra compañía pionera en este campo, ha lanzado comercialmente una MOF denominada DCF1 con ese mismo objetivo; su producción, que todavía es modesta, significa que ya hay otra empresa operando en el mercado de captación de CO<sub>2</sub>.

Otra aplicación de gran importancia se finca en la posibilidad de atrapar agua de la atmósfera, incluso en zonas desérticas, y devolverla al usuario como agua potable usando aparatos portátiles de bajo peso. Se han desarrollado MOF capaces de adsorber agua del aire en zonas con baja humedad relativa, entre ellas cabe mencionar la MOF-801 (MOF801 =  $Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarato})_6$ ), que logra extraer del aire 2,8 litros/día por cada kilogramo de MOF utilizado, en condiciones de 20 % de humedad relativa (es decir condiciones muy secas, como las de los desiertos). Después de capturada de la atmósfera, el agua se le devuelve al usuario usando la energía producida por un pequeño panel solar común y corriente. Los equipos de este tipo pueden suministrar agua potable a comunidades o grupos que viven en zonas muy áridas y aisladas, sin acueductos ni acuíferos de otro tipo, con todo lo que eso significa para esas poblaciones humanas. Hay varios proyectos similares que recurren a diferentes MOF.

También se han propuesto productos MOF que podrán utilizarse en sistemas de purificación de aguas: la empresa Watch Water GmbH (Alemania) ofrece una MOF llamada “FERROLOX-X” en forma granulada para adsorber y así eliminar metales pesados, arsénico, fosfatos, cromatos y más. La misma empresa ha presentado su producto “HydroSorb” como un sistema de adsorción que utiliza MOF para eliminar pesticidas, residuos farmacéuticos, sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas empleadas en la fabricación de superficies no adherentes, así como metales pesados.

La compañía NovoMOF desarrolló un sistema de desalinización por adsorción de sales con MOF. Hay otros productos en proceso, pero el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales con esta tecnología todavía debe superar desafíos de estabilidad de materiales y costos de producción.

Una de las estrategias para la transición energética a sistemas que no producen gases de efecto invernadero es la acumulación y el transporte de energía usando el  $H_2$  que se produce con los excedentes de energías solar y eólica, el combustible no contaminante ideal. Sin embargo, su transporte es un reto importante porque el  $H_2$  es explosivo y se requiere alta presión y muy baja temperatura para que se mantenga en estado líquido. Estos problemas logísticos podrán resolverse con menor riesgo y menos requisitos tecnológicos costosos si dicho combustible se transporta adsorbido en un soporte sólido inerte que mantenga la temperatura y la presión ideales, para lo cual se han desarrollado MOF que podrían almacenarlo en grandes cantidades.

Asimismo, las MOF ofrecen una gran oportunidad para el desarrollo de nuevos catalizadores. Por un lado, muchas reacciones se podrán acelerar acercando las moléculas reactantes y manteniéndolas en un espacio reducido. Por otro, es posible introducir sitios activos en esas estructuras MOF (metales y grupos funcionales) para acelerar o dirigir reacciones químicas específicas.

Al recomendar el premio Nobel para este desarrollo, el Comité Nobel de Química señaló que abre posibilidades para el diseño de materiales novedosos y constituye una verdadera “arquitectura molecular”. Más allá de una aplicación concreta, el premio destaca el hecho general de que las MOF permiten crear ‘habitaciones moleculares’ dentro de un sólido, cavidades que se pueden ‘personalizar’ para albergar distintos invitados químicos.

Se premió, así, la inventiva, la imaginación y la habilidad para concebir y sintetizar lo que no existe. En este caso, además, ya ha pasado el tiempo suficiente desde los experimentos iniciales para que se hayan dado, a partir de las ideas originales, avances tecnológicos de impacto real y pruebas piloto que están a punto de producir otros adicionales.

La idea original se ha ramificado y multiplicado en miles de artículos científicos, en centenares de nuevas estructuras sintetizadas y en decenas de patentes industriales, varias ya en producción. Se unen en este premio la teoría brillante y su aplicación de gran impacto.

#### **Moisés Wasserman Ph.D.**

Profesor Emérito - Universidad Nacional

Académico Honorario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

## Referencias

- Hoskins, B. F. & Robson, R.** (1989). Infinite polymeric frameworks consisting of three dimensionally linked rod-like segments. *Journal of the American Chemical Society*, *111* (15), 5962-5964. <https://doi.org/10.1021/ja00197a079>
- Robson R.** (2024). The historical development of the concepts underlying the design and construction of targeted coordination polymers/MOFs: A personal account. *Chemical Record*, *24*(5), e202400038. <https://doi.org/10.1002/tcr.202400038>
- Susumu, K. & Mitsuru, K.** (1998). Functional Micropore Chemistry of Crystalline Metal Complex-Assembled Compounds. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, *71*, 1739–1753. <https://doi.org/10.1246/bcsj.71.1739>
- Yaghi, O. M., Guanming, L., Hailian, L.** (1995). Selective binding and removal of guests in a microporous metal–organic framework. *Nature*, *378*, 703-706. <https://doi.org/10.1038/378703a0>

## El Premio Abel 2025

### The Abel Prize 2025

#### Introducción

El siglo XIX en matemáticas fue un siglo de varias “revoluciones”<sup>1</sup> en matemáticas. Me refiero, en primer lugar, a los trabajos del húngaro János Bolyai (1802-1860) y el ruso Nicolai Lobachevski (1792-1856), los cuales dieron origen a las geometrías no euclidianas, rompiendo un paradigma de siglos con respecto a la unicidad de la geometría euclidiana como la “verdadera” teoría sobre el espacio en que vivimos. En segundo lugar deben mencionarse los importantes trabajos en álgebra de dos jóvenes matemáticos fallecidos prematuramente, el francés Evariste Galois (1811-1832) y el noruego Neils Heinz Abel, trabajos que marcaron el desarrollo de este campo a partir de entonces: Galois con su teoría de grupos y Abel al resolver de manera negativa la posibilidad de encontrar mediante una fórmula las raíces de las ecuaciones de quinto grado en términos de sus coeficientes a partir de radicales. Las otras grandes revoluciones del siglo XIX fueron la creación, a finales del siglo, de la lógica matemática de Boole-Frege y la teoría de conjuntos de Georg Cantor.

#### Neils Henrik Abel



Niels Henrik Abel nació en Findo, Noruega, el 5 de agosto de 1802. En 1815 estudió en la escuela de la Catedral de Cristianía, hoy Oslo, donde “tuvo la suerte de tener como profesor a **Berndt Michael Holmbøe** (1795-1850), quien reconoció el genio de Abel cuando tenía 17 años y predijo que sería uno de los grandes matemáticos del mundo” (Kline, 1972). Abel se hizo famoso por haber demostrado en 1824 que no hay una fórmula para hallar todas las raíces de una ecuación de quinto grado en términos de sus coeficientes por medio de radicales. Publicó sus resultados en un pequeño panfleto con sus propios recursos ([https://es.wikipedia.org/wiki/Niels\\_Henrik\\_Abel#/media/Archivo:Niels\\_Henrik\\_Abel\\_\(1802\\_-1829\).jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Niels_Henrik_Abel#/media/Archivo:Niels_Henrik_Abel_(1802_-1829).jpg))

El trabajo de Abel no fue bien entendido por no poder extenderse en razón de sus limitaciones económicas. Por medio de una beca pudo viajar y conocer a varios de los matemáticos más importantes de la época, como Legendre, Laplace, Cauchy y Lacroix, quienes lo ignoraron (Kline, 1972). Cuando sus fondos se agotaron viajó a Berlín y trabajó al lado del matemático alemán August Crelle (1780-1855), entre 1825 y 1827, quien luego publicaría su trabajo, bastante mejorado, en el *Journal für die reine und angewandte Mathematic* (Revista de Matemáticas Puras y Aplicadas) (Katz, 1998), mejor conocido como *Journal de Crelle*, con lo cual comenzó a ser valorado. Posteriormente

<sup>1</sup> Este término es bastante controvertido, pero me parece valioso para divulgar los grandes desarrollos de la matemática en el siglo XIX; por ello recomiendo la lectura de *Revolutions in Mathematics*, editado por Donald Gilles, en 1992.

tuvo que regresar a Cristianía muy enfermo y allí murió de tuberculosis en 1829. Otra de las contribuciones de Abel fue el método general que desarrolló para la construcción de las funciones periódicas recíprocas de la integral elíptica.

## El Premio Abel

En 1895 Alfred Nobel (1833-1896), ingeniero e industrial sueco, estipuló como última voluntad la creación del galardón internacional que se otorga cada año para reconocer a personas o instituciones que hayan llevado a cabo investigaciones, descubrimientos o contribuciones notables para la humanidad en el año anterior o en el transcurso de sus actividades. Los Premios Nobel ([https://es.wikipedia.org/wiki/Premio\\_Nobel](https://es.wikipedia.org/wiki/Premio_Nobel)) comenzaron a entregarse en 1901 en las categorías de Física, Química, Fisiología o Medicina, Literatura y Paz, pero no se contempló el campo de las matemáticas. En ese contexto, en 1897 el gran matemático noruego Sophus Lie (1842-1899) propuso crear un premio en matemáticas equivalente al Nobel. Ese premio se llamaría Premio Abel en reconocimiento de Neils Henrik Abel. Su idea se concretó apenas en el 2001, cuando la Academia Noruega de las Ciencias y las Letras, bajo el auspicio del gobierno de Noruega, lo creó para distinguir la labor excepcional desarrollada por un matemático, que sería escogido por un comité de cinco matemáticos de distintos países. El galardón anual lo otorga el Rey de Noruega a un matemático destacado sin importar su edad, a diferencia de la Medalla Fields, creada en 1933 (<https://rsmc.es/premios/otros-premios/medallas-fields/> o [https://www.ugr.es/~eaznar/historia\\_premios\\_fields.htm](https://www.ugr.es/~eaznar/historia_premios_fields.htm)) para enaltecer el trabajo de matemáticos menores de 40 años.

Por su cuantía económica (755.000 €), el Premio Abel es considerado por muchos el equivalente del Premio Nobel de las Matemáticas. Entre sus propósitos está el de darle publicidad a las matemáticas y aumentar su prestigio, especialmente entre los jóvenes. Fue entregado por primera vez en el 2003 al matemático francés Jean Pierre Serre (1926 - ) por sus contribuciones a la geometría algebraica, la topología algebraica y la teoría de números (<https://abelprize.no/winners>).

## Premio Abel 2025

Este año el premio fue otorgado al matemático japonés Masaki Kashiwara, nacido el 30 de enero de 1947 en Yūki, prefectura de Ibaraki, Japón. Es profesor de la Universidad de Kyoto y miembro de la Academia Francesa de Ciencias y de la Academia de Japón. Su interés por las matemáticas comenzó siendo muy joven, cuando encontró la solución a un ejercicio escolar: calcular el número de grullas y tortugas contenidas en una caja cerrada, sabiendo que hay 6 cabezas y 20 patas. Este problema lo llevó a generalizar un método para resolver problemas de este tipo.



Foto tomada de: <https://www.asianscientist.com/2018/06/academia/2018-kyoto-prize-masaki-kashiwara/>

Años más tarde, en la Universidad de Kyoto, convirtió este problema en el tema de su tesis de Maestría, bajo la orientación de Mikio Sato (1928-2023), su director de tesis y creador de la teoría del análisis algebraico ideada en la década de 1950. “Se trataba de estudiar problemas de análisis relacionados con la resolución de ecuaciones diferenciales con métodos de la geometría como la cohomología de haces” (<https://www.icmat.es/es/actualidad/26-03-25/>). En esa tesis estableció, a sus 23 años, los fundamentos de la teoría de D-módulos, los cuales constituyen “un objeto algebraico que estudia ecuaciones diferenciales en derivadas parciales”, investigación que le valió un amplio reconocimiento internacional.

Kashiwara fue nombrado profesor asociado de la Universidad de Nagoya en 1974, fue investigador en el Instituto Tecnológico de Massachusetts- MIT en 1978 y finalmente se trasladó de nuevo a Kyoto para trabajar en el Instituto Universitario de Estudios Avanzados de Kyoto (RIMS). Entre otros galardones recibidos por el académico destacan el Premio Asahi de Ciencias, el Premio de la Academia Japonesa y el Premio Fujihara (<https://www.icmat.es/es/actualidad/26-03-25/>).

Otro de los logros de Kashiwara es la construcción de la correspondencia Riemann-Hilbert, en la cual integró geometría y análisis algebraicos para obtener una solución elegante de problemas relacionados con ecuaciones diferenciales. También ha resuelto otros problemas matemáticos complejos, incluida la conjetura de Kazhdan-Lusztig y la teoría de bases cristalinas de grupos cuánticos. Asimismo, ha trabajado en la teoría de la representación, con el fin de expresar la simetría mediante elementos básicos del álgebra, y resolvió la conjetura de Kazhdan-Lusztig sobre las representaciones de dimensión infinita al lado de Jean-Luc Brylinski, algo que podría ayudar al estudio de las deformaciones. Sus hallazgos han contribuido a moldear el campo de las matemáticas modernas y se espera que sigan influyendo en su desarrollo.

Su huella es muy importante, y no solo por sus proyectos sino también por la calidad de sus conversaciones. “Kashiwara ha dado charlas informales con planteamientos no publicados que han resultado de gran influencia e inspiración para muchos matemáticos”, como lo señalaron sus anfitriones en el Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT) de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) y la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Para quienes no son matemáticos, afirma Pedro Molina de la National Geographic ([https://www.nationalgeographic.com.es/autores/pedro-molina\\_1290](https://www.nationalgeographic.com.es/autores/pedro-molina_1290)), “puede resultar difícil captar la magnitud de estos logros. Pero basta imaginar que Kashiwara no solo conectó disciplinas, sino que creó un lenguaje común para que diferentes áreas de las matemáticas pudieran hablar entre sí. Su trabajo ha tenido aplicaciones desde la física estadística hasta la teoría de nudos, y ha inspirado a generaciones de investigadores en todo el mundo”.

