



ISSN 0370-3908 • eISSN 2382-4980

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

Vol. 48 • Número 186 • Págs. 1-246 • Enero - Marzo de 2024 • 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 Teresa Rugeles, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, 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
- Rubén Ardila, Ph. D.
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

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

Ciencias Químicas

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

- 15 Carmenza Duque Beltrán, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Ciencias de la tierra

- 15 Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
- 15 José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Alexander Correa, Ph. D.
Instituto de Geología, Universidad Nacional
Autónoma de México, Mexico
- 15 Camilo Montes, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Germán Bayona, Ph. D.
Corporación Geológica Ares, Bogotá, Colombia
- 15 Hernando Dueñas Jiménez, Ph. D.
BIOSS SAS, Antioquia, Colombia
- 15 Natalia Hoyos, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Camila Martinez, Ph. D.
Universidad Eafit, Medellín, Colombia
- 15 Monica Carvalho, Ph. D.
University of Michigan, Estados Unidos
- 15 Oris Rodríguez-Reyes, Ph. D.
Universidad de Panamá
- 15 José Gregorio Portilla, Ph. D.
Observatorio Astronómico Nacional de Colombia,
Bogotá, Universidad Nacional, Colombia
- 15 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
- 15 Luis Español González, Ph. D.
Universidad de la Rioja, España
- 15 Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 15 Clara Elena Sánchez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Fernando Zalamea Traba, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carlos Enrique Mejía, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 15 Francisco Marcellán, Ph. D.
Escuela Politécnica Superior, Madrid, España
- 15 Carolina Benedetti Velásquez, Ph.D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- 15 Fernando León Saavedra, Ph. D.
Universidad de Cádiz, España

Comité científico internacional

- | | | |
|--|--|--|
| 15 Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España | 15 Pedro Romero, Ph. D.
Instituto Ludwig de la Universidad de
Lausana en Suiza | 15 Jean-Pierre Galaup
Universidad de París Saclay, Francia |
| 15 Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile | 15 Ulrich Paessler, Ph. D.
Academia de Ciencias de Berlín-
Brandenburgo, RFA | 15 Helena Nader, Ph. D.
Academia Brasileira de Ciencias, Brasil |
| 15 Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College, Claremont, CA, EEUU | 15 Maria Sagrario Millán, Ph. D.
Universidad Tecnológica de Tarrasa,
España | 15 Roberto JJ Williams, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, Argentina |
| 15 Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, EEUU | 15 Zbigniew Jaroszewicz
Centro de Fotónica Aplicada, Instituto
Tele y Radiotécnico, Instituto Nacional
de Telecomunicaciones, Polonia | 15 Walter Fernández Rojas, Ph. D.
Presidente Academia Nacional de
Ciencias, Costa Rica |
| 15 José Rubens Pirani Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brazil | 15 José Luis Moran López, Dr. rer. nat.
Academia Mexicana de Ciencias,
México | 15 Alex Held, Ph. D.
Commonwealth Scientific and Industrial
Research Organisation (CSIRO), Australia |
| 15 Federico Ardila, Ph. D.
San Francisco State University, San
Francisco, CA, EEUU | | 15 Rafael Radi, M.D.
Academia de Ciencias de Uruguay |
| Juan Alfredo Tirao, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Córdoba,
Argentina | | |

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana
Agris
Dialnet
EBSCO
Historia Mathematica

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

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

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

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936



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

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

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

Nuestra portada

Flor de *Epidendrum chloronanum* Hágsater & A. Cisneros.

Cuellar J, Gómez N, Trujillo-Trujillo E, Perdomo O. *Epidendrum chloronanum* (Orchidaceae): primer registro en la flora de Colombia.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2024.

doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2193>



ISSN 0370-3908 • eISSN 2382-4980

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

Vol. 48 • Número 186 • Págs. 1-246 • Enero - Marzo de 2024 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences

Artículo original

Imaginarios colectivos y conflicto entre humano y animal feral en el Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia)

Collective imaginaries and human-feral animal conflict in the Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia)

Yaneth Muñoz-Saba, Edmon Castell-Ginovart, Hugo Díez-Santaolalla, Eduardo Alexander Sarmiento-Téllez, Simón Ulloa-Rengifo, María Alejandra Perdomo-Gaitán, Joan Sebastián Joya-Mesa, María Fernanda Bustos-Hernández, Marie Jöelle Giraud-López, Ángel M. Sánchez

7

Ciencias Físicas Physical Sciences

Artículo original

Estudio del índice de radiación ultravioleta en la zona Centro Occidente de México, su asociación con el riesgo de cáncer de piel y propuesta tecnológica para la difusión y prevención del riesgo

Study of the ultraviolet radiation index in the Central Western area of Mexico, its association with the risk of skin cancer, and a technological proposal for the dissemination of the problem and its prevention

Gustavo A. López-Saldaña, José L. Cendejas-Valdez, J. Leonardo Soto-Summano, Ma. Elena Benítez-Ramírez

25

Ciencias Naturales Natural Sciences

Artículo original

Cuatro nuevas especies de *Quararibea* “grupo *grandifolia*” (Malvaceae) de Colombia y Ecuador

Four new species of *Quararibea* “*grandifolia* group” (Malvaceae) from Colombia and Ecuador

José Luis Fernández-Alonso

38

Artículo original

Obtención y caracterización estructural de β -D-glucanos de la seta comestible *Pleurotus pulmonarius*

Obtention and structural characterization of β -D-glucan from the edible mushroom *Pleurotus pulmonarius*

Aracely del Carmen García-Cuan, Ricardo Gutiérrez-De Aguas, Daniel R. Molina-Velasco, Carlos Silvera-Redondo

65

**Ciencias
Naturales**
Natural Sciences

Original article

First Record of *Parasphaerosyllis malimalii* (Polychaeta: Syllidae) from Gorgona Island (Colombian Pacific)

Primer registro de *Parasphaerosyllis malimalii* (Polychaeta: Syllidae) en la isla Gorgona (Pacífico colombiano)

Edgardo Londoño-Cruz, María Fernanda Cardona-Gutiérrez, Mario H. Londoño-Mesa 79

Artículo original

***Epidendrum chloronanum* (Orchidaceae): primer registro en la flora de Colombia**

Epidendrum chloronanum (Orchidaceae): first record for the flora of Colombia

Javier Cuellar, Nilmar Gómez, Edwin Trujillo-Trujillo, Oscar Perdomo 86

Artículo original

¿Cómo ha evolucionado el tráfico ilegal de fauna en el Tolima? Análisis multitemporal de una amenaza para la biodiversidad

How has the illegal wildlife trade evolved in Tolima? Multi-temporal analysis of a threat to biodiversity

Tatiana E. Lozano-Suárez, Edison D. Bonilla-Liberato, Edwin O. López-Delgado 94

Artículo original

El efecto del complejo mayor de histocompatibilidad sobre el olfato y la selección sexual en aves