### **Clara Helena Sánchez Botero**

Profesora pensionada Universidad Nacional de Colombia  
Miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

## **Referencias**

- Gilles, D. (ed).** (1992). *Revolutions in Mathematics*. Oxford Science Publications.
- Holmboe, B. M. (ed.).** (1839). *OEuvres complètes de N. H. Abel, mathématicien, avec des notes et développements, rédigées par ordre du roi*. Gröndahl, Christiania.
- Katz, V.** (1998). *A History of Mathematics. An Introduction*. 2° edition. Addison-Wesley.
- Kline M.** (1972). *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*. Oxford University Press.

## El sembrador de jardines: Enrique Pérez Arbeláez y la floración de una idea

### The garden sower: Enrique Pérez Arbeláez and the flowering of an idea

Hay vidas que parecen trazadas con la paciencia de quien cuida un jardín. La de Enrique Pérez Arbeláez fue así: un ir y venir entre raíces y semillas, entre la tierra colombiana y los invernaderos europeos, entre el silencio del herbario y el bullicio de una ciudad que crecía. Su historia se entrelaza con la de Bogotá, con sus parques, sus árboles y su sueño más verde: el Jardín Botánico que hoy lleva el nombre de José Celestino Mutis, pero que nació del empeño obstinado de este sacerdote y botánico antioqueño.

A mediados de los años veinte, un joven colombiano caminaba entre los senderos del Jardín Botánico de Múnich, donde estudiaba bajo la dirección del maestro Karl Ritter von Goebel. Había viajado por España, Holanda y Alemania para aprender lo que en su país aún era incipiente: la ciencia de las plantas. Allí, entre los invernaderos de helechos y las colecciones vivas del Instituto Botánico de Múnich, Enrique Pérez Arbeláez comprendió que un jardín podía ser mucho más que un refugio estético: era un libro abierto, un aula y una promesa de civilización.

De esos años en Europa nació su tesis, pero también una idea que lo acompañaría por el resto de su vida: que Bogotá debía tener su propio jardín botánico, un espacio donde el conocimiento floreciera con las riquezas del país.

#### *El Herbario: la primera semilla*

Cuando regresó a Colombia en 1927, el padre Pérez encontró un país sin jardines científicos, sin espacios que contuvieran la diversidad vegetal de sus montañas y selvas. Empezó desde lo más pequeño: una mesa, unas cuantas prensas, algunos pliegos de papel secante. Así nació el Herbario Nacional Colombiano, que él mismo describió como “una patria en hojas”. Aquellas colecciones de plantas secas fueron el germen de un pensamiento científico nacional y, al mismo tiempo, el símbolo de su anhelo por ver crecer un jardín vivo donde esas especies pudieran respirar nuevamente bajo el cielo capitalino.

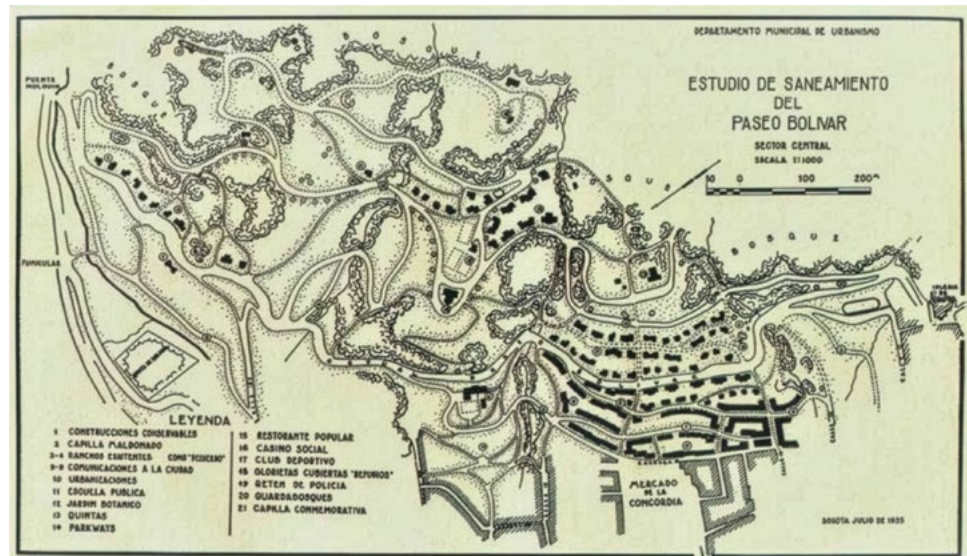
#### *El jardín dentro de la ciudad*

Pero el padre Pérez no era un botánico de gabinete. Soñaba con jardines que dialogaran con la ciudad, con parques que enseñaran y embellecieran. En los años treinta, cuando Bogotá comenzaba su transformación moderna bajo el gobierno de Enrique Olaya Herrera, él fue nombrado asesor botánico de la administración. Sus recomendaciones dieron forma al Parque Nacional Enrique Olaya Herrera, un espacio donde propuso plantar especies nativas, diseñar invernaderos y crear un jardín temático que mostrara la flora de todas las regiones del país.

La idea de un Jardín Botánico para Bogotá empezó a tomar cuerpo entre planos y discusiones urbanísticas. Pérez Arbeláez insistió ante el urbanista norteamericano Harland Bartholomew, invitado por el gobierno para planear el futuro de la capital, que ningún proyecto moderno estaría completo sin un jardín que reflejara la riqueza natural del país. También participó en los debates de la Sociedad de Mejoras y Ornato de Bogotá, que en 1932 imaginó ubicar el jardín al oriente de la Quinta de Bolívar, en los terrenos que conectaban la ciudad con los cerros, siendo promovido por el urbanista Karl Brunner a través de las obras iniciales sobre el Paseo Bolívar.



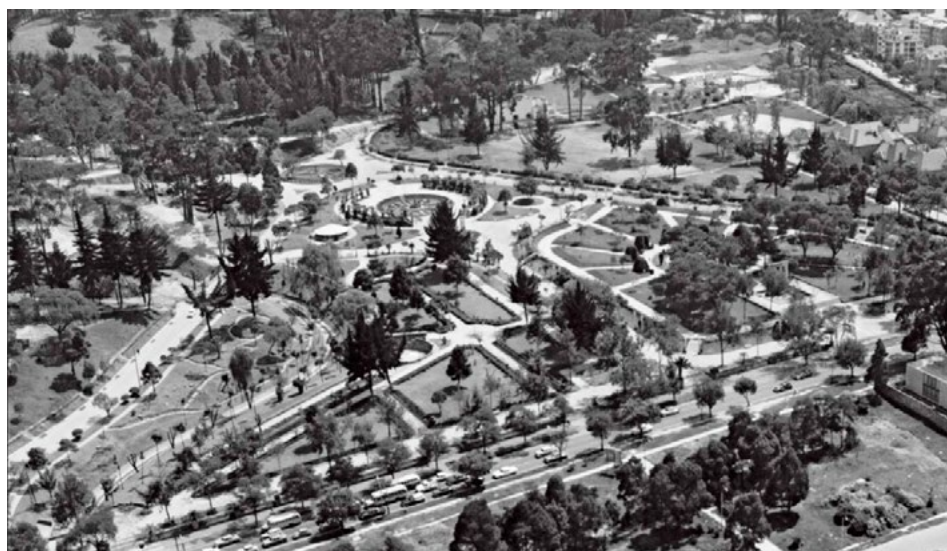
**Figura 1.** Diseño de los jardines y senderos del Parque Nacional. Fuente: Cendales-Paredes, C. (2020).



**Figura 2.** Departamento de urbanismo. Estudio del Paseo Bolívar. Se contempla en el numeral 12 el Jardín Botánico. Fuente: Cendales-Paredes, C. (2020).

### *El Jardín de la Paz: una flor para cada país*

No todos sus sueños encontraron tierra fértil, pero dejaron huellas. Dentro del Parque Nacional se concibió el Jardín de la Paz, un espacio donde florecerían plantas de distintos países de América. Allí, Pérez Arbeláez defendió la presencia de la *Cattleya trianae*, la orquídea rosada que en 1936 sería declarada flor nacional. En su visión, ese jardín debía simbolizar la unión de los pueblos a través de las flores, y Colombia debía ocupar su lugar en el concierto botánico del continente.



**Figura 3.** Vista panorámica de los jardines del Parque Nacional. Fuente: Cendales-Paredes, C. (2020).

### ***El jardín universitario: ciencia y nación***

El padre botánico comprendió pronto que su jardín no podía depender solo de la voluntad política: debía nacer en el corazón del conocimiento. Por eso, cuando el presidente Alfonso López Pumarejo anunció la creación de la Ciudad Universitaria de Bogotá, Pérez Arbeláez vio la oportunidad perfecta. Convenció a las autoridades de incluir allí un Instituto Botánico, con viveros, invernaderos y senderos para la enseñanza de la flora.

En 1937 publicó en la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias un artículo titulado El Jardín Botánico de Bogotá, donde escribió: *Un jardín botánico no es solo un jardín. Es un jardín que educa, que enseña el alma vegetal del pueblo.* En 1938, su sueño parecía brotar. Se inauguró el edificio del Instituto Botánico dentro de la Universidad Nacional, diseñado por los arquitectos alemanes Leopoldo Röther y Eric Lange. Frente a



**Figura 4.** Instituto Botánico en la Ciudad Universitaria. Adentro, el monumento a José Celestino Mutis. Fuente: Zambrano-Pantoja, F. (2018).

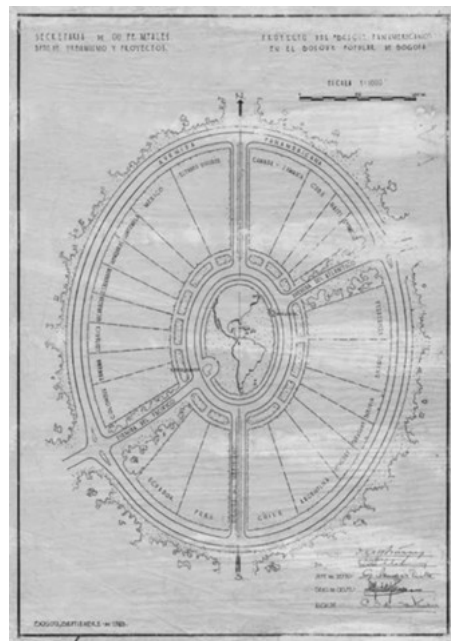
él, se plantó el Jardín Humboldt, adornado con un medallón de piedra que representaba al sabio alemán, donado por la colonia germana durante la celebración del IV Centenario de la ciudad. Era una pequeña semilla del gran jardín que Pérez imaginaba: un espacio donde las plantas nativas se encontrarán con las extranjeras, donde los estudiantes aprenderían con las manos y los ojos.



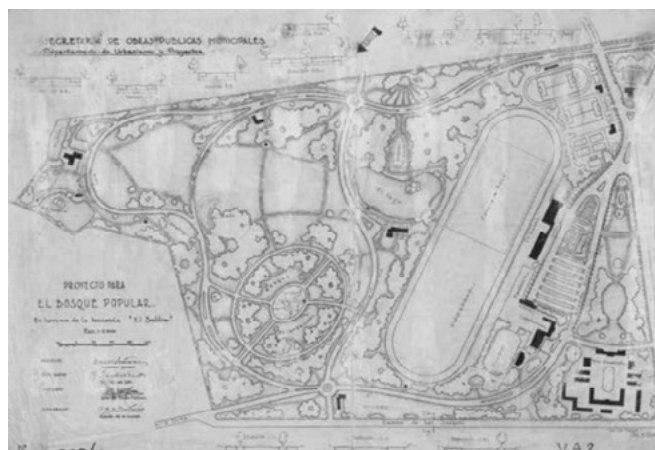
**Figura 5.** Jardín Humboldt, inaugurado en 1938 en la Ciudad Universitaria. Fuente: Zambrano-Pantoja, F. (2018).

### *Un jardín satélite: el Bosque Popular y Panamericano*

A lo largo de los años de planificación urbana hacia el occidente, Karl Brunner imaginó una ciudad que necesitaba extenderse más allá de sus límites conocidos, y en esa visión la ciudad satélite aparecía enlazada con la Ciudad Universitaria que ya avanzaba. Ambos



**Figura 6.** Boceto para el Bosque Panamericano, 1943. Fuente: Martínez-Ruiz, E. (2019).



**Figura 7.** Boceto para el Bosque Popular, 1943. Fuente: Martínez-Ruiz, E. (2019).

proyectos impulsaban la idea de un cinturón verde que diera forma al nuevo borde capitalino, donde el Bosque Popular sería pieza central y los jardines actuarían como líneas vivas en el mapa del desarrollo. En ese proceso, sin proclamarlo aún del todo, Enrique Pérez vio cómo comenzaba a tomar fuerza su convicción de que Bogotá seguía mereciendo un jardín botánico propio.

Cuando en 1943 el Bosque Popular empezó a proyectarse sobre la antigua hacienda El Salitre, comprendió que los sueños urbanos, al madurar, se transforman sin perder su raíz. El bosque debía conectarse con la vía a Engativá, como se había propuesto desde el IV Centenario en 1938, y surgió entonces aquel primer boceto del Bosque Panamericano, dividido por una vía oriente–occidente. Con el tiempo, ese dibujo inicial se expandió: aparecieron jardines con flores representativas de los países, el diseño adoptó una forma ovalada, y en el centro se ubicó a Colombia, con Bogotá como punto de origen del continente simbólicamente trazado. Todo ello se pensó para la Conferencia Panamericana de 1946, que impulsó la idea del parque como una geografía vegetal celebratoria.