The effect of the major histocompatibility complex on olfaction and sexual selection in birds

Luis F. García, Gabriel Merizalde 109

**Ciencias
Químicas**
Chemical Sciences

Original article

Arsenic geochemical species modeling, prediction, and bioavailability in groundwaters of the Oban Massif, southeastern Nigeria

Modelación, predicción y biodisponibilidad de especies geoquímicas de arsénico en aguas subterráneas del macizo de Oban, sureste de Nigeria

Azubuikwe S. Ekwere 131

Artículo original

Pronóstico de la precipitación en los Andes tropicales: lecciones de las simulaciones de convección permitida

Forecasting precipitation over the tropical Andes: Lessons from convection-permitting simulations

J. Alejandro Martínez, María L. Rendón, Luisa F. Buriticá-Ruiz, Santiago Giraldo-Cárdenas, Paola A. Arias 145

Artículo original

Análisis del índice de claridad atmosférica diaria en la ciudad de Puno, 2014-2021

Analysis of the daily atmospheric clarity index in the city of Puno, 2014-2021

Lelia Quispe-Huamán 169

**Ciencias
de la Tierra**
Earth Sciences

Artículo original

Prehistoria del Observatorio Astronómico Nacional. Registros meteorológicos y astronómicos de José Celestino Mutis y Francisco José de Caldas entre 1772 y 1802

Prehistory of the National Astronomical Observatory. Meteorological and astronomical records of José Celestino Mutis and Francisco José de Caldas between 1772 and 1802

Alberto Gómez-Gutiérrez 178

Artículo de revisión invitado

Algunos elementos históricos específicos sobre la evolución de la Educación matemática como disciplina de investigación

Some specific historical elements on the evolution of 'Mathematics Education' as a research discipline

Bruno D'Amore 195

Club de revistas/Journal Club

La Sierra Nevada de Santa Marta, una topografía dinámica

The Sierra Nevada de Santa Marta, a dynamic topography

Germán A. Prieto 205

Ensayo/ Essay

Un espacio propio compartido

A Shared Space of One's Own

María Mercedes Zambrano 208

Repensando la gestión de incendios forestales en Suramérica: un enfoque integrado en la era del cambio climático

Rethinking forest fire management in South America: an integrated approach in the era of climate change

Dolores Armenteras, Tania Marisol González 210

El impacto de las mujeres colombianas en la Paleontología

The impact of Colombian women in Paleontology

Dirley Cortés 216

Vida de la Academia

Enlightened by Microbial Rhodopsins

Iluminados por las rodopsinas bacterianas

María Mercedes Zambrano 222

Comentario bibliográfico/Bibliographic commentary

Prólogo Inmunología de Rojas, 19ª. ed.

Prologue Rojas Immunology, 19th Edition

John M. González, MD, PhD. 226

Obituario/Obituary

Jaime Ignacio Lesmes Camacho 229

Gabriel Toro González 231

Enfoque y alcance

Focus and Scope 234

Ciencias del Comportamiento

Artículo original

Imaginarios colectivos y conflicto entre humano y animal feral en el Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia)

Collective imaginaries and human-feral animal conflict in the Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia)

Yaneth Muñoz-Saba^{1,*}, Edmon Castell-Ginovart², Hugo Díez-Santaolalla³, Eduardo Alexander Sarmiento-Téllez¹, Simón Ulloa-Rengifo¹, María Alejandra Perdomo-Gaitán¹, Joan Sebastián Joya-Mesa⁴, María Fernanda Bustos-Hernández⁵, Marie Jöelle Giraud-López¹, Ángel M. Sánchez³

¹ Grupo de Investigación Evolución y Ecología de Fauna Neotropical (EEFN), Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

² Instituto de Investigaciones Estéticas, Facultad de Artes, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³ Proyecto de Voluntariado para Censo del Lobo y Evaluación del Estado de Conservación de sus Hábitats Naturales en la Península Ibérica, Universidad de Alcalá (UAH), Madrid, España

⁴ Grupo de Investigación Morfología y Ecología Evolutiva, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

⁵ Semillero Ecología de Mamíferos Neotropicales (EMN), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

Las actividades humanas han tenido un impacto negativo en las funciones de los ecosistemas. A pesar de que se sabe de los beneficios que estos ofrecen, no se los maneja apropiadamente, lo que evidencia el conflicto entre el hombre y los diversos ambientes naturales. Este es el caso del Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia), donde la actividad silvopastoril de la comunidad se ha visto afectada por ataques al ganado ovino y caprino, probablemente por las incursiones de un felino. Con el fin de confirmar si se trataba de este tipo de ataque, se hicieron reuniones virtuales y presenciales con la comunidad y se recolectaron los datos biológicos en los lugares de los ataques. A partir del análisis de la información, se concluyó que estos eran de perros domésticos y no de un felino, y que este animal sólo existía en los relatos transmitidos de persona a persona. Dicha situación no es ajena a lo registrado en otras zonas del país, lo que se explica por la cercanía cada vez mayor del hombre y el perro, y la tendencia a olvidar la responsabilidad que conlleva la tenencia de estos animales domésticos.

Palabras clave: Depredación de ganado; Ecosistema; Felinos; Grandes mesodepredadores; Perros ferales, perros descuidados.

Abstract

Human activities have a detrimental impact on ecosystems. Despite the awareness of their advantages, their effective management is seldom implemented, leading to a conflict between humans and diverse natural ecosystems. In this context, the community's silvopastoral activities in the Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia) have suffered various attacks on sheep and goats due to the alleged presence of a feline. To confirm such information, we met virtually and face-to-face with the community and collected biological data from where the attacks happened. From the analysis of all the information obtained, we found that no feline had been seen except in the person-to-person accounts and that the attacks were by domestic dogs. This is not unrelated to situations in other areas of the country explained by the increasing closeness of man and dog, which results in overlooking the responsibility implied in the possession of these domestic animals.

Keywords: Livestock predation; Ecosystem; Felines; Large meso-predators; Feral dogs, Neglected dogs.

Citación: Muñoz-Saba Y, Castell-Ginovart E, Díez-Santaolalla H, *et al.* Imaginarios colectivos y conflicto entre humano y animal feral en el Páramo del Almorzadero (Santander, Colombia). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):7-24, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1985>

Editor: Rubén Ardila

***Correspondencia:**

Yaneth Muñoz-Saba;
ydmunozs@unal.edu.co

Recibido: 31 de agosto de 2023

Aceptado: 19 de diciembre de 2023

Publicado en línea: 30 de enero de 2024



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

Introducción

En Colombia hay páramos en las tres cadenas montañosas del país, principalmente en la cordillera Oriental, que ocupan una extensión de 14.434 km² (**Garavito**, 2011), es decir, la mitad de los que existen en el planeta. Los páramos son ecosistemas de gran importancia biológica debido a su variedad y a la presencia de flora y fauna endémicas (**Vásquez & Buitrago**, 2011); se les considera como un sistema biológico estratégico por los servicios ecosistémicos que ofrece, entre ellos, la regulación hídrica y la captura de carbono (**Rojas**, 2013a).