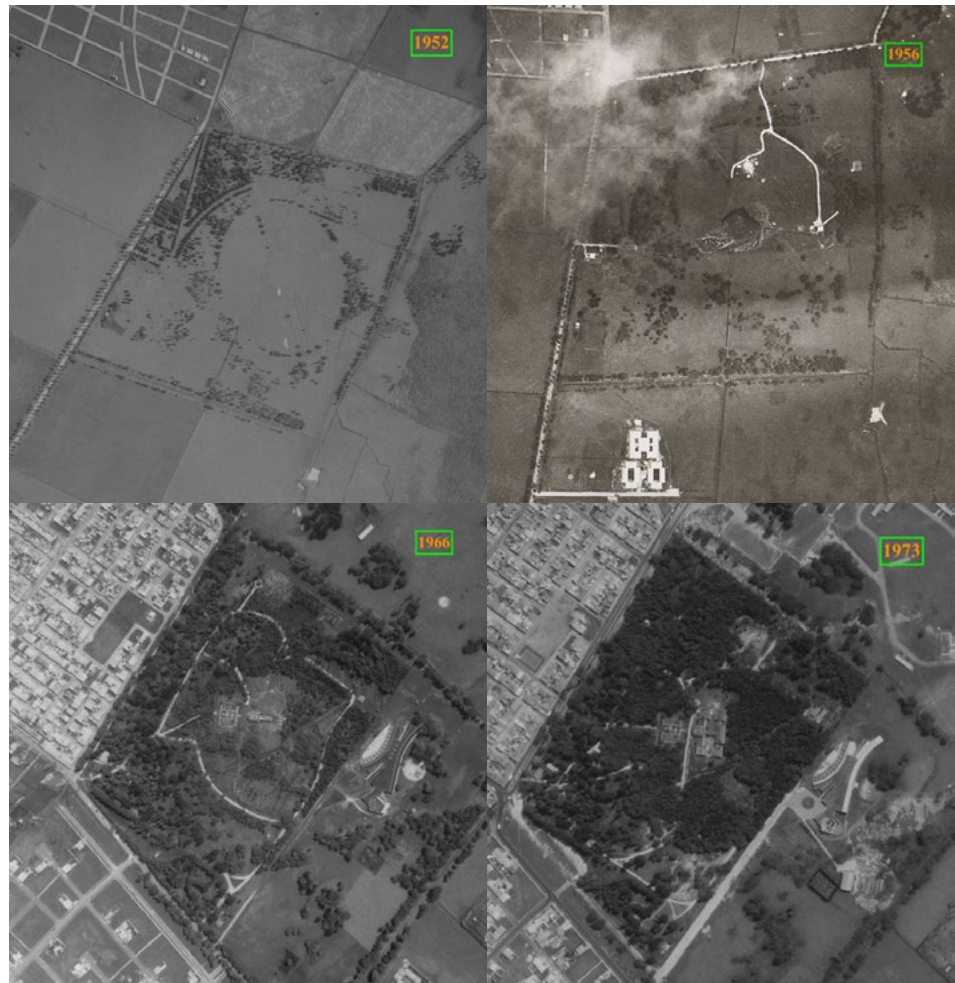
En el terreno quedaron los primeros trazos, visibles aún como indicios del impulso inicial. Al caminar por esos senderos apenas insinuados, el padre Pérez Arbeláez vio cómo los proyectos —ciudad satélite, Bosque Popular, Bosque Panamericano— comenzaban a decantarse en una sola dirección. Aquellas líneas marcadas en el suelo no eran ya simples ideas de expansión urbana sino el germen del futuro Jardín Botánico de Bogotá. Y así, en esos terrenos recién labrados, su anhelo de dotar a la ciudad de un jardín de plantas encontró finalmente el espacio donde podía asentarse y florecer.

### ***El jardín que no se rindió***

Finalmente, en 1955, Enrique Pérez Arbeláez vería florecer su sueño: el nacimiento del Jardín Botánico de Bogotá “José Celestino Mutis”, construido bajo su dirección, con la misma estructura y espíritu de los grandes jardines europeos que conoció de joven.

Las primeras obras respondieron a una visión doble: por un lado, crear un espacio para la investigación botánica y, por el otro, ofrecer a la ciudad un escenario vivo de educación ambiental. En esta primera etapa se establecieron los viveros iniciales, las áreas de experimentación y los trazados básicos del Jardín, aún modestos, pero ya inspirados en el conocimiento que Pérez Arbeláez había acumulado desde su experiencia en los diferentes jardines botánicos que lo inspiraron. Estas obras tempranas cimentaron la estructura funcional del Jardín y le dieron su vocación científica y pedagógica.

A comienzos de los años setenta, el Jardín Botánico de Bogotá experimentó un momento decisivo en su desarrollo institucional: la consolidación de una infraestructura moderna que dio soporte físico y científico a su misión. La construcción de invernaderos



**Figura 8.** Presentación multitemporal de la evolución del Jardín Botánico de Bogotá (1952-1973).  
Fuente: Fotografías aéreas, Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.

especializados, laboratorios, áreas de experimentación y, especialmente, del Tropicario — que con el tiempo se convertiría en el símbolo arquitectónico del Jardín— marcó el paso de un proyecto inicial a una institución con capacidad para investigar, conservar y divulgar la riqueza vegetal del país. Esta plataforma física permitió organizar colecciones vivas más robustas, desarrollar estudios botánicos sistemáticos y atender las demandas crecientes de la ciudad en materia de educación y ciencia ambiental.

Con el crecimiento de Bogotá y la presión sobre su vegetación, el Jardín asumió un papel estratégico: liderar la arborización urbana, orientar la planificación verde de la ciudad. La experiencia acumulada en el manejo de colecciones, la producción de material vegetal y el conocimiento profundo de la flora se convirtió en una herramienta decisiva para incidir en el diseño y mantenimiento del arbolado urbano.

Así, la infraestructura desarrollada en los setenta no solo fortaleció las capacidades científicas internas del Jardín, sino que lo proyectó hacia afuera: hacia la ciudad que crecía, hacia los barrios que necesitaban árboles, hacia los parques y avenidas que requerían especies adecuadas y manejo especializado. De un conjunto de espacios dedicados al estudio botánico, el Jardín evolucionó a un actor central en la planificación verde de Bogotá, un referente en conservación y un laboratorio vivo al servicio de la sostenibilidad urbana.

### ***El legado verde para Bogotá***

El Jardín Botánico que hoy se alza en el occidente de Bogotá es más que una colección de plantas. Es la materialización de una vida dedicada a unir ciencia y poesía, país y naturaleza. Pérez Arbeláez entendió que cuidar un árbol era también cuidar una cultura, y que la botánica podía ser una forma de amor nacional.



**Figura 9.** Vista panorámica del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis

Cuando murió en 1972, dejó a su paso libros, discípulos y un jardín que respira por él. Cada orquídea, cada ceiba, cada helecho que crece en esos terrenos cuenta una parte de su historia: la del hombre que quiso sembrar una nación entera en un jardín.

**Germán Darío Álvarez Lucero**  
Subdirector Técnico Operativo  
Jardín Botánico de Bogotá

### **Fuentes consultadas**

- Arango-Bueno, T.** (2005). *Enrique Pérez Arbeláez: su vida y su obra*. Bogotá: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Cendales-Paredes, C.** (2020). *La vida privada de los parques y jardines públicos. Bogotá, 1886-1938*. Bogotá: Instituto Distrital de Patrimonio Cultural.
- Marquín-Casas, X. et al.** (2025). El Jardín Botánico de Bogotá en la Universidad Nacional de Colombia: historia previa. *Caldasia*, 47, e108864.
- Martínez-Ruíz, E.** (2019). *Espacio bicentenario. La independencia en Bogotá*. Bogotá: Instituto Distrital de Patrimonio Cultural.
- Zambrano-Pantoja, F.** (2018). *1938 El sueño de una capital moderna*. Bogotá: Instituto Distrital de Patrimonio Cultural.

### **Material suplementario**

Ver el material suplementario en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3594/5186>

## Comentario bibliográfico



**Castañeda, R. E. & Rueda, E.** (2025). *Hitos del pensamiento ondulatorio de la luz: a veces incluso también ondula. Saltem aliquando etiam undulatum*. El libro está disponible en acceso abierto en formato digital en el repositorio institucional de la Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/items/961e183c-e757-4651-93b6-4f4b8d6f040e>

### Hitos del pensamiento ondulatorio de la luz: a veces incluso también ondula. *Saltem aliquando etiam undulatum*

La luz, ese fenómeno cotidiano que ilumina nuestro mundo, ha desafiado durante siglos las mentes más brillantes. Desde los primeros efluvios corpusculares de Demócrito hasta la elegante síntesis electromagnética de Maxwell, su naturaleza ha sido objeto de una de las disputas intelectuales más fascinantes de la ciencia. En *Hitos del pensamiento ondulatorio de la luz: a veces incluso también ondula*, los autores nos invitan a un recorrido histórico, conceptual y crítico, y también con destellos poéticos, por cuatro siglos de una de las ideas más bellas de la física: la luz como onda. Articulan la concepción ondulatoria de la luz en torno a seis figuras cardinales: Grimaldi, Huygens, Young, Fresnel, Maxwell y Wolf, cuyos aportes consolidan la visión de la luz como fenómeno ondulatorio.

El libro no es solo una crónica de eventos; es una inmersión en la manera de pensar de quienes, paso a paso, forjaron la concepción ondulatoria de la luz. Más allá de la cronología tradicional, los autores no se limitan a encadenar descubrimientos: reconstruyen los esquemas mentales que hicieron posibles esos hitos y, con ello, desplazan la pregunta de “¿desde cuándo la luz es una onda?” hacia “¿cómo llegamos a concebirla así?”. Según el prefacio, este enfoque recupera el proceso intelectual detrás del hallazgo científico, una dimensión formativa que merece estudiarse por sí misma.

El propósito pedagógico es claro: vincular la comprensión física con la cultura del pensamiento científico, mostrando que la ciencia no es una sucesión de fórmulas y conceptos aislados, sino una construcción humana, atenta a los contextos históricos, espirituales y estéticos de cada época. De ese modo, el libro invita a leer la óptica no solo como teoría y experimento, sino como una práctica de pensamiento que modela nuestra manera de entender la naturaleza.

La obra se estructura en dos grandes partes. La primera, titulada “Camino al siglo Dorado de la concepción ondulatoria de la luz”, nos sitúa en el contexto histórico y científico que permitió el surgimiento y consolidación de la idea de que la luz es una onda. Desde la sorpresa inicial de Francesco Maria Grimaldi ante la difracción, fenómeno que él mismo bautizó, hasta la genialidad experimental de Thomas Young y el rigor matemático de Augustin-Jean Fresnel, los autores reconstruyen con minuciosidad y empatía los momentos clave que marcaron el tránsito desde el dominio corpuscular hacia la visión ondulatoria. Es un relato que humaniza a los científicos al situarlos en su contexto cultural y mostrar sus dudas e intuiciones, a la vez que evidencia los límites de sus teorías y del conocimiento de su tiempo.

Uno de los mayores aciertos de la obra es su capacidad para conectar las ideas de estos pioneros con preguntas fundamentales que aún hoy resuenan en los laboratorios y aulas de física. La frase de Grimaldi “*Saltem aliquando etiam undulatum*” (“A veces incluso también ondula”), no es solo una curiosidad histórica, sino el punto de partida de una reflexión que atraviesa los siglos: ¿qué significa que la luz “ondula”? ¿Cómo reconciliar este comportamiento con su aparente propagación rectilínea? Los autores abordan estas cuestiones con un lenguaje claro, pero sin sacrificar el rigor conceptual, lo que convierte al libro en una herramienta valiosa tanto para estudiantes como para investigadores experimentados.

La segunda parte, “Más allá del siglo Dorado”, explora desarrollos más recientes, como la teoría de coherencia óptica de Emil Wolf, que responde a una pregunta tan simple como profunda: ¿por qué la luz no siempre interfiere? Wolf, una figura clave pero a menudo opacada en los relatos convencionales, recibe aquí el reconocimiento que merece por su contribución a la comprensión de la interferencia y la difracción.

Pero quizás lo más provocador del libro, y aquí se nota la mano del profesor Román Castañeda y su grupo, aparece en la sección final, ‘Una revelación inesperada’: una reinterpretación de la interferencia no como propiedad intrínseca de la luz, sino como manifestación de “estados geoméricamente excitados del espacio ordinario”. Esta idea audaz, respaldada por un andamiaje matemático cuidadoso, abre nuevas vías para comprender la interferencia y la difracción tanto de ondas como de partículas. En concordancia con la teoría de la coherencia óptica, se discute el trasfondo epistemológico: incorporar nociones no locales para dar cuenta de fenómenos que desafían la intuición clásica. En este sentido, el libro no solo mira al pasado, sino que también apunta hacia el futuro, invitando al lector a repensar conceptos que damos por sentados. No obstante, conviene advertir que este capítulo final exige bases matemáticas y físicas avanzadas, por lo que su lectura resulta más provechosa en niveles de posgrado o en cursos especializados.

Valoro especialmente la manera en que los autores equilibran el relato histórico con la discusión conceptual. Cada capítulo está acompañado de ilustraciones, diagramas y referencias bibliográficas que enriquecen la lectura y facilitan la comprensión de los experimentos y teorías descritos. Además, los apéndices constituyen un soporte invaluable para quienes deseen profundizar en los fundamentos del principio de Huygens-Fresnel, las ondas electromagnéticas, la teoría de coherencia espacial y la interferencia con fotones individuales. En este sentido, el libro resulta especialmente útil como material de apoyo en cursos de ondas y de óptica, tanto en pregrado como en posgrado.

En resumen, *Hitos del pensamiento ondulatorio de la luz* es una obra que combina erudición, divulgación, claridad expositiva y una mirada fresca sobre uno de los temas más fascinantes de la física. Al recorrer los hitos de la concepción ondulatoria, el texto se convierte también en una reflexión sobre la manera en que pensamos la luz y, en el fondo, sobre cómo la ciencia misma se transforma en una forma de cultura. Nos recuerda que el conocimiento científico no progresa solo con datos y ecuaciones, sino también con preguntas, intuiciones y la capacidad de mirar lo familiar con ojos nuevos. Su lectura, coherente con el pensamiento de Galileo, exige una mente abierta y un espíritu curioso, y ofrece a docentes, investigadores y estudiantes información rigurosa e inspiración para comprender la física como una aventura intelectual y estética.

Léanlo, tengan o no formación formal, encontrarán un recorrido claro y profundo sobre el pensamiento ondulatorio de la luz, que recuerda que la ciencia, además de rigurosa, sigue siendo una fuente inagotable de asombro.