Autores como **Di Bitetti** (2008) plantean que los patrones de biodiversidad y estructura de estos ecosistemas están muy relacionados con la presencia de grandes depredadores. Por ejemplo, los depredadores apicales permiten un mayor equilibrio y complejidad trófica y los grandes carnívoros brindan beneficios económicos y servicios ecosistémicos directos e indirectos (regulación de la abundancia y comportamiento de presas herbívoras y mesodepredadoras, suministro de alimento a los carroñeros, dinámica de enfermedades y almacenamiento de carbono, entre otros). Así, el mantenimiento o recuperación de la densidad ecológicamente efectiva de los grandes carnívoros es una herramienta importante para mantener la estructura y la función de los ecosistemas (**Ripple et al.**, 2014).

Por otra parte, las actividades primarias en entornos con presencia de depredadores grandes y medianos ha implicado históricamente un conflicto sociocultural debido a los ataques de la fauna silvestre contra animales domésticos. Dichos ataques, que ponen en cuestión la responsabilidad de prevenir y vigilar a los animales domésticos para evitar que sean depredados por la fauna silvestre, generan resistencia a los procesos de conservación (**Lazo et al.**, 2019).

En el entorno de los páramos colombianos las ocupaciones económicas de sus pobladores cambian la estructura y el funcionamiento del paisaje, lo que genera perturbaciones ecológicas. Se dan así situaciones de deforestación para apropiarse de terrenos, acondicionarlos y destinarlos a la ganadería, con el consecuente crecimiento de la frontera agrícola, la intensificación del conflicto entre el humano y la fauna silvestre, y un mayor impacto, directo e indirecto, en la distribución y la diversidad de sus poblaciones (**Dias et al.**, 2020; **Lopes et al.**, 2021). En este contexto, el trabajo conjunto de la sociedad y la academia constituye un lugar de diálogo y entendimiento en pro de una apropiación sustentable de la región que priorice la igualdad ecosistémica basada en la conciencia social y ecológica (**Pineda & Zárrate**, 2014). En dicho marco se propuso el proyecto “Alianza académico-comunitaria por un plan de manejo de los felinos del Páramo del Almorzadero, Santander, sentir y pensar desde y con el páramo”, cuyo objetivo fue determinar la problemática asociada con la fauna silvestre en la cultura de la comunidad en el Páramo del Almorzadero, Santander.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el Páramo del Almorzadero, sobre la cordillera Oriental, municipio El Cerrito, departamento de Santander (**Figura 1**), el cual limita con el Páramo de Santurbán por el costado nororiental y conecta hacia el suroriente con la Sierra Nevada del Cocuy, en jurisdicción de los municipios de El Cerrito, Chitagá, Guaca, San Andrés, Silos y Tona.

El Páramo del Almorzadero comprende 125.210 ha, su rango altitudinal se sitúa entre los 3.100 y los 4.530 m s. n. m., su índice pluvial es de 1.390 mm, con dos periodos de lluvia en abril-junio y septiembre-noviembre (**Morales et al.**, 2007), y tiene una población aproximada de 7.500 habitantes (**DANE**, 2005). La actividad agropecuaria es la principal del municipio, pues copa el 44 % del territorio: 10 % dedicado a la agricultura, principalmente cultivos de papa (47 %), ajo, maíz y hortalizas, en tanto que el 90 % se destina a la cría bovina y ovina (**DANE**, 2014).

El proyecto se llevó a cabo en (1) El Mortiño, municipio El Cerrito, vereda Boyagá, sector El Mortiño Angostura (6,9549474609 N y 72,7287234698 W), situado a 3.763 m s.n.m.; (2) El Rodeo, municipio El Cerrito, vereda Volcán, sector El Rodeo (6,9540961976

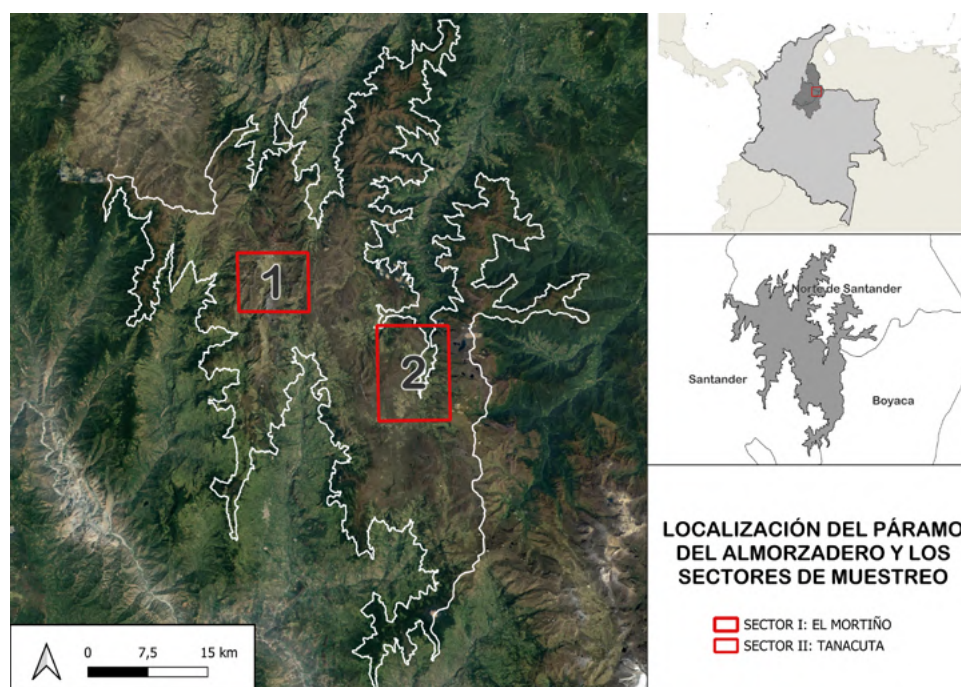


Figura 1. Páramo del Almorzadero, Santander, Colombia. Elaboró: Hugo Díez Santaolalla, 2023

N y 72,7134007311 W), situado a 3.124 m s.n.m.; (3) Tanacuta, municipio El Cerrito, vereda Volcán, sector Tanacuta (6,8788202034 N y 72,5876569863 W), a 3.273 m s.n.m.; (4) Tanacuta, municipio El Cerrito, vereda Tulí, sector Tanacuta (6,8790634215 N y 72,5606597800 W), situado a (3.139) m s.n.m.; (5) Tierra Negra, municipio El Cerrito, vereda Corral Falso, sector Tierra Negra, finca El Villar o Cogedero (6,9021691386 N y 72,5827926248 W), localizado a 3.686 m s.n.m. (**Figuras 2 y 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1985/3942>).

La información registrada en campo se georreferenció e interpretó utilizando sistemas GPS y SIG, así como con el mapa base de Google Satélite. Se localizaron puntos de interés como las viviendas de la población, los lugares donde se habían producido ataques según las comunidades locales y la ubicación de rastros de fauna silvestre. La cartografía y el trabajo en SIG se hicieron con QGIS v. 3.32.3. El resto de las capas empleadas en el proceso (límites departamentales, delimitación del Páramo del Almorzadero y veredas del área de estudio), se obtuvieron del portal de datos abiertos de cartografía y geografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (**Ministerio de Ambiente**, 2022) (**Figura 3**).

Trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana

A partir del 2019 se hizo un trabajo de apropiación social del conocimiento para conocer la problemática referida a los posibles ataques de felinos a la fauna de producción e indagar en zonas estratégicas del área rural y urbana del Páramo del Almorzadero sobre las posturas de los líderes comunitarios en torno al conflicto con la fauna silvestre. Se llevaron a cabo reuniones virtuales con la comunidad (líderes comunitarios), se definieron los puntos críticos de los ataques al ganado (cabras *Capra hircus*, ovejas *Ovis orientalis aries*) y se propició la reflexión sobre las relaciones entre los habitantes humanos y no humanos, sus consecuencias y posibles alternativas de solución.

El 10 de abril de 2022, después de una convocatoria, se socializó el proyecto en el parque principal del municipio El Cerrito invitando a la comunidad a participar en él con base en las siguientes preguntas orientadoras: ¿usted sabe qué es un felino?, ¿cómo lo llaman?, ¿por qué sabe de él?, ¿qué come el felino?, ¿cómo se alimenta el felino?,



Figura 2. Veredas donde se realizaron los muestreos, Páramo del Almorzadero, Santander, Colombia. Elaboró: Hugo Díez Santaolalla, 2023

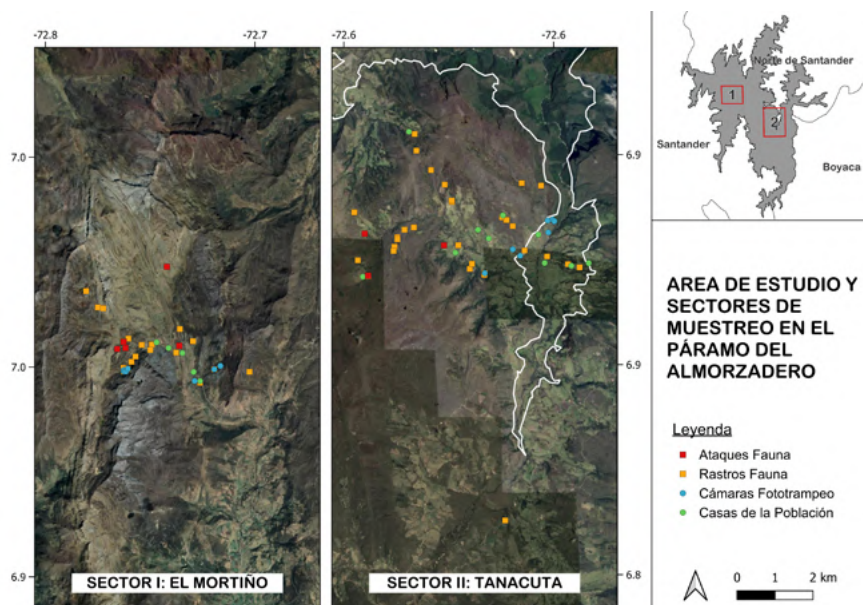


Figura 3. Sitios de muestreo y de registros de ataque al ganado, Páramo el Almorzadero, municipio El Cerrito, Santander, Colombia. Elaboró: Hugo Díez Santaolalla, 2023

¿usted hace cuánto que habla del felino? Posteriormente, el 16 de abril de 2022, se invitó a la comunidad a hacer dibujos de la biodiversidad del páramo en un evento denominado “Animalatón”. En estas actividades participaron cerca de 35 habitantes entre los 4 y 80 años (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1985/3942>).

A partir de estos encuentros, se crearon espacios de apropiación social del conocimiento orientados a crear conciencia sobre el patrimonio biocultural del páramo con base en la información relativa a la biodiversidad. Se creó un grupo de WhatsApp denominado

“Semillero comunitario del patrimonio biocultural: sentir desde el páramo” en el que se invitaba a reflexionar sobre la problemática ambiental en el páramo y la actuación de la comunidad frente a ella.

Durante el proceso de construcción del semillero comunitario se hicieron entrevistas semiestructuradas (14 abril 2022) con la participación de líderes comunitarios de la vereda Tanacuta (cinco hombres, dos mujeres de 14 a 50 años de edad y un niño de tres años). Las entrevistas se registraron en video con la aprobación previa de los participantes.

Ensamblaje de mamíferos

Para determinar si había felinos en el área de estudio, se hizo un mapa a partir de las observaciones recogidas en distintas plataformas de ciencia ciudadana. Con base en el libro de **Payán-Garrido & Soto-Vargas (2012)**, se valoró la posible presencia del puma (*Puma concolor*), la oncilla (*Leopardus tigrinus*) y el jaguar (*Puma yagouaroundi*). Se consideró que las observaciones directas podían ofrecer más información detallada sobre el Páramo del Almorzadero que las áreas de distribución reportadas por las autoridades colombianas. Alrededor de cada punto de observación se estableció un perímetro de 10 km como posible área de desplazamiento de los felinos (**Figura 4**).

Para conocer la fauna de medianos y grandes mamíferos (de 150,1 g hasta > 5,1 kg; **Sánchez et al., 2004**) en el Páramo del Almorzadero, se instalaron seis cámaras trampa (Bushnell) en cada temporada (seca: 11 marzo a 22 mayo, 2022; lluvias: 27 septiembre a 10 octubre, 2022 y 16 octubre a 3 noviembre, 2023), que se ubicaron siguiendo el método pasivo (**Díaz-Pulido & Payán-Garrido, 2012**). Asimismo, se tuvo en cuenta el conocimiento de la comunidad sobre los rastros, es decir, todo aquello que permite evidenciar la presencia de una especie: individuos, avistamientos, caminaderos, camaretas, comederos, excretas, hozaderos, huellas, olores, pelos, rasguños, refugios y vocalizaciones de los animales domésticos y silvestres (**Muñoz-Saba et al., 2019**), así como remanentes de bosques, sitios de acceso al recurso hídrico (arroyos, lagunas), lugares estratégicos y la localización de los casos de depredación de la fauna doméstica (**Figura 3**).