### **Sobre el autor de la reseña**

John Fredy Barrera Ramírez es profesor titular del Instituto de Física de la Universidad de Antioquia y coordinador del Grupo de Óptica y Fotónica. Ha recibido varios premios y reconocimientos, nacionales e internacionales, por su trabajo en óptica y fotónica. Es miembro senior de OPTICA (antes The Optical Society – OSA) y de la SPIE (International Society for Optics and Photonics), así como miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

## Comentario bibliográfico



**Lasso, C. A., Ríos-Pulgarín, M. I., Roldán-Pérez G. (Eds.).** (2025). *Macroinvertebrados acuáticos de Colombia: Parte I. Porifera, Mollusca, Malacostraca, Coleoptera, Trichoptera, Megaloptera, Hemiptera y Lepidoptera.* Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 488 p. <https://accefyn.org.co/wp-content/uploads/2025/10/Macroinvertebrados-acuaticos-web.pdf>

El volumen *Macroinvertebrados acuáticos de Colombia: Parte I* constituye un aporte valioso al conocimiento de la biodiversidad dulceacuícola del país. Esta obra, elaborada por más de treinta investigadores de universidades e instituciones nacionales e internacionales, presenta una síntesis actualizada sobre ocho grupos taxonómicos fundamentales para la ecología acuática y la bioindicación: Porifera, Mollusca, Malacostraca, Coleoptera, Trichoptera, Megaloptera, Hemiptera y Lepidoptera.

Desde su presentación, el libro destaca la relevancia ecológica de los macroinvertebrados como eslabones esenciales de las redes tróficas y como indicadores de la calidad del agua, enfatizando su utilidad en procesos de monitoreo, conservación y manejo ambiental. La obra combina enfoques taxonómicos, ecológicos y funcionales e integra herramientas metodológicas para la recolección y el estudio de los organismos, además de claves ilustradas para la identificación de los macroinvertebrados acuáticos de Colombia, información de distribución y datos biológicos (Lasso *et al.*, 2025). En este sentido, la obra se posiciona junto a referentes como *Macroinvertebrados Bentónicos Sudamericanos: Sistemática y Biología* de Domínguez y Fernández (2009) y el volumen 3 de *Thorp & Covich's Freshwater Invertebrates* (Thorp & Rogers, 2019), al ofrecer una síntesis actualizada y rigurosa que fortalece el estudio de los macroinvertebrados acuáticos desde una perspectiva centrada en Colombia.

En la Introducción del libro se expone la riqueza hídrica y biológica de Colombia y, a la vez, se describen las presiones ambientales que afectan los ecosistemas acuáticos del país, como la deforestación, la pérdida y degradación de humedales, la erosión, la sedimentación y la contaminación. En este contexto, se destaca el papel de los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad ecológica de los sistemas dulceacuícolas, gracias a su diversidad, sus ciclos de vida y su sensibilidad, ya incorporada en diferentes índices bióticos. A partir de esta base, en el Capítulo 1 se desarrolla el enfoque de la ecología funcional aplicada a los macroinvertebrados, mostrando cómo sus rasgos funcionales permiten comprender su papel en los procesos ecológicos y en los flujos de energía, al tiempo que enriquecen la bioindicación tradicional y se consolidan como una herramienta eficaz para evaluar impactos y apoyar los procesos de restauración de los ecosistemas. Además, se introducen en este capítulo principios y técnicas fundamentales para el tratamiento y análisis de los datos funcionales. En el Capítulo 2 se presentan de manera sistemática los métodos más empleados para la recolección, la preservación y el estudio de los macroinvertebrados acuáticos en la limnología, describiendo procedimientos cualitativos y cuantitativos, así como recomendaciones para el manejo adecuado de las muestras en el laboratorio. En conjunto, estos capítulos establecen los fundamentos conceptuales y metodológicos que sustentan el uso de macroinvertebrados en la investigación y el monitoreo ecológico en Colombia.

Asimismo, en los capítulos taxonómicos se profundiza en los aspectos morfológicos, biogeográficos y ecológicos de cada grupo tratado, reuniendo una compilación de información de alto valor para el estudio de la macrofauna acuática del país. Se destaca especialmente la utilidad y la claridad de las claves taxonómicas, diseñadas para facilitar la identificación de los organismos incluso a usuarios no especialistas, en concordancia con la intención de los editores de producir una herramienta práctica para especialistas y actores del monitoreo ambiental. Esta accesibilidad técnica resulta particularmente valiosa tanto para estudiantes e investigadores, como para las entidades encargadas de la gestión del recurso hídrico, incluidas las corporaciones ambientales.

Cabe mencionar que el libro especifica que este primer volumen cubre una parte significativa de los macroinvertebrados dulceacuícolas del país y que un segundo tomo completará el proyecto con órdenes como Odonata, Ephemeroptera, Plecoptera y Diptera, entre otros. Esta planificación en dos tomos, explicitada desde la Presentación, posiciona el proyecto como uno de los esfuerzos más completos y actualizados para documentar la fauna de macroinvertebrados acuáticos del país. Además de consolidar décadas de investigación dispersa, el volumen ofrece un marco técnico robusto que fortalece tanto el estudio de la biodiversidad como los procesos de monitoreo ecológico y bioindicación a escala nacional.

El conocimiento actualizado sobre los macroinvertebrados acuáticos en Colombia, sintetizado en esta obra, constituye un aporte fundamental para la formación de nuevos taxónomos y ecólogos interesados en fortalecer el inventario y la conservación de la biodiversidad del país. Asimismo, este libro ofrece herramientas científicas sólidas que respaldan el cumplimiento de directrices nacionales que recomiendan el uso de los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua. Cabe destacar que el **Departamento Nacional de Planeación - DNP (2023)**, en el “Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026, Colombia, Potencia Mundial de la Vida”, establece el agua como eje estructurante del desarrollo y propone, entre sus objetivos centrales, el “ordenamiento del territorio alrededor del agua y la justicia ambiental”. En este marco, se incluyen iniciativas orientadas a la restauración ecológica, la implementación de acciones para la descontaminación de cuerpos de agua y la recuperación de rondas hídricas en ecosistemas estratégicos, esfuerzos para los cuales esta obra se convierte en un insumo técnico indispensable.

En síntesis, *Macroinvertebrados acuáticos de Colombia: Parte I* es una obra científica de gran utilidad práctica, que se convierte desde ya en un referente imprescindible para quienes estudian la biodiversidad, ecología y conservación de los ecosistemas acuáticos de Colombia.

#### **Lucimar Gomes Dias**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Grupo de Investigación Bionat: Biodiversidad y Recursos Naturales

Universidad de Caldas

### **Referencias**

- Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2023).** Plan Nacional de Desarrollo. 2022–2026: Colombia Potencia Mundial de la Vida (Ley 2294 de 2023). <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>
- Domínguez, E. & Fernández, H. R. (Eds.). (2009).** Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: sistemática y biología. Tucumán: Fundación Miguel Lillo.
- Lasso, C. A., Ríos-Pulgarín, M. I., Roldán-Pérez G. (Eds.). (2025).** Macroinvertebrados acuáticos de Colombia: Parte I. Porifera, Mollusca, Malacostraca, Coleoptera, Trichoptera, Megaloptera, Hemiptera y Lepidoptera. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Thorp, J. H. & Rogers, D. C. (Eds.). (2019).** *Thorp & Covich's Freshwater Invertebrates, 4th ed., Vol. 3: Keys to Neotropical Hexapoda*. Academic Press. ISBN 9780128042236.

Club de revistas/Journal Club

Reseña sobre el artículo

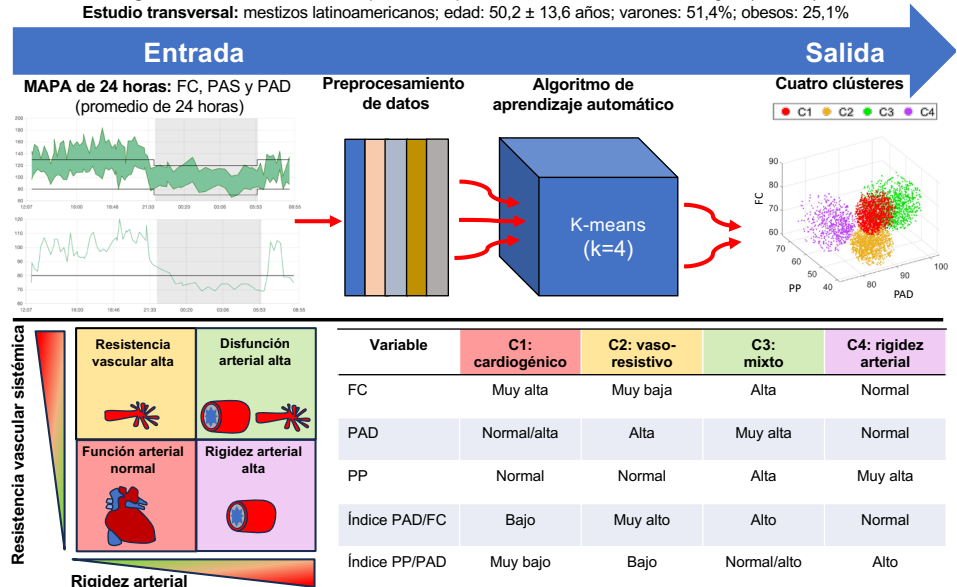
Dagnovar Aristizábal-Ocampo, Diego Álvarez-Montoya, Camilo Madrid-Muñoz, Ricardo Fernández-Ruiz, Jaime Gallo-Villegas. (2025). Circulatory phenotypes in hypertension identified by 24-h ambulatory blood pressure monitoring. *Journal of Hypertension*, September 15, 2025. <https://doi.org/10.1097/HJH.0000000000004149>

## Fenotipos circulatorios en hipertensión identificados mediante monitoreo ambulatorio de la presión arterial de 24 horas

### Circulatory phenotypes in hypertension identified by 24-hour ambulatory blood pressure monitoring

#### Resumen gráfico: Fenotipos circulatorios en hipertensión identificados mediante monitoreo ambulatorio de la presión arterial de 24 horas

Registros de MAPA de 24 horas: pacientes hipertensos sin tratamiento farmacológico (n=9.195)  
 Estudio transversal: mestizos latinoamericanos; edad: 50,2 ± 13,6 años; varones: 51,4%; obesos: 25,1%



Índice PAD/FC: medida indirecta de la resistencia vascular sistémica. Índice PP/PAD: medida indirecta de la rigidez arterial. MAPA: monitoreo ambulatorio de la presión arterial; FC: frecuencia cardiaca; PAS: presión arterial sistólica; PP: presión del pulso; PAD: presión arterial diastólica; C1, clúster 1 (rojo); C2, clúster 2 (naranja); C3, clúster 3 (verde); C4, clúster 4 (morado).

Desde que se describió la hipertensión arterial se había establecido que el 90 % de los casos son de origen idiopático. La presión arterial es el producto de la interacción entre el volumen de eyección del ventrículo izquierdo y el estado del sistema arterial. Sin embargo, la hipertensión es el resultado de diferentes mecanismos hemodinámicos. El progreso de la condición no es uniforme, lo que dificulta la diferenciación de las condiciones circulatorias con base exclusivamente en el valor numérico y en la clínica. La resistencia vascular sistémica (RVS), la elasticidad de grandes vasos ( $C_1$ ) y el gasto cardiaco (CO) son los determinantes primarios de la presión arterial.

El monitoreo ambulatorio de la presión arterial (MAPA) y el uso de modelos matemáticos permiten inferir una serie de medidas de la circulación arterial, como son el volumen sistólico (SV), el gasto cardiaco (CO), la elasticidad arterial ( $C_1$ ) y la resistencia vascular sistémica, que se obtiene de la relación entre la presión arterial media (PAM) y el gasto cardiaco (CO). La presión de pulso (PP) representa una medida indirecta de la rigidez arterial.

El estudio que se reseña, de tipo observacional, transversal, y basado en periodos de MAPA de 24 horas, se realizó en Medellín entre el 2017 y el 2022 (cinco años). De 29.743 MAPA se excluyó el 56,7 % por haberse hecho en menores de 18 años, en mujeres en embarazo y en pacientes en tratamiento antihipertensivo. De los 12.876 MAPA seleccionados, el 71,4 % (9.195) registró hipertensión arterial, y el 28,6 % (3.681) correspondió a personas con presión arterial normal.

Los valores obtenidos en los MAPA de PAD, PP y frecuencia cardíaca (FC) se utilizaron para alimentar un algoritmo de aprendizaje automático (K-Means), que identificó los siguientes cuatro fenotipos circulatorios en la población de estudio: C1-cardiogénico (33,7 %), caracterizado por un aumento en el gasto cardíaco (CO) y la FC; C2-vaso-resistivo (29,7 %), que implica un aumento en la resistencia vascular sistémica (RVS); C3-mixto (23,6 %), correspondiente a una combinación de características cardiogénicas y de vaso-resistencia, y C4-rigidez arterial (13 %), caracterizado por una disminución en la elasticidad arterial ( $C_p$ ). Para validar los resultados hemodinámicos inferidos a partir de los MAPA, se les hizo ecocardiografía a 447 individuos, lo que reveló una buena correlación.

Con base en los fenotipos delineados, se plantea que la progresión hemodinámica de la hipertensión comienza con un aumento en el gasto cardíaco (CO) (cardiogénico), que progresa a un incremento de la resistencia vascular sistémica (RVS) (vasoconstricción) y, posteriormente, a una disminución en la elasticidad arterial ( $C_p$ ) (rigidez arterial). Estos fenotipos permiten predecir el riesgo cardiovascular de cada individuo y guiar el tratamiento en forma personalizada, adaptándolo al perfil circulatorio de cada paciente.