Durante la temporada seca en la vereda El Mortiño se cubrió un área de 0,336 ha y un perímetro de 0,288 km y en la vereda Tanacuta durante la temporada de lluvias se analizaron 30,6 ha y un perímetro de 2,94 km. La información asociada se compiló en el formato Darwin Core: localidad (coordinada, altitud), hábitat, fecha y hora (activación, desactivación), ubicación de la cámara (dirección), tipo (foto, video), y color (blanco y

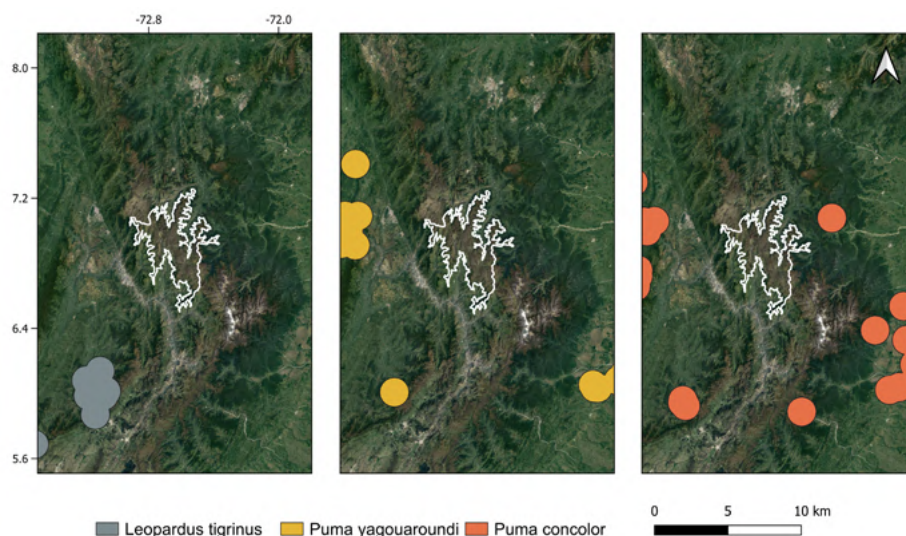


Figura 4. Distribución de las especies de félidos con probable presencia en el Páramo del Almorzadero, Santander, Colombia. Elaboró: Hugo Díez Santaolalla, 2023

negro, color). Se analizó la siguiente información sobre el evento: fecha y hora de la actividad, número de individuos, actividad, estadio reproductivo, sexo, edad, y observaciones generales. Se registraron 1.912 fotos (2,12 % de éxito de muestreo) y 38 videos (9,09 % de éxito de muestreo).

Se establecieron transectos de observación en la vereda el Mortiño siguiendo la metodología de **Muñoz-Saba *et al.*** (2019). Los recorridos se realizaban entre las 07:00 y las 18:00 h. (área: 0,544 km²; perímetro: 5,24 km; número de personas/transecto: 2-5; velocidad aproximada: 0,5 km/h). Los sitios de muestreo se establecieron según las condiciones del hábitat, los rastros y otras variables propias del terreno. Todos los registros se fotografiaron y georreferenciaron (**Figura 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1985/3942>).

Se hicieron avistamientos, es decir, la observación directa del animal; se detectaron las huellas con la metodología de **Aranda** (2012); en los casos de animales con almohadillas evidentes, se midió el ancho y largo del cojinete y el ancho y largo de la huella desde la base inferior a la punta del dedo más sobresaliente; en los animales con pezuña (ungulados), se midió el largo y ancho de la huella; en cuanto a la marcha, se midió la zancada de las extremidades anteriores y la de las extremidades posteriores, así como el largo y el ancho del patrón general; las excretas se recolectaron siguiendo la metodología de **Perdomo-Gaitán** (2021), y los rasguños se determinaron recurriendo a la experticia de los pobladores y los investigadores.

En un formato Darwin Core se compiló la información asociada: número consecutivo, localidad (coordinada, altitud), hábitat, sustrato, fecha, hora, actividad, fotografía asociada al rastro, y búsqueda de rastros (caminaderos, huellas, etc.), según correspondiera. Todos los rastros se compararon con los de ejemplares depositados en colecciones biológicas.

A la hora del análisis se tuvo en cuenta la evidencia en fotos y videos, así como la escena *in situ*; allí se recolectaron ejemplares que se encontraron muertos y fragmentos de huesos, pelos y dientes, algunos asociados con los ataques reportados por la comunidad, información que se analizó teniendo en cuenta la experticia de los pobladores y los investigadores (biología forense). La identificación del material se corroboró en la Colección de Mamíferos Alberto Cadena García del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia y el conocimiento de los investigadores (biólogos y médicos veterinarios); el material se depositó en esta colección con los números de catálogo ICN-MHN 26499-26505. La recolección se amparó en el permiso marco de la Universidad Nacional de Colombia (Resolución 0255, 14 marzo 2014; Certificado SIB Colombia: ID 80b4bc15-7d68-453c-8de9-c57be469881a; Proyecto: Alianza Académico-Comunitaria por un Plan de Manejo de los Felinos del Páramo del Almorzadero, Santander; HERMES 51257) y contó con el aval del Comité de Ética de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia del 5 de marzo del 2021.

Resultados

Trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana

Los resultados obtenidos surgieron de diálogos sostenidos durante la visita a casas campesinas seleccionadas por el grupo de trabajo, con tres enfoques: 1) definir la cobertura del área de incidencia del conflicto; 2) diversificar los grupos etarios, y 3) explorar los sitios del análisis biológico.

En El Mortiño se evidenció una comunidad organizada jerárquicamente en torno a dos dirigentes naturales de la zona, quienes han ejercido como líderes en otros proyectos con entes gubernamentales y de la sociedad civil. Así se generó la comunicación directa con las familias de la zona, además del canal unidireccional de información subjetiva.

El conflicto con la fauna silvestre surgió a raíz de la muerte de individuos ovinos y caprinos causada por un felino en particular que, de acuerdo a las características descritas por los campesinos, se trataba de un puma. Esto implicó la pérdida del principal sustento de algunas familias de la zona, promoviendo su actitud negativa ante la presencia

de fauna silvestre en las inmediaciones de sus ganaderías, las cuales hacen parte del complejo del páramo ante el avance de la frontera agropecuaria, patente al observar los límites de los predios.

En cuanto a la postura de la comunidad expresada por estos líderes, se constató su preocupación frente a los procesos de cumplimiento de la Ley de Páramos (**Congreso de Colombia - Ley 1930**, 2018), la cual establece los lineamientos para la zonificación y delimitación de zonas de páramo en el territorio colombiano.

En torno a las causas de los ataques de la fauna silvestre, se hizo énfasis en los procesos de liberación de felinos de gran tamaño por parte de las corporaciones ambientales regionales y las instituciones que lideran proyectos en la zona para la conservación del cóndor andino (*Vultur gryphus*), a los que se aludió por coincidir temporalmente (tres y cinco años) con el inicio de estos ataques. En este sentido, describieron ataques de gran magnitud por parte de felinos que han resultado en la muerte de hasta 30 individuos en una única noche, según lo han constatado por el hallazgo de los cadáveres, los tipos de mordidas en el cuerpo, el horario y las zonas de los sucesos. En este escenario preocupan las acciones violentas que puedan llevar a cabo los residentes de esta zona del páramo contra la fauna silvestre que, según ellos, afecta de una u otra manera a sus ganaderías y procesos agropecuarios.