La clasificación de la hipertensión arterial basada en estos cuatro fenotipos circulatorios representa un avance significativo en la práctica clínica. Actualmente la hipertensión arterial se diagnostica principalmente con base en el umbral numérico de >130/80 mmHg. Los pacientes que exceden este umbral se clasifican como hipertensos y reciben el mismo tratamiento, independientemente de su perfil hemodinámico. Este enfoque de umbral numérico a menudo conduce a un tratamiento empírico, lo que resulta en múltiples consultas antes de que la hipertensión esté controlada. Infortunadamente, este proceso puede causar frustración y desencadenar el abandono del tratamiento por parte de los pacientes, que, años después, pueden volver a consultar debido a eventos catastróficos relacionados con la hipertensión no controlada.

La progresión fisiopatológica de la hipertensión arterial basada en el MAPA y la FC comienza con una frecuencia cardíaca alta y función arterial normal (C1: cardiogénico), la cual pasa a una respuesta vasoconstrictiva (C2: vaso-resistivo) y termina en un fenotipo de rigidez arterial (C4: rigidez arterial). Esta progresión conduce a un aumento de la resistencia vascular sistémica y a la pérdida de la elasticidad arterial.

Estos tres fenotipos se derivan exclusivamente de la función arterial. El otro fenotipo (C3: mixto) corresponde a los elementos que aportan los mecanismos no arteriales (control de volumen, regulación autonómica del sistema nervioso central o respuestas endocrinas).

La combinación de la hipertensión arterial y un alto compromiso arterial ha demostrado ser un fuerte predictor de mortalidad. Una de las principales ventajas de la clasificación propuesta es que orienta la farmacoterapia para cada fenotipo así: C1- cardiogénico: tratamiento con betabloqueador predominantemente; C2-vasoresistivo: tratamiento con inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina, o bloqueadores del receptor de angiotensinógeno II, o bloqueadores del canal de calcio (dihidropiridínicos); C4-rigidez arterial: tratamiento con bloqueadores del canal de calcio (dihidropiridínicos), o inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina, o bloqueadores del receptor de angiotensina II, o diuréticos del tipo de la tiazida; y C3-mixto: tratamiento con una mezcla de dos medicamentos seleccionados con base en el fenotipo observado en el MAPA.

En conclusión, el MAPA de 24 horas es el estándar de oro para diagnosticar la hipertensión arterial, pues ayuda a evitar falsos positivos causados por el estrés de la consulta médica (*white-coat hypertension*) y detecta la hipertensión oculta. Esta sencilla

técnica de clasificación de fenotipos circulatorios permite la clasificación del estadio de la hipertensión arterial que, una vez se use ampliamente en la práctica clínica, ayudará a evaluar el riesgo cardiovascular de cada individuo y a implementar un tratamiento basado en el mecanismo fisiológico del fenotipo circulatorio detectado en el MAPA.

El artículo reseñado resume 30 años de investigación clínica sobre los mecanismos de la hipertensión arterial a cargo del Dr. Dagnovar Aristizábal y su grupo. En él se demuestra cómo la simplificación de conceptos complejos mediante el uso de la inteligencia artificial (K-Means) permite agrupar los datos en fenotipos circulatorios de significación clínica, lo que a su vez posibilita implementar la medicina de precisión para respaldar el diagnóstico y el tratamiento de la hipertensión arterial.

El uso de este método sencillo puede salvar muchas vidas al tratar la hipertensión arterial de manera efectiva, eliminando la necesidad de múltiples visitas médicas y otros procedimientos diagnósticos, y proporcionando un tratamiento preciso que antes se hacía por ensayo y error.

En resumen, este excelente trabajo muestra el potencial de la medicina del futuro, en cuyo marco la inteligencia artificial servirá como una herramienta indispensable para mejores diagnósticos y tratamientos.

**Juan Guillermo McEwen O., MD, PhD**

Profesor Titular, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia

Investigador, Corporación para Investigaciones Biológicas, Medellín, Colombia

## Vida de la Academia

# MEDALLA HUMBOLDT-CALDAS 2025

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

## ACTA DEL JURADO

De acuerdo con la designación de la Presidencia de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, los miembros del Jurado firmantes evaluaron en tres rondas los trabajos sometidos a la **Medalla Humboldt-Caldas**, convocatoria 2025, en el curso de los meses de agosto y septiembre del presente año. Estos trabajos consistían en artículos publicados en revistas indexadas de alto nivel, y fueron concluidos por un total de 55 científicos, representando 47 instituciones académicas —en algunos casos en más de un artículo— en un total de 26 ciudades y 12 países, con colectas biológicas en múltiples regiones americanas o con base en repositorios de datos transnacionales.

Teniendo en cuenta los requisitos previstos en la convocatoria, los jurados definieron nueve (9) criterios principales a atender desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo, además de considerar la pertinencia *humboldtiana* y *caldasiana* de estos artículos, así:

1. Carácter biogeográfico del trabajo
2. Cobertura geográfica
3. Interdisciplinariedad
4. Novedad e innovación
5. Impacto ambiental
6. Impacto social
7. Soporte experimental
8. Complejidad analítica
9. Factor de impacto de la publicación

El resultado cuantitativo de esta evaluación se registró en una tabla con los puntajes reportados para cada artículo por cada uno de los miembros del jurado. Acto seguido, cada uno de los jurados elaboró en detalle su apreciación para escoger los finalistas.

Los argumentos individuales fueron consolidados por consenso en función de las características específicas de cada artículo, así como de su impacto contemporáneo en el dominio de la biogeografía. Tres trabajos fueron seleccionados para su revisión detenida final, y esta llevó al jurado a determinar, por unanimidad, el trabajo que se designó como ganador en función de su planteamiento, su desarrollo y sus hallazgos.

En consecuencia, el jurado declara ganador de la **Medalla Humboldt-Caldas 2025** al artículo “The Andes as a semi-permeable geographical barrier: Genetic connectivity between structured populations in a widespread spider” [Los Andes como barrera geográfica semipermeable: conectividad genética entre poblaciones estructuradas de una araña de amplia distribución], publicado en 2024 en la revista *Molecular Ecology* —editada en los Estados Unidos—. El trabajo está firmado por *Fabian Salgado-Roa*, *Carolina Pardo-Díaz*, *Nicol Rueda-Muñoz*, *Diego Cisneros-Heredia*, *Eloisa Lasso* y *Camilo Salazar*, investigadores vinculados en su mayoría al departamento de Biología, en la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad del Rosario en Bogotá, con colaboraciones en la Escuela de Biociencias de la Universidad de Melbourne (Australia), el Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales del Instituto de Biodiversidad Tropical en la Universidad San

Francisco de Quito (Ecuador), el departamento de Ciencias Biológicas de la Universidad de los Andes en Bogotá, y el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales y la Estación Científica Coiba en Panamá.

El estudio presentado revela aspectos novedosos sobre los patrones biogeográficos de distribución de especies animales con base en las herramientas de la genética evolutiva, ciencia que permite indagar sobre los procesos moleculares que subyacen patrones a la vez biológicos y geográficos de los seres vivos. Gracias a los avances en genómica poblacional —que puede analizar simultáneamente un amplio número de marcadores moleculares a lo largo del genoma en diferentes poblaciones—, los autores ponen en evidencia una conectividad biológica a través de barreras aparentemente impenetrables para la biota terrestre.

Salgado-Roa y colaboradores estudiaron, en particular, la araña tejedora espinosa, conocida también como araña joya, araña soldado, araña panadera o araña vaquita (*Gasteracantha cancriformis*), la cual, gracias a su seda y a la forma de su cuerpo, logra planear y dispersarse por vía aérea más que otros arácnidos. Con este novedoso modelo de estudio determinaron que las zonas bajas de los Andes funcionaron para esta como una amplia avenida para la dispersión de sus poblaciones, mientras que las áreas de mayor altitud las mantuvieron solo *relativamente* aisladas. Los autores probaron diferentes modelos de historia poblacional, pero el mejor ajuste indicó que los grupos del Pacífico Seco y de los Andes Orientales se separaron hace unos 3,8 millones de años, demostrando para este género de arácnidos un contacto genético posterior. En síntesis, las poblaciones de la araña tejedora espinosa —o araña vaquita— nunca quedaron *totalmente* aisladas pues se revelaron intercambios genéticos en este taxon a través de los Andes.

El mayor aporte de este estudio es el de demostrar que, aunque la variación en la altitud constituye el principal factor en la diversificación de las especies dejando una huella en las diferencias fenotípicas entre las poblaciones, existe la posibilidad de vincular, desde el punto de vista genético, patrones biogeográficos aparentemente aislados en función de la altura sobre el nivel del mar.

Además de este reconocimiento, el jurado calificador propone otorgar dos **Menciones Honoríficas** para los artículos titulados: “Functional safeguards for conservation: Identifying climate change refugia for frugivorous and nectarivorous birds in a degraded area of Colombia”, publicado en 2025, y “Volcanoes, evolving landscapes, and biodiversity in Neotropical mountains”, publicado en 2024.

El primero de estos —en español: “Medidas de protección funcionales para la conservación: identificación de refugios contra el cambio climático para aves frugívoras y nectarívoras en una zona degradada de Colombia”— fue publicado en la revista *PLOS One* con las firmas de *Fausto Sáenz-Jiménez*, *María Alejandra Parrado-Vargas*, *José F. González-Maya* y *Juan Emiro Carvajal-Cogollo*, investigadores afiliados respectivamente a la Facultad de Ciencias, en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en Tunja, Boyacá, y al Proyecto de Conservación de Aguas y Tierras – ProCAT en Bogotá, con colaboraciones en el departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma Metropolitana, en Lerma de Villada —o Cacalomilhuacan— (México).

Esta investigación produjo un artículo robusto, con preguntas claras y diseño apropiado, presentando una interesante aproximación al uso de grupos funcionales y su relación con variabilidad climática, e interpretando modulaciones biogeográficas como consecuencia de la sinergia entre la transformación de hábitat y la biodiversidad. El artículo se basó en el análisis de 27 grupos y 77 especies de aves en el valle del Magdalena, y recomienda el uso de refugios climáticos *in situ* y *ex situ* para complementar las estrategias de conservación basadas en áreas protegidas, gracias a la utilización de bases de datos públicas, tanto para la configuración del grupo de especies a proteger como para definir sus rasgos funcionales, degradación humana de hábitats, cambio climático y escenarios socioeconómicos. Estas herramientas permitieron fundamentar a los autores una *biogeografía prospectiva* que proyectan al año 2080. Así, Sáenz-Jiménez y colaboradores proponen, con su trabajo,

una sencilla y admirable forma de encontrar refugios climáticos, en los que se predice que muchas especies de aves frugívoras y nectarívoras podrán establecerse cuando las temperaturas se tornen intolerables en el valle del río Magdalena.

Debe considerarse que, aunque los artículos que se fundamentan en bases de datos globales —con datos biofísicos con resolución gruesa— son altamente indicativos, estos corren el riesgo de resultar especulativos para poder incidir de forma directa sobre la toma de decisiones, puesto que las especies tienen capacidad de respuesta basada en su variabilidad genética, sus rasgos de vida y su plasticidad, caracteres más complejos y determinantes que los simples cambios en las variables climáticas que definen sus nichos. Este artículo tiene, sin embargo, y a pesar de estas eventuales limitaciones, una alta pertinencia para la gestión y conservación de áreas basada en el entendimiento de las respuestas funcionales de grupos de aves.

La segunda mención de honor se otorga al artículo “Volcanes, paisajes en evolución y biodiversidad en las montañas neotropicales”, publicado en 2024 en la revista *Frontiers of Biogeography* de la Sociedad Internacional de Biogeografía. Sus autores, *María José Sanín, Agustín Cardona, Laura Céspedes, Catalina González, Natalia Pardo y Carlos Daniel Cadena*, están vinculados, respectivamente, a la Facultad de Ciencias y Biotecnología de la Universidad CES y a la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia —ambas en Medellín— y al departamento de Biociencias y el departamento de Ciencias Biológicas de la Universidad de los Andes en Bogotá, con colaboraciones en la Escuela de Matemáticas y Ciencias Naturales de la Universidad de Arizona y el Comité de Biología Evolutiva de la Universidad de Chicago, en los Estados Unidos.

Estos investigadores lograron una aproximación muy significativa desde un punto de vista a la vez biológico y geográfico, estrechamente relacionada con los hallazgos publicados por Alexander von Humboldt y Francisco José de Caldas hace más de dos siglos. Los autores demuestran, con base en ejemplos de los reinos animal y vegetal, que el aislamiento biogeográfico puede verse modulado por la actividad volcánica y no solo por la altitud geográfica. En este sentido, el vulcanismo debe ser considerado como un importante complemento para estudiar la relación entre historia geológica y biodiversidad.

Sanín y colaboradores analizaron el posible papel de los volcanes —particularmente de los episodios de fuerte vulcanismo— sobre el aislamiento y la conectividad de las especies de los Andes desde una perspectiva muy original, que se apoya en resultados recientes en función de las discontinuidades de las palmas de cera (*Ceroxylon sp.*), así como en las zonas de contacto e hibridación entre poblaciones de un ave andina del género *Myioborus*: la idea claramente dará pie a estudios sucesivos, dirigidos a examinar esta brillante conjetura.

Es importante subrayar, para este caso, el que tanto Humboldt como Caldas hayan centrado sus síntesis biogeográficas en *iconografías* de dos volcanes emblemáticos ecuatorianos —el Chimborazo y el Imbabura— sin saber que, más de dos siglos después, seis investigadores colombianos, cuatro mujeres y dos hombres, proyectarían sus hallazgos a una nueva dimensión científica de alta pertinencia biológica y espaciotemporal de su modelo infográfico pionero de 1803.

---

Para concluir, debe considerarse que los tres trabajos de investigación premiados hoy proponen de manera a la vez implícita y explícita, como lo pretende la medalla Humboldt-Caldas de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y la Embajada de la República Federal de Alemania en Bogotá, un reconocimiento a labor investigativa y el legado de Humboldt y Caldas, resaltando el importante papel científico que jugaron estos dos naturalistas con su postulación *princeps* de la biogeografía tropical a comienzos del siglo XIX.