En la vereda Volcán, sector El Rodeo, ubicada en cercanía de grandes extensiones de bosques que limitan con el departamento de Norte de Santander, se encontró un único líder comunitario y político, quien mostró claramente su postura en contra de los procesos académicos que él denomina “ambientalistas”, su poca empatía con los equipos que han desarrollado diversas actividades relacionadas con la flora y la fauna, y su desconocimiento de la comunidad como un factor importante y determinante en los procesos de creación mancomunada de soluciones sostenibles.

En esta zona se observó un mayor conocimiento de la biología, la ecología y el comportamiento de la fauna silvestre. En muchas ocasiones, los pobladores hicieron alusión a características precisas del actuar de pumas, osos de anteojos (*Tremarctos ornatus*), perros y cóndores, entre otros. Allí los ataques no se dieron con tanta frecuencia como en otras zonas y los residentes diferenciaron los animales responsables de los ataques a partir de algunos de sus rasgos, sin culpar únicamente a los grandes felinos. Entre los rasgos mencionados se encuentran la forma de incisión en el cuello, los rastros de carga y la apertura pectoral de las presas y el número de individuos muertos por ataque. En general, se evidenció en la comunidad una actitud menos negativa frente a la fauna silvestre y una postura proclive a la búsqueda de soluciones de convivencia con las comunidades animales con quienes interactúan a través de alternativas distintas a la violencia y la hostilidad.

Los ataques de fauna en Tanacuta, en límites del municipio de Concepción (Santander), con el que comparte ciertas zonas de jurisdicción, han sido mucho menos frecuentes. Se observó entre los pobladores un conocimiento significativo sobre la biología de la fauna silvestre y no se encontró un liderazgo ambiental evidente.

Debe mencionarse el cambio en las dinámicas ganaderas de esta zona, con rebaños de ovinos y caprinos de menor tamaño que los de El Mortiño y predominio de la ganadería bovina. Sin embargo, existen predios donde se conservan algunos rebaños numerosos, en particular uno, que limita con bosques de la parte alta de la montaña contigua.

En Tierra Negra los pobladores se expresaron con mayor vehemencia sobre el conflicto con la fauna silvestre, según se evidenció en las actividades pedagógicas y de interacción con la comunidad. Asimismo, se detectó la presencia de diversas asociaciones a las que pertenecían varias de las personas abordadas. Sus líderes detallaron los “ataques de felinos” en zonas específicas, entre ellas, Chachabrá, El Mortiño y Tabetas, donde hay venados, los cuales son apreciados y considerados de importancia para la región.

A partir de estos hallazgos queda claro que la comunidad del Páramo del Almorzadero tiene posiciones diferentes frente a tres variables: 1) la perspectiva de convivencia con la fauna silvestre; 2) la disposición al diálogo y la integración en torno al conocimiento de su territorio, y 3) la postura frente a la importancia del páramo como ecosistema estratégico en un marco legal de implementación de la delimitación.

Parte de la comunidad, en especial en la zona urbana de Tierra Negra y en El Mortiño, expresó una visión utilitarista del ambiente, empleando un lenguaje violento, apático, de exclusión y negativo para referirse a este, y proponiendo la eliminación de la fauna silvestre, ya sea a través de la expulsión de las especies del ecosistema y su traslado a cualquier otro lugar, o sacrificando a los individuos que causan los ataques.

Por otro lado, en El Rodeo y Tanacuta, se encontró una visión más sensible hacia los temas ambientales. Las mujeres relataron con gran detalle la disminución del avistamiento de algunos animales silvestres comunes en la zona, así como la necesidad de protegerlos por motivos estéticos de su aspecto físico y por el carácter inofensivo que exhiben los venados y los osos.

En general, la problemática de los ataques a la fauna doméstica, las deficiencias en la ejecución de los proyectos de entes gubernamentales y no gubernamentales y la escasa educación ambiental han generado una visión dicotómica frente a la protección ambiental propia del siglo XXI en las comunidades campesinas del Páramo del Almorzadero.

En cuanto a la adquisición de herramientas de conocimiento y empoderamiento de su entorno, existe el anhelo comunitario de sumar conocimiento para defender su territorio, lo que se explica, entre otros aspectos, por la defensa de la implementación de la Ley de Páramos (**Congreso de Colombia - Ley 1930**, 2018), la protección de sus actividades agropecuarias y la curiosidad por su entorno, fenómeno que se percibe especialmente entre los jóvenes de la zona rural del Páramo del Almorzadero.

Debe tenerse en cuenta que la deficiente educación ambiental ha ocasionado el desconocimiento del páramo como ecosistema estratégico que provee recursos importantes para el bienestar de las comunidades urbanas y rurales. La idea del equilibrio ecosistémico y del ecosistema como una unidad conformada por diferentes partes no fue evidente en ninguno de los sectores. Por el contrario, se conserva una visión cultural heredada, que se finca en la deforestación, la cacería y el aumento de la frontera agropecuaria.

Por otra parte, se reiteraron los posibles avistamientos del tigrillo (*Leopardus tigrinus*) en comentarios como “eso le pasó al vecino” (entrevista a la familia Reyes, 15 de abril, 2022), así como avistamientos de armadillos (*Dasypus novemcinctus*), venados (*Odocoileus virginianus*), y ataques de perros no ferales a guaches (*Nasuella olivacea*) y conejos (*Sylvilagus brasiliensis*).

En la vereda El Mortiño la comunidad se refirió a los ataques a ovejas y los posibles encuentros relatados por los mayores, así como a los ataques de perros no ferales a las ovejas. Se mencionaron soluciones como el enmallado de los corrales, aunque recalando sus elevados costos. En Concepción la comunidad relató posibles encuentros y avistamientos del tigrillo, al igual que los daños a la agricultura que este ocasiona.

En el municipio El Cerrito, la comunidad relató el hallazgo de “30 individuos muertos” con comentarios como “... hace 6 a 8 años... bajó al río por agua, en donde vio un felino grande, café, al que llaman león de monte. El animal sólo lo observó y se fue rápidamente” (entrevista virtual a actores comunitarios, noviembre de 2021).

Los habitantes de la vereda Tanacuta comentaron que “El plago nadie lo ha visto” (entrevista a José Reyes Carvajal, 15 de abril, 2022), por lo que su supuesta presencia responde a un imaginario en el que se lo llama “vampiro”, “almizcle”, “plago”, “amenaza”, y se asume que “mata por diversión” (entrevista a actores comunitarios, abril de 2022).