Los premios antecedentes de la Medalla Humboldt-Caldas —en 2019, 2021 y 2023— fueron también otorgados a trabajos directamente asociados a los principales determinantes de las investigaciones de estos dos naturalistas del siglo XVIII y XIX, y a su perfeccionamiento gracias a las nuevas herramientas de la ciencia contemporánea. En primer lugar, en 2019, a un *Sistema de Información Geográfica para registro y distribución de especies*. Luego, en 2021, a un *Análisis de la distribución de zonas de cultivos andinos, con base en la cartografía biogeográfica de Francisco José de Caldas*, y en 2023 a la *Descripción de la biogeografía de una subclase submarina*.

Estos trabajos previos se complementan bien con los trabajos reconocidos en este año de 2025, y el espectro conceptual de todos ellos deja ver que el año 2027 traerá nuevos hallazgos en la línea de investigación de la biogeografía que cumple hoy más de 2 siglos de análisis científicos interdisciplinarios en nuestras tierras, gracias a las ideas pioneras de un prusiano y de un payanés en beneficio de la comprensión de la naturaleza que nos rodea.

Bogotá, septiembre 12 de 2025

## PREMIO ANGELA RESTREPO MORENO 2025

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

### Capítulo de Antioquia

#### ACTA DEL JURADO

El 25 de septiembre de 2025 se reunieron los académicos Juan Guillermo McEwen, Román Castañeda y Luis Fernando García, jurados del Premio Angela Restrepo Moreno 2025, otorgado por el Capítulo de Antioquia de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales a las mejores maestras de ciencias naturales de las instituciones oficiales de los municipios del Departamento de Antioquia, con excepción de los municipios del Valle de Aburrá, con el propósito de definir las maestras merecedoras al Premio Angela Restrepo Moreno y la Mención de Honor. A la presente convocatoria se presentaron 15 candidatas, siendo necesario excluir 2 por laborar en el municipio de Envigado. La siguiente Tabla muestra los nombres postulados, las instituciones educativas donde laboran, los municipios donde desarrollan sus actividades docentes y la instituciones o personas que las postularon.

Nombre	Institución donde labora	Municipio	Postulante
Mercedes del Tránsito Arrubla Carmona	I.E de Desarrollo Rural Miguel Valencia	Jardín	Juanita Lotero Rendón, Secretaria Educación de Jardín
Mónica Alejandra Castaño	I.E. Dolores e Ismael Restrepo	La Ceja	Profesora Mónica Alejandra Castaño
María Trinidad García Alzate	I.E. Josefina Muñoz González	Rionegro	Rectora María Victoria Estrada
María Elena Ortiz Ladino	I.E Técnico Industrial Santiago de Arma	Rionegro	Rector Alexander Medina
Luz Elena Uribe Carmona	I.E Mariano J. Villegas. Sede Rural Zarcitos	Montebello	CTA Ondas
Mayra Alejandra Gómez Argüello	I.E. Luis Eduardo Diaz	Yondó	CTA Ondas
María Cristina Marín Valdés	I.E. Eduardo Fernández Botero	Amalfi	CTA Ondas
Alexandra Martínez Plazas	I.E de Jesús Sede Lázaro Restrepo González	Concordia	CTA Ondas
Maryory Toro Cardona	I.E Rosa María Henao Pavas	Sonsón	CTA Ondas
Elsa Yadira Bedoya Ibarra	I.E. Rafael Uribe Uribe	Valparaíso	CTA Ondas
Claudia María Correa Osorno	I.E. Pueblo Nuevo	Amalfi	CTA Ondas
Rosmary Ángela Gómez García	I.E. El Bagre	El Bagre	CTA Ondas
Karen Viviana Pérez Luján	I.E Luis Andrade Valderrama	Giraldo	Rector Tobías Arboleda

## Procedimiento de selección

En la primera etapa de la evaluación, las candidatas se distribuyeron en tres grupos de cinco nombres cada uno, y se asignó un grupo a cada jurado. Los jurados seleccionaron las dos que consideraron mejores de su grupo, de acuerdo con una tabla de puntajes previamente definida, que valoraba su formación académica, los proyectos adelantados en sus instituciones educativas, el impacto en la formación científica de sus estudiantes y en las condiciones de vida de los municipios en que laboran, entre otros factores demostrativos del compromiso y calidad de las docentes.

En la segunda etapa, la información completa de las dos candidatas seleccionadas por cada uno de los jurados fue compartida entre los demás jurados, que también las evaluaron con los mismos criterios.

La tercera y última etapa se realizó en la reunión del 25 de septiembre, en la que se decidió por unanimidad otorgar la Mención de Honor a la profesora María Cristina Marín Valdés de la Institución Educativa Eduardo Fernández Botero del municipio de Amalfi y el Premio Angela Restrepo Moreno 2025 a la profesora Mercedes del Tránsito Arrubla Carmona de la Institución Educativa de Desarrollo Rural Miguel Valencia de la vereda Verdún del municipio de Jardín.

## La mención de honor

La profesora María Cristina Marín Valdés se graduó como Tecnóloga en Costos y Auditoría en el Politécnico Jaime Isaza Cadavid en 1997, Licenciada en Matemáticas en la Universidad Católica de Oriente en 2004, Especialista en Administración de la Informática Educativa de la Universidad de Santander en 2013, Especialista en Gerencia Informática en la Corporación Universitaria Remington en 2014, Especialista en Pedagogía y Docencia en la Fundación Universitaria del Área Andina en 2017 y Especialista en Evaluación Pedagógica de la Universidad Católica de Manizales en 2018. Desde 1999, la profesora Marín ha trabajado en la Institución Educativa Eduardo Fernández Botero en Amalfi. Su actividad docente ha estado centrada en las matemáticas y la geometría a través de Proyectos de Aula como Degustando las matemáticas, Recreando la geometría, Olimpiadas de matemáticas, Semilleros de matemáticas, Competencia de matemáticas Genialmat, e inclusive creando el grupo de investigación *El Círculo de Pi*, conformado sólo por mujeres, para enfocarse en el estudio de problemáticas de equidad de género relacionadas con las matemáticas. La profesora María Cristina ha elaborado un gran número de documentos y ayudas didácticas, disponibles en material audiovisual en su blog, que permiten a los estudiantes aproximarse y entender las matemáticas y la geometría en forma fácil y amena.

La profesora Marín ha recibido múltiples reconocimientos por su labor docente, entre estos:

- Premio Gobernación de Antioquia 2023 - Maestros y maestras para la vida.
- Premio Gobernación de Antioquia 2018 - Evolucionaria.
- Premios Gobernación de Antioquia 2016 - Evolucionaria.
- Premio Gobernación de Antioquia 2014 - Antioquia la más educada.
- Diploma de honor en liderazgo educativo Municipio de Amalfi Concejo Municipal 2023.
- Mujeres con voz propia categoría educación Municipio de Amalfi 2023.
- Reconocimiento al compromiso y desempeño docente I.E. Eduardo Fernández Botero - 2018.
- Reconocimiento al compromiso y desempeño docente I.E. Eduardo Fernández Botero - 2016.
- Reconocimiento especial por liderazgo I.E. Eduardo Fernández Botero - 2023
- Mención de honor Fundación Compartir 2014.

**PREMIO ANGELA RESTREPO MORENO 2025** del Capítulo de Antioquia de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

La profesora Mercedes del Tránsito Arrubla Carmona nació en Segovia (Antioquia), se graduó en la Universidad de Antioquia en 1983 como Licenciada en Educación Matemática-Física y en Universidad Cooperativa de Colombia en 1996 como Especialista en Dificultades del Aprendizaje Escolar. Desde 1985 es Profesora en la Institución Educativa de Desarrollo Rural Miguel Valencia en la vereda Verdún del municipio de Jardín. Además, la profesora Arrubla fue docente de tiempo completo en el IDEM de Betania entre 1983 – 1985, docente de cátedra en la Universidad de Antioquia, asesora en la capacitación de maestros en la Universidad Nacional Sede Medellín, asesora académica de la Fundación Universitaria del Suroeste, del Centro de Pedagogía Participativa, en los convenios MEN, Comfama, Cafam, Universidad Luis Amigó y en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

La profesora Arrubla ha dirigido los proyectos:

1. OTACA (Observadores del tiempo atmosférico CERES-ANTARES') con estaciones de observación manual y Electrónica. Este programa está adscrito al programa CERES SCHOOL de la NASA. Una anécdota que muestra el compromiso y la creatividad de la profesora Arrubla ocurrió en 2010 cuando algunos de sus estudiantes le manifestaron “profe, nosotros siempre observando y estudiando el cielo y no hemos estudiado el suelo, nosotros somos campesinos y además la modalidad del colegio es agropecuaria”. La profesora, al escuchar esta inquietud y propuesta, se dio a la tarea de crear una nueva línea del proyecto: La observación del suelo, por medio de la creación de un laboratorio para este fin y la línea BIOTACA con el apoyo del IGAC, la Cooperativa de Caficultores de Andes y el SENA.
2. AULA TALLER EXPERIMENTAL DE MATEMÁTICAS que involucra estudiantes en la observación meteorológica, análisis estadístico y vinculación con universidades nacionales e internacionales. El proyecto ha sido socializado en ferias nacionales e internacionales (TEDx Bogotá 2012, Virtual Educa 2013, Héroes Fest 2014, Diseña el Cambio 2016 - Madrid, España) entre otros múltiples encuentros, congresos y conferencias.

La profesora Mercedes tiene una extensa producción bibliográfica como autora y coautora artículos y capítulos sobre enseñanza de matemáticas, didáctica, y divulgación del proyecto OTACA; entre ellos:

- Interpretación e implementación de los estándares básicos de matemáticas (2005)
- Maestros contadores de historias: Del tabú de las matemáticas a una estación meteorológica de la NASA (2008)
- Geometría Interactiva (2009)
- Lecciones de Matemáticas N° 4: “La Triada Operativa. (2010)
- Función lineal, cuadrática y volúmenes: guía para docentes (2012).
- De la Matematefobia a la Matematefilia. (2012).

Las actividades descritas, además de muchas otras que por brevedad no se incluyen en esta Acta, le han merecido a la profesora Mercedes un gran número de premios y reconocimientos, entre ellos:

- Medalla al Mérito Miguel Valencia Marín — Consejo Directivo IE Miguel Valencia (2000)
- Mención de Honor por Experiencia Pedagógica Ejemplar — Fundación Compartir (2001)
- Medalla Cívica Presbítero Miguel Giraldo Salazar — Gobernación de Antioquia (2002)
- Premio Compartir al Maestro — Fundación Compartir (2003)

- La Rosa Categoría Oro — Municipio de Jardín (2010)
- Maestro protagonista de la transformación — Secretaría de educación departamental (2012)
- Medalla al Mérito Jardineño — Alcaldía de Jardín (2013)
- Antioqueña de Oro — Gobernación de Antioquia (2016)
- Premio Diseña el Cambio — Fundación Terpel (2017 -Representación en Madrid, España)
- Distinción vida — Corantioquia (2017)
- Una nueva especie de avispa nombrada en honor: *Ephisoma merceae* sp- Comunidad científica (2024)

## El grupo de postuladas

El jurado destaca la calidad de las 11 candidatas no galardonadas, cuyos *curricula vitae* fueron evaluados. Todas ellas demuestran una sólida y amplia formación pedagógica, una notable capacidad de innovar en sus labores docentes, un compromiso inagotable por motivar a sus estudiantes por diferentes áreas de la ciencia, así como por el desarrollo y bienestar humano y la sostenibilidad ambiental de los municipios y regiones de Antioquia donde laboran. Estas cualidades constituyen un mensaje muy positivo sobre el futuro de los jóvenes de estos municipios, frecuentemente opacados por otros fenómenos sociales y políticos que muestran un presente y un futuro negativos para ellos.

El jurado también agradece a las instituciones y personas que postularon o promovieron las postulaciones de las docentes participantes, particularmente al Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA) y su programa Ondas, que acompañó y respaldó la postulación de 8 de las 13 maestras candidatas.

Finalmente, el jurado hace un reconocimiento al doctor Rafael Aubad López por sus gestiones ante la Fundación Fraternidad Medellín y, por supuesto, a la Fundación misma por patrocinar generosamente el Premio Angela Restrepo Moreno 2025. No es posible terminar esta Acta sin recordar que en su testamento la doctora Angela Restrepo legó parte de su patrimonio a la Fundación Fraternidad Medellín, por lo que puede decirse que, después de su partida, nuestra gran científica, fundadora del Capítulo de Antioquia de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, y enamorada de la educación científica de la juventud, contribuye simbólicamente al reconocimiento de las maestras hoy galardonadas.

Medellín, septiembre 25, 2025

**Juan Guillermo McEwen**  
Miembro Correspondiente

**Román Castañeda**  
Miembro de Número

**Luis Fernando García**  
Miembro Honorario

## Agradecimientos - Acknowledgements

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Volumen 49, números 190, 191, 192, 193.

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 2025, en la valoración crítica de los artículos presentados a la revista, por su valiosa contribución, esfuerzo y tiempo dedicado.