En síntesis, las características del conflicto con la fauna silvestre en la frontera agrícola y urbana del Páramo del Almorzadero son las siguientes:

- El reporte de ataques a los rebaños de ovinos, lo que ocasiona pérdidas económicas importantes en las actividades de sustento de las familias campesinas.
- Los puntos de vista en torno a la problemática fluctúan entre un enfoque hostil, con personas que proponen soluciones violentas y excluyentes de la fauna silvestre, y una visión de integración y convivencia en que se acepta la responsabilidad parcial de la comunidad frente al problema.
- La gran incidencia que tienen las políticas gubernamentales nacionales y locales de implementación de leyes en las zonas de páramo.

- La influencia de los líderes comunitarios en la administración de los planes de manejo, por lo que debe considerarse su relevancia a la hora de plantear alternativas en este sentido.

Ensamblaje de mamíferos

Se analizaron 90.731 registros de las cámaras trampa, de los cuales 1.950 correspondían a información biológica (esfuerzo de muestreo: 75,33 h/persona, éxito de muestreo: 2,15 %). Con base en la literatura especializada, las entrevistas semiestructuradas, y la observación directa se registraron nueve especies de mamíferos silvestres medianos (**Figura 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1985/3942>) (**Tabla 1**).

A partir de la evidencia recolectada, se concluyó que en el área de estudio los perros eran los depredadores predominantes (**Figura 5S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1985/3942>), lo que se explicaría a partir de la biomasa de los individuos por especie, ya que es fundamental establecer la disponibilidad de alimento en el territorio (cadena trófica). Se registraron cuatro herbívoros domésticos medianos y grandes y el perro, cinco herbívoros *sensu stricto* en la fauna silvestre, y dos más que son herbívoros facultativos (oso y zorro (*Cerdocyon thous*)), así como consumidores de insectos (armadillo, guache) y de carne (oso, zorro) (**Tabla 1**). Los restos óseos recolectados presentaban mordidas de perros (*Canis lupus familiaris*), como lo corroboró el profesor Luis Joaquín Polo (médico veterinario, Universidad Nacional de Colombia) (**Figura 6S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1985/3942>).

Discusión

Se observó que ninguno de los felinos con posible presencia en el Páramo del Almorzadero había sido registrado en plataformas de ciencia ciudadana y, aunque es cierto que el área de estudio es una zona rural donde la población no usa extensamente aplicaciones como Observation.org o iNaturalist, en estas plataformas sí existen numerosos registros de otras especies en la zona. Por ello, consideramos que la ausencia de información sobre felinos se explica también porque los ejemplares son pocos y tienen las formas de camuflaje propias de los felinos. Esto refuerza el planteamiento de que no existe una amplia información sobre la distribución y ecología de los grandes depredadores en Suramérica.

En el Páramo del Almorzadero (Santander) la población considera que la agresión que está sufriendo el ganado (cabras, ovejas) se debe a ataques indiscriminados de la fauna silvestre, lo que representa una problemática ambiental. Hay que tener en cuenta que en las últimas décadas ha habido un crecimiento poblacional en los páramos de Colombia: la comunidad, probablemente por desconocimiento, invade los bosques de forma indiscriminada y el nuevo territorio así obtenido se dedica a actividades productivas (agricultura, ganadería de cabras y ovejas) que transforman y degradan los ecosistemas naturales promoviendo la fragmentación acelerada, la pérdida de conectividad de los hábitats, el incremento de la cacería y la persecución indiscriminada de la fauna silvestre, lo que conlleva el agotamiento de las presas para los depredadores grandes y medianos (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1985/3942>) (Rojas, 2013b; Cabrera & Ramírez, 2014; Ripple *et al.*, 2014; Khorozyan *et al.*, 2015; Braczkowski *et al.*, 2018).

No hay que olvidar que en el marco de los procesos sociales los dirigentes catalizan los propósitos comunes frente a las problemáticas que surgen en sus comunidades. El conflicto con la fauna silvestre en la frontera agrícola y urbana exige análisis transversales que permitan establecer relaciones con los líderes comunitarios para alcanzar soluciones sostenibles en estas zonas.

En el trabajo conjunto con la comunidad se evidenció que muchos de los reportes de los ataques al ganado y los posibles depredadores respondían al imaginario colectivo, por lo que es de gran importancia que los expertos forenses vayan a las zonas y verifiquen la evidencia (mordeduras, comportamiento del animal atacante) relativa a los ataques registrados por los pobladores. Los animales silvestres rara vez causan la muerte del ganado en áreas mixtas (zonas boscosas y zonas pobladas); cuando esto sucede es común que se atribuyan a los medianos y grandes carnívoros silvestres y no a los perros, pues ello

ocasionaría problemas legales a sus dueños (Fonseca & Palacios, 2012). Cabe resaltar que al culpar a los animales silvestres se minimiza la dimensión real del problema, ya que los perros causan mayor sufrimiento a la presa porque varios atacan simultáneamente o, si es uno solo, da varias mordidas; además, pueden atacar a una o varias presas y no consumirlas en su totalidad (Bonacic & Muñoz, 2014).

Tabla 1. Lista de especies de mamíferos silvestres y domésticos, Páramo del Almorzadero, Santander, Colombia