Aitor Anduaga	Edilberto Suárez	Juan Carlos Muñoz
Alberto Gómez Gutiérrez	Eduardo Gorrón	Juan Darío Restrepo Ángel
Alexander Correa	Eduardo Pino	Juan Manuel Carvajalino
Álvaro Idárraga-Piedrahíta	Eduinó Carbonó de la Oz	Fernández
Andrés Cárdenas	Edwin Orlando López Delgado	Juan Manuel Díaz Merlano
Andrés Merchán	Evelio Andrés Gómez	Juliana Gaviria-Hernández
Andrés Pardo	Fabio Leonardo Meza-Joya	Leonardo Gónima
Ángela Zapata	Fanor Casierra	Leslie Landrum
Ángelo Danilo Plata Castro	Francisco Javier Duque-Aldaz	Luis Alberto Alanis-Hernández
Arnold Oostra	Francisco Torres	Luis Fernando Echeverri
August Sisa	Freddy Fernando Arcos Ramos	Luz Amparo Triana
Barry Hammel	Gabriel R. Navas	Lynn G. Clark
Beatriz E Jaramillo-Colorado	Gerardo Tibaná	María del Rosario Castañeda
Beatriz Elena Padilla	Gerhard Fischer	María Eugenia Morales
Benjamín Calvo	Germán Antonio Pérez Alcázar	María José Martínez Cordón
Bernardo Uribe Jongbloed	Germán Jiménez	María Sánchez de Stapf
Brock Mashburn	German Patarroyo	Mario Armando Higuera Garzón
Carlos Alberto Jaramillo Muñoz	Giovanni Pinzón Estrada	Marta Vives
Carlos Arturo Ávila	Gustavo Adolfo Vallejo	Martha Helena Rocha de Campos
Carlos Cardona	Gustavo Adolfo Zambrano Romero	Mauricio Vinasco Téllez
Carlos Fidel Granda Ramírez	Héctor Fabián Ramírez Ospina	Muhammed Zeynel
Carlos Pinilla	Héctor Ramírez Chávez	Nataly Castelblanco-Martínez
Carlos Ruiz-Guerra	Helber Enrique Balaguera	Nathali López Cardona
Carolina Melo	Henk van der Werff	Olga Matilde Restrepo Forero
César Neyit Galindo Martínez	Hernando Campos	Rafael González Hernández
Clara Helena Sánchez	Humberto Lanz Mendoza	Raúl Trejos
Claudia Patricia Ceballos Fonseca	Humberto Mendoza Cifuentes	Robert Paul Salazar
Cristian Goez Therán	Jairo Armando Cardona	Roberto Moreno
Dairon Alfonso Rodríguez Ramírez	Jairo Castaño Zapata	Rodrigo Andrés Sarria Villa
Daniel Santamaría-Aguilar	Jairo Lizarazo	Sandra Astrid Rodríguez Castro
David Alejandro Sánchez	Jereson Silva Valencia	Sandra P Galeano
David Arturo Perdomo	Jesús Orlando Rangel	Stefan Lotters
Diego Giraldo-Cañas	Jhon Charles Donato	Victor Julio Setina
Diego Lizcano	Jillian Pearse	Wilson Ricardo Alvaro Alba
Doriedson Ferreira	José Gregorio Portilla Barbosa	Wilson Rodríguez
Edgar Cristancho	Jovany Zabaleta	Yaneth Del Socorro Muñoz Saba
Edgar Guacaneme	Juan Carlos Mejía	Yasmín Plata Díaz

## Índice de autores - Index of Authors

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Volumen 49, números 190, 191, 192 y 193.

- Abdiel Jover Capote, 584  
Alberto Gómez Gutiérrez, 246  
Aldo H. Romero, 714  
Alejandra Morales-G, 321  
Alejandro Cante, 7  
Alejandro Guerrero-Caicedo, 227  
Alejandro Soto-Ospina, 703  
Alexis Jaramillo-J., 602  
Alfonso Parra-Coronado, 102  
Álvaro Pulzara-Mora, 532  
Amanda Mendes Pacheco, 90  
Ana Laura da Silva-Luz, 546  
Andrés Felipe Beltrán, 513  
Andrés Felipe García-Londoño, 216  
Andrés Villegas-Lanau, 703  
Ángel Donato-Rondón, 279  
Antoine M. Cleef, 236  
Antonio Muñoz, 30  
Arturo Acero P., Ph.D., 224  
Arturo Morales-Acevedo, 532  
Asiel Cabrera Guerrero, 584  
Belter E. Ordaz-Mendoza, 30  
Benjamin Oostra, 7  
Bernardo Uribe, 183  
Bryan Steven Reina-Mejia, 618  
Carlos A. Rivera-Rondón, 70  
Carlos Alberto Parra Osorio, 355, 677  
Carlos Andrés Franco Prieto, 146  
Carlos Arturo Parra-Vargas, 818  
Carolina Zamorano-Montañez, 59  
César Amaya, 16  
Christian Ortiz, 16  
Clara Brito Salomão, 90  
Clara Helena Sánchez Botero, 911  
Claudia Liliana Sánchez-Sáenz, 818  
Cristian Camilo Ramírez-Fosca, 818  
Daniel Alfonso-Santiesteban, 163  
Daniel Llamasa-Pérez, 818  
Delmar Arbey Olivera-Cayotopa, 748  
Dennis del Castillo-Torres, 748  
Diego Alejandro Zapata-Correa, 346  
Diego F. Gómez, 728  
Diego Giraldo-Cañas, 378, 772  
E. Hanz Rodríguez-Cabrera, 748  
Eliane Tie Oba Yoshioka, 90  
Enrique Torres Moya, 146  
Esteban Cortés-Rojas, 146  
Eva Méndez-Robayo, 227  
Ever Payares, 394  
Felipe Fajardo Villela Antolin-Barberena, 546  
Felipe Fantuzzi, 227  
Felipe García-Rodríguez, 70  
Felix Andi Eugenio-Quiroz, 748  
Fernanda Layza Souza de Souza, 90  
Fernando de la Hoz Restrepo, MD. PH.D., 675  
Fernando Zalamea, 872  
Freddy Moreno-Cárdenas, 428  
Gabriel Leonardo Mora-Najar, 818  
Gaspar Morcote-Rios, 378  
George Martín-Gutiérrez, 336  
Gerhard Fischer, 102, 362  
German D. Patarroyo, 728  
Germán Darío Álvarez Lucero, 914  
Gonzalo Medina, 411  
Gonzalo Taborda-Ocampo, 833  
Greys Bertel, 291  
Guillermo Albuja-Proaño, 629  
Gustavo A. Torres, 728  
Héctor Guerra-Arévalo, 748  
Heidy M. Quitián-Lara, 227  
Henry Hooghiemstra, 236  
Hernando Gómez-Franklin, 291  
Higinio Serrano, 183  
Humberto Luis Quintana-Manotas, 797  
Indry Milena Saavedra-Gaona, 818  
Ivon Dorado, 411  
J. Gregorio Portilla, 471  
J. Orlando Rangel-Ch., 602  
J.M. Ayerbe Toledano, 198, 645  
Jaime Escobar, 129  
Javier Alcázar, 501  
Javier Garzón-Venegas, 346  
Jean Villafane, 146  
Jesús Javier Hoyos-Acuña, 797  
Jhon Alexander Fiscal-Ladino, 833  
Jhon Donato-Rondón, 279  
Jô de Farias Lima, 556  
Joao Muñoz-Durán, 568  
John Fredy Barrera Ramírez, 921  
John M. González MD, Ph.D., 903  
Jorge D. Mercado-Gómez, 291  
Jorge Montes-Monsalve, 532  
José Antolín Aké-Castillo, 797  
José Jaime Cayotopa-Torres, 748  
José Luis Alberdi, 113  
José Luis Fernández-Alonso, 44  
José Luis Sánchez-Santiesteban, 163  
José M. Torres, 728  
Jose Manuela Vallejo-López, 805  
José María Sigarreta-Almira, 163  
José Murillo-A, 321  
José Tavera, Ph.D., 224  
Juan Alejandro Villazón-Gómez, 336  
Juan Guillermo McEwen O., MD, PhD, 925  
Juan José Gallego-Zerrato, 797  
Juan Manuel Díaz Merlano, Dr. rer. nat., 250  
Juan Pablo Betancourt-Arango, 833  
Julián Beltrán-P., 602  
Julian Rojas, 7  
Julio César Caicedo, 16  
Karín Menéndez-Delmestre, 227  
Laura Daniela Jiménez-Prada, 618  
Laura Pérez, 70  
Leonardo Panche, 307  
Leonid Ipaz, 16  
Liliana Palma-Silva, 70  
Lorena Buitrago-Rueda, 102  
Lucimar Gomes Dias, 923  
Luis F. García, 762  
Luis Hernán Ochoa-Gutiérrez, 618  
Luisa F. Dueñas, 307  
Luz Elena Bolívar-Marinez, 513  
Luz Marina Melgarejo, 362  
Luz Stella Suárez-S, 321  
M. Alejandra Lemus-Nemocón, 227  
Madelin Gómez-Hernández, 703  
Maria Elena Gómez, 898  
María Elena Sáenz, 113  
María Girleza Ramírez-González, 805  
María Mercedes Zambrano, Ph. D., 673  
María Rosa Alva Carmona, 146  
Mario-Armando Higuera-G, 227  
Mateo Reyes, 394  
Mateus Felipe dos Anjos-Souza, 546  
Michael Castañeda-Mendoza, 818  
Miguel A. Xicoténcatl, 183  
Miguel Murillo, 629  
Mildred Mayorga, 362  
Moisés Wasserman Ph.D., 907  
Mosa Valdina Ferreira Moreira, 90  
Nadya L. Chaves-Aguilar, 307  
Natalia Gómez-Pérez, 146  
Néstor Roncancio-Duque, 805  
Nicolás Martínez-Alba, 844

Nigel J. Mason, 227  
Olga Garatejo-Escobar, 844  
Olga Lucía Pardo-Herrera, 279  
Omar Aguilar-Loreto, 30  
Óscar Adrián Guzmán-Piedrahita, 59  
Óscar Álvarez-Silva, 394  
Paula D. Muñoz, 307  
Rafael C. Bortolin†, 728  
Ramón Salazar Quevedo, 584  
Reynaldo Ricardo Quispe-Infantes, 486  
Ricardo Abreu-Blaya, 163

Ricardo Santiago Martínez, 113  
Roberto Bernal-Correa, 532  
Rogelio Roberto Muñoz-Li, 584  
Rolando Javier Rincón-Ortiz, 818  
Román Castañeda, 679  
Sandra Campuzano, 501  
Sandra Esperanza Melo, 362  
Santiago Pinzón-Cortés, 146  
Santiago R. Duque, 70  
Santiago Vargas-Domínguez, 146, 428  
Sergio A. Cifuentes-Vásquez, 227

Servio Tulio Pérez-Merchancano, 513  
Sheyla Regina Marques Couceiro, 556  
Sting Silva Duarte, 556  
Walter Darío Di Marzio, 113  
William Aperador, 16  
William Usaquén-Martínez, 568  
Xavier Marquínez-Casas, 568  
Yakelín Cobo-Vidal, 336  
Yesmin Fontalvo, 394  
Yuri Ian Carvalho Furtado, 90

## Índice de artículos - Index of Articles

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Volumen 49, números 190, 191, 192 y 193.

### Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences

#### Original article

- Myiasis, a neglected disease: A review of clinical cases and their distribution in Colombia**  
Miasis, una enfermedad desatendida: revisión de casos clínicos y su distribución en Colombia ..... 279

#### Artículo original

- Caracterización bioinformática de modificaciones postraduccionales asociadas a la mutación con cambio de sentido T30I en la ferritina de cadena ligera y su efecto en la hiperferritinemia con cataratas**  
Bioinformatic characterization of post-translational modifications related to the T30I missense mutation in the ferritin light chain protein and its effect on hyperferritinemia with cataracts ..... 703

#### Artículo original

- Órbita de Algol a partir de espectros obtenidos con el espectrógrafo Espartaco 2**  
Orbit of Algol from Espartaco-2 spectra ..... 7

#### Artículo original

- Desarrollo y propiedades de heteroestructuras de baja dimensionalidad: un estudio de materiales basados en carburos, nitruros, carbonitruros y óxidos**  
Development and properties of low dimensionality heterostructures:  
A study of materials based on carbides, nitrides, carbonitrides, and oxides ..... 16

#### Original article

- Electrostatic Energy for a Circular Charged Configuration: Discrete vs. Continuum**  
Energía Electrostática para una Configuración de Carga Circular: Caso Discreto vs. Continuo ..... 30

#### Artículo original

- Un análisis de las primeras observaciones astronómicas realizadas en el Observatorio Astronómico de Santafé de Bogotá**  
An analysis of the first astronomical observations made at the Astronomical Observatory of Santafé de Bogotá ..... 471

#### Artículo original

- Modelos de media móvil integrada autorregresiva de la radiación solar global en el distrito San Jerónimo de Andahuaylas, Perú**  
ARIMA models of global solar radiation in the San Jerónimo de Andahuaylas district, Perú ..... 486

#### Artículo original

- Modelización matemática para la predicción y disminución del ruido vehicular en entornos urbanos**  
Mathematical modeling for the prediction and mitigation of vehicular noise in urban environments ..... 501

### Ciencias Físicas Physical Sciences

**Ciencias  
Físicas**

Physical Sciences

Artículo original

**La teoría de cuerdas y la AdS/CFT: dos formalismos en proceso de construcción**

String theory and AdS/CFT: two formalisms in progress ..... 513

Original article

**Study of the structural and optical properties of CuInSe<sub>2</sub> thin films obtained by RF sputtering as a function of the deposition temperature**

Estudio de las propiedades estructurales y ópticas de películas delgadas de CuInSe<sub>2</sub> obtenidas mediante pulverización catódica por radiofrecuencia en función de la temperatura de depósito ..... 532

Original article

**AI-Guided Discovery of Chiral Kagome Materials: Linking Wyckoff Symmetry, Oxidation States, and Electronic Topology**

Descubrimiento asistido por IA de materiales Kagome quirales: relación entre simetría de Wyckoff, estados de oxidación y topología electrónica ..... 714

Artículo original

**Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIII. Una nueva especie de *Phragmotheca* (Malvaceae) de Panamá, y notas sobre el género**

*Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIII. A new species of *Phragmotheca* (Malvaceae) from Panama, and notes on the genus ..... 44*

Artículo original

**Efecto del nematodo foliar (*Aphelenchoides pseudobesseyi*) en el crecimiento y producción del frijol (*Phaseolus vulgaris*) en Colombia**

Effect of the foliar nematode (*Aphelenchoides pseudobesseyi*) on the growth and production of beans (*Phaseolus vulgaris*) in Colombia ..... 59

Artículo original

**Diatomeas del registro sedimentario del sistema lagunar Yahuaraca, Amazonas, Colombia**

Diatoms from the sedimentary record of the Yahuaraca lagoon system, Amazonas, Colombia ..... 70

Original article

**Hemato-immunological responses of juvenile tambaqui (*Colossoma macropomum*) after commercial clay dietary supplementation**

Respuestas hematoinmunológicas de juveniles de tambaquí (*Colossoma macropomum*) después de la suplementación dietética con arcilla comercial ..... 90

Original article

**Prediction of the duration of phenological stages in two varieties of standard carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) in terms of thermal time**

Predicción de la duración de las etapas fenológicas en dos variedades de clavel estándar (*Dianthus caryophyllus* L.) en términos de tiempo térmico ..... 102

Artículo original

**La exposición crónica al herbicida paraquat produce cambios en la sensibilidad y la demografía de *Scenedesmus quadricauda*.**

Chronic exposure to paraquat affects *Scenedesmus quadricauda* sensibility and demography. .... 113

**Ciencias  
Naturales**

Natural Sciences

<b>Ciencias Naturales</b> Natural Sciences	<a href="#">Original article</a>	<b>Plant diversity of Neotropical dry forest fragments undergoing an ecological restoration process in the Colombian Caribbean</b>	
		Diversidad vegetal en fragmentos de bosque estacionalmente secos sometidos a un proceso de restauración ecológica en el Caribe colombiano .....	291
	<a href="#">Artículo original</a>	<b>Caracterización biológica del isópodo gigante (<i>Bathynomus giganteus</i>) en aguas profundas del Caribe colombiano</b>	
		Biological characterization of the giant isopod ( <i>Bathynomus giganteus</i> ) in deep waters of the Colombian Caribbean .....	307
	<a href="#">Artículo original</a>	<b>Composición y distribución de los helechos y licófitos del bosque muy húmedo premontano: vereda Vergel Alto (Cubarral – Meta), Colombia</b>	
		Composition and distribution of ferns and lycophytes of the very humid premontane forest: Vergel Alto (Cubarral - Meta, Colombia) .....	321
	<a href="#">Original article</a>	<b>Spatio-temporal variability of organic matter content in a vertisol planted with sugarcane under different management systems</b>	
		Variabilidad espacio-temporal del contenido de materia orgánica en un vertisol plantado con caña de azúcar bajo diferentes sistemas de manejo .....	336
	<a href="#">Artículo original</a>	<b><i>Burmeistera galeanae</i> (Campanulaceae, Asterales) una especie nueva de los Andes noroccidentales de Colombia</b>	
		<i>Burmeistera galeanae</i> (Campanulaceae, Asterales), a new species from the northwestern Andes of Colombia .....	346
	<a href="#">Original article</a>	<b>A new species and new records of Myrtaceae from Colombia</b>	
		Una nueva especie y nuevos registros de Myrtaceae en Colombia .....	355
<a href="#">Original article</a>	<b>Physiological behavior of banana passionfruit [<i>Passiflora tripartita</i> var. <i>mollissima</i> (Kunth) Holms-Niels. &amp; P.M. Jørg.] in two altitudinal conditions at Pasca municipality, Cundinamarca (Colombia)</b>		
	Comportamiento fisiológico de la curuba [ <i>Passiflora tripartita</i> var. <i>mollissima</i> (Kunth) Holms-Niels. & P.M. Jørg.] en dos condiciones altitudinales en el municipio de Pasca, Cundinamarca (Colombia) .....	362	
<a href="#">Artículo original</a>	<b>Una nueva especie de <i>Aulonemia</i> (Poaceae: Bambusoideae) del Parque Nacional Natural Las Orquídeas, Antioquia, Colombia</b>		
	A new species of <i>Aulonemia</i> (Poaceae: Bambusoideae) from Las Orquídeas National Natural Park (Antioquia, Colombia) .....	378	
<a href="#">Original article</a>	<b>Expansion of the distribution range and ecological niche modeling of <i>Philodendron asplundii</i> (Araceae) in South America</b>		
	Expansión del rango de distribución y modelamiento del nicho ecológico de <i>Philodendron asplundii</i> (Araceae) en América del Sur .....	546	

Original article

**Reproductive biology of *Macrobrachium amazonicum* (Heller, 1862) (Crustacea: Decapoda, Palaemonidae) from the mouth and lower Amazon River regions, Brazil**

Biología reproductiva de *Macrobrachium amazonicum* (Heller, 1862) (Crustacea, Decapoda, Palaemonidae) en la desembocadura y las regiones bajas del río Amazonas, Brasil ..... 556

Revisión tema

**Teorías evolutivas en los cursos de Zoología y en los discursos de fin de periodo académico en la Universidad Nacional de Colombia, 1868-1875**

Evolutionary theories in the zoology courses and end-of-year speeches at Universidad Nacional de Colombia, 1868-1875 ..... 568

Artículo original

**Estado de conservación de la familia Sphagnaceae en Cuba bajo perspectivas de cambio climático**

Conservation status of the Sphagnaceae family in Cuba under climate change perspectives ..... 584

Original article

**Mangroves: coastal vegetation and marine influence in La Caimanera wetland (Sucre) during the last 6000 years**

Manglares: vegetación costera e influencia marina en la ciénaga La Caimanera (Sucre) durante los últimos 6000 años ..... 602

Artículo original

**Foraminíferos bentónicos como indicadores ambientales en dos entornos arrecifales de Colombia: la isla de Providencia y la bahía de Cartagena**

Benthic foraminifers as bioindicators in two Colombian reef settings: Old Providence Island and Cartagena Bay ..... 728

Artículo original

**Utilización de subproductos lignocelulósicos para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. y *P. djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn en San Martín, Perú: una evaluación productiva y nutricional**

Utilization of lignocellulosic by-products for the cultivation of *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. y *P. djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn in San Martín, Perú: a productive and nutritional evaluation ..... 748

Artículo original

**Inmunidad innata y funciones antimicrobianas del capullo durante la estivación de los peces pulmonados**

Innate immunity and antimicrobial functions of the cocoon during estivation in lungfish ..... 762

Artículo original

**La familia Marcgraviaceae en México**

The Marcgraviaceae family in Mexico ..... 772

Original article

**Marine diatoms from the Colombian Pacific: A list of species with some taxonomic annotations**

Diatomeas marinas del Pacífico colombiano: Una lista de especies con algunas anotaciones taxonómicas ..... 797

<p><b>Ciencias Químicas</b> Chemical Sciences</p>	<p><a href="#">Original article</a></p> <p><b>Estimating density and occupancy of <i>Penelope perspicax</i> (Cauca Guan) and <i>Alouatta seniculus</i> (Colombian Red Howler Monkey) in the Otún Quimbaya Fauna and Flora Sanctuary, Colombia</b></p> <p>Estimación de densidad y ocupación de <i>Penelope perspicax</i> (Pava caucana) y <i>Alouatta seniculus</i> (Mono aullador rojo colombiano) en el Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya, Colombia ..... 805</p>	805
	<p><a href="#">Original article</a></p> <p><b>Biogenic synthesis of silver-functionalized iron and copper oxide nanocomposites using the aqueous extract of <i>Psidium guajava</i> fruit</b></p> <p>Síntesis biogénica de nanocompuestos de óxidos de cobre y de hierro funcionalizados con plata utilizando el extracto acuoso del fruto de <i>Psidium guajava</i> ..... 818</p>	818
	<p><a href="#">Original article</a></p> <p><b>Optimization of the methodology for the extraction of organophosphate pesticides by HS-SPME-GC-NPD</b></p> <p>Optimización de la metodología de extracción de plaguicidas organofosforados por HS-SPME-GC-NPD ..... 833</p>	833
<p><b>Ciencias de la Tierra</b> Earth Sciences</p>	<p><a href="#">Artículo original</a></p> <p><b>El efecto de la “isla seca” en el clima de las regiones altoandinas durante el Holoceno tardío</b></p> <p>The “dry island” effect on the climate of the high Andean regions during the late Holocene ..... 129</p>	129
	<p><a href="#">Review article</a></p> <p><b>The Fúquene National Geomagnetic Observatory: A journey through its past, present, and future</b></p> <p>El Observatorio Geomagnético Nacional de Fúquene: un recorrido por su pasado, su presente y su futuro ..... 146</p>	146
	<p><a href="#">Artículo original</a></p> <p><b>Evolución morfodinámica del delta de Tinajones, río Sinú: una visión estacional e interanual</b></p> <p>Morphodynamic evolution of the Tinajones Delta in the Sinú River: a seasonal and interannual perspective ..... 394</p>	394
<p><b>Matemáticas</b> Mathematics</p>	<p><a href="#">Artículo original</a></p> <p><b>Análisis de la influencia del eclipse solar anular del 14 de octubre del 2023 en la variación de la gravedad vertical medida con un gravímetro CG-5</b></p> <p>Analysis of the influence of the October 14, 2023, annular solar eclipse on the variation of vertical gravity measured with a CG-5 gravimeter ..... 618</p>	618
	<p><a href="#">Artículo original</a></p> <p><b>Descomposiciones aditivas del vector de desplazamiento del sistema de Lamé-Navier</b></p> <p>Additive decompositions of the displacement vector of the Lamé-Navier system ..... 163</p>	163
	<p><a href="#">Original article</a></p> <p><b>Rational magnetic equivariant K-theory</b></p> <p>K-teoría equivariante magnética racional ..... 183</p>	183

**Matemáticas**  
Mathematics

Artículo original

**La cisoide de Diocles en el contexto de la matemática antigua**

Diocles' cissoid in the context of ancient mathematics ..... 198

Review article

**On a classification problem for a quiver of type  $\tilde{A}_3$**

Sobre un problema de clasificación para un carcaj de tipo  $\tilde{A}_3$  ..... 411

Artículo original

**Una generalización del método de Newton-Kantorovich**

A generalization of the Newton-Kantorovich method ..... 629

Artículo original

**La espiral de Arquímedes y los problemas clásicos de la geometría griega**

The Archimedean spiral and the classical problems of Greek geometry ..... 645

Original article

**A survey on information geometry: statistical manifolds and statistical models**

Un estudio sobre geometría de la información: variedades estadísticas y modelos estadísticos ..... 844

Ensayo

**Galois, Riemann y Felisberto. Fragmentos de un arte de la ambigüedad en la narrativa temprana**

Galois, Riemann, and Felisberto. Fragments of ambiguity in the early narrative ..... 872

Ensayo/ Essay

**The artistic view of a botanist-ecologist on the landscape and flora of the Colombian páramo region**

La visión artística de un botánico-ecólogo sobre el paisaje y la flora del páramo colombiano ..... 236

**Premio Nobel de Física 2025: los galardonados, el motivo, el legado**

Nobel Prize in Physics 2025: the laureates, the reason, the legacy ..... 898

**Premio Nobel de Fisiología o Medicina**

**Linfocitos T reguladores: de la teoría del *horror autotoxicus* al Premio Nobel 2025**

Nobel Prize in Physiology or Medicine  
Regulatory T lymphocytes: from the horror autotoxicus theory to the Nobel Prize 2025 ..... 903

**Premio Nobel de Química a los diseñadores de estructuras metalorgánicas**

Nobel Prize in Chemistry awarded to designers of metal-organic frameworks ..... 907

**El Premio Abel 2025**

The Abel Prize 2025 ..... 911

Opinión/ Opinion

**¿Por qué el turismo de hipopótamos en Colombia no es una buena idea?**

Why hippo tourism in Colombia is not a good idea? ..... 216

**Rosa Smith Eigenmann: la primera ictióloga**

Rosa Smith Eigenmann: the first female ichthyologist ..... 224

<b>SICOAQ 2024: Launching the First Colombian Astrochemistry Symposium in Bogotá</b>	
SICOAQ 2024: Lanzamiento del Primer Simposio Colombiano de Astroquímica en Bogotá .....	227
<b>Camille Flammarion y su huella en Colombia</b>	
Camille Flammarion and his legacy in Colombia .....	428
<b>El sembrador de jardines: Enrique Pérez Arbeláez y la floración de una idea</b>	
The garden sower: Enrique Pérez Arbeláez and the flowering of an idea .....	914
<b>Comentario bibliográfico/Bibliographic commentary</b>	
<b>Auri sacra fames. Una década serena y apacible de José Celestino Mutis: 1772 - 1782</b>	
Auri sacra fames. A serene and peaceful decade of José Celestino Mutis: 1772 - 1782 .....	246
<b>La colección de libros del Banco de Occidente sobre la naturaleza colombiana</b>	
Banco de Occidente's collection of books on Colombian nature .....	250
<b>¿Infracciones a la Misión Médica o crímenes de lesa humanidad contra los trabajadores de salud?</b>	
Violations of the Medical Mission or crimes against humanity against health workers? .....	675
<b>Las plantas nos miran</b>	
Plants watch us .....	677
<b>Hitos del pensamiento ondulatorio de la luz: a veces incluso también ondula. <i>Saltem aliquando etiam undulatum</i></b>	
Milestones in the wave theory of light: sometimes it even undulates. <i>Saltem aliquando etiam undulatum</i> <i>John Fredy Barrera Ramírez</i> .....	921
<b>Macroinvertebrados acuáticos de Colombia: Parte I.</b>	
Aquatic macroinvertebrates of Colombia: Part I. <i>Lucimar Gomes Dias</i> .....	923
<b>Club de revistas/Journal Club</b>	
<b>Una comunidad microbiana definida reproduce los atributos de la fermentación del chocolate de sabor fino</b>	
A defined microbial community reproduces attributes of fine flavour chocolate fermentation .....	673
<b>Fenotipos circulatorios en hipertensión identificados mediante monitoreo ambulatorio de la presión arterial de 24 horas</b>	
Circulatory phenotypes in hypertension identified by 24-hour ambulatory blood pressure monitoring .....	925
<b>Vida de la Academia</b>	
Catherine Bréchnignac .....	435
<b>Medalla Humboldt-Caldas 2025</b>	
Humboldt-Caldas Medal, 2025 .....	928

<b>Premio Angela Restrepo Moreno 2025</b>	
Angela-Restrepo-Moreno Prize, 2025 .....	932
<b>Carta a la editora/Letter to the Editor</b>	
<b>1900-1925: La ruptura de la Física</b>	
1900-1925: The breakdown of physics .....	679
<b>Obituario/Obituary</b>	
<b>María Eurídice Páramo Fonseca</b> .....	253
<b>Al Maestro Rubén Ardila, <i>In memoriam</i></b> .....	257

## 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](http://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](http://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](http://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.