Taxón	Orden	Familia	Género	Especie	Nombre común	Dieta	Peso (kg)	Tipo de evidencia	Mortiferno	Tanacuta	Referencia
Total	5	9	9	9					5	6	
Fauna silvestre	Cingulata	Dasypodidae	<i>Dasypus</i>	<i>Dasypus novemcinctus</i>	Armadillo	Insectívoro	1-15	Espécimen de colección: ICN-MHN 26499 Camareta		X	Romero, 2021
Fauna silvestre	Carnívora	Canidae	<i>Cerdocyon</i>	<i>Cerdocyon thous</i>	Zorro	Omnívoro: carne, semillas, insectos	4-7	Cámara trampa	X		Arruda-Bueno & Motta-Junior, 2004
Fauna silvestre	Carnívora	Procyonidae	<i>Nasua</i>	<i>Nasua olivacea</i>	Guache	Omnívoro: invertebrados, insectos, vertebrados pequeños, frutos, vegetales	1,3-5	Espécimen de colección: ICN-MHN 26500 Hozadero	X	X	Myers et al., 2008
Fauna silvestre	Carnívora	Ursidae	<i>Tremarctos</i>	<i>Tremarctos ornatus</i>	Oso careto	Omnívoro: Vegetales, carne	80-125	Excretas Rasguños		X	González-Maya et al., 2017
Fauna silvestre	Cetartiodactyla	Cervidae	<i>Odocoileus</i>	<i>Odocoileus virginianus</i>	Venado de cola blanca	Herbívoro	40-160	Avistamiento Espécimen de colección: ICN-MHN 26501-26502 Excretas		X	González-H., 2001
Fauna silvestre	Rodentia	Sciuridae	<i>Notosciurus</i>	<i>Notosciurus granatensis</i>	Ardilla	Herbívoro: Granívoro	0,21-0,54	Cámara trampa		X	Thorington et al., 2012
Fauna silvestre	Rodentia	Cuniculidae	<i>Cuniculus</i>	<i>Cuniculus taczanowskii</i>	Tinajo	Herbívoro: frutos, vegetales	6,3-10	Espécimen de colección: ICN-MHN 26503 Excretas	X		Patton, 2015
Fauna silvestre	Rodentia	Cricetidae	<i>Thomasomys</i>	<i>Thomasomys</i> sp.	Ratón de campo	Herbívoro: Raíces, semillas, hongos	0,26-0,44	Excretas	X		Eisenberg, 2000
Fauna silvestre	Lagomorpha	Leporidae	<i>Sylvilagus</i>	<i>Sylvilagus brasiliensis</i>	Conejo	Herbívoro	0,99	Espécimen de colección: ICN-MHN 26504-26505 Excretas	X	X	Eisenberg, 2000
Total	3	3	5	5							
Fauna doméstica	Carnívora	Canidae	<i>Canis</i>	<i>Canis lupus familiaris</i>	Perro	Omnívoro		Avistamiento			
Fauna doméstica	Cetartiodactyla	Bovidae	<i>Bos</i>	<i>Bos taurus</i>	Vaca	Herbívoro		Avistamiento			
Fauna doméstica	Cetartiodactyla	Bovidae	<i>Capra</i>	<i>Capra hircus</i>	Cabra	Herbívoro		Avistamiento			
Fauna doméstica	Cetartiodactyla	Bovidae	<i>Ovis</i>	<i>Ovis orientalis aries</i>	Oveja	Herbívoro		Avistamiento			
Fauna doméstica	Perissodactyla	Equidae	<i>Equus</i>	<i>Equus ferus caballus</i>	Caballo	Herbívoro		Avistamiento			

En un reciente estudio realizado con la técnica de foto-trampeo mediante cámaras instaladas por la Secretaría de Ambiente en los Cerros Orientales de Bogotá, se capturaron seis especies de mesomamíferos, entre ellos, perros domésticos descuidados o ferales, pero no así grandes depredadores (**Malaver, 2023**). Además, los registros de manadas de perros ferales o descuidados en diversas áreas de alto valor ecológico de Colombia son constantes. Por ejemplo, en el municipio de Chía (Cundinamarca), en el departamento de Huila, y en áreas de máxima protección como el Parque Nacional Natural Chingaza (departamentos de Cundinamarca y Meta) y el Parque Nacional Puracé (departamentos de Cauca y Huila), se han reportado manadas de hasta doce perros ferales, lo que representa un fenómeno preocupante en franca expansión en todo el país.

Prácticamente en todos los hábitats naturales del Neotrópico, modificados en algún modo por el ser humano, hay presencia de *Canis lupus familiaris*, incluso en densidades considerables, así como escasez de grandes depredadores como el puma o el jaguar, especies que podrían regular la población de cánidos asilvestrados que, en áreas geográficas altamente humanizadas del continente asiático, por ejemplo, se han convertido en las presas principales de otros grupos emparentados como el leopardo (*Panthera pardus*), que abunda en la periferia de áreas urbanas de la India (**Athreya et al., 2016**).

Aunque son pocos los estudios sobre el impacto de los perros asilvestrados, o simplemente descuidados, en los hábitats naturales del Neotrópico (**Allemand et al., 2018**), está claro que representan una amenaza para los animales silvestres nativos e, incluso, el ganado o el ser humano, como lo demuestran la literatura científica y las noticias, no sólo sobre eventos de depredación, sino de transmisión de enfermedades (**Brackowski et al., 2018**).

Estos cánidos no sólo causan eventos de depredación o zoonosis, también compiten en los sistemas ecológicos naturales con los depredadores nativos como el ocelote (*Leopardus pardalis*), el tigrillo, el jaguar y el oso de anteojos. Los perros ferales o descuidados suelen agruparse en manadas para ser más potentes y exitosos en los lances cinegéticos, con lo que la densidad de las presas naturales y los depredadores nativos podría disminuir en el territorio por efecto de su desplazamiento. Además, se producen habitualmente fenómenos de agresión a los mesodepredadores nativos, lo que aumenta su mortalidad.

En sistemas ecológicos suficientemente conservados y con gran disponibilidad de presas, los lobos (*Canis lupus*) y los pumas, ambos depredadores ápice, prefieren un amplio espectro de presas naturales frente al ganado y otros animales domésticos. La mayor parte de las capturas son de ungulados silvestres (96 %), en tanto que los animales domésticos representan menos del 1 % en los eventos de depredación (**Knopff et al., 2010**). Por otra parte, **Clark et al. (2014)** reportaron que el 95,5 % de las presas correspondían al ciervo canadiense o wapití (*Cervus elaphus canadensis*), el ciervo mulo (*Odocoileus hemionus*) y el venado de cola blanca, y el 4 % restante se componía de diferentes especies de aves y mamíferos carnívoros, conejos y roedores, principalmente. En cuanto al ganado, las ovejas fueron la única especie depredada y representaron menos del 0,5 %.

Como lo sugieren **Fonseca & Palacios (2012)**, es crucial el análisis detallado de la evidencia, es decir, el conjunto de objetos o rastros contrastados que permite verificar o descartar información. En esta investigación se hizo énfasis en las fotos entregadas a los investigadores, cuya calidad y enfoque variaban, en las visitas a los lugares de los ataques, y en la experticia de algunos de los investigadores conocedores de las conductas depredadoras de diferentes especies silvestres, aproximación que responde a un trabajo interdisciplinario de la comunidad y los técnicos. A diferencia de las situaciones con muertes humanas, en estos eventos normalmente no se aísla el punto exacto donde ocurrieron, por lo que la escena no se preserva y se pierde mucha información; tampoco se hacen autopsias, lo que lleva a conclusiones erradas.

La depredación de ganado por parte de grandes y medianos depredadores (pumas, zorros perrunos, osos de anteojos) crea conflictos con las comunidades, que responden cazándolos y persiguiéndolos antes de comprobar los sucesos (**Khorozyan et al., 2015**; **Brackowski et al., 2018**). Es entendible que la comunidad priorice su pequeña economía rural, pero con ello olvida, tal vez por desconocimiento, que sus acciones rompen el

equilibrio entre desarrollo y conservación de la biodiversidad. La presencia de grandes y medianos depredadores evidencia la salud del ecosistema, pues son especies indispensables para la regulación de muchos de los procesos ecosistémicos: el control de la población de presas, la reducción de la carga de parásitos en humanos, la dispersión de semillas, la regulación indirecta de la depredación de plantas y semillas de los bosques y, por ende, de su regeneración (Payán-Garrido & Soto-Vargas, 2012; Khorozyan *et al.*, 2015; Brackowski *et al.*, 2018).

La cacería indiscriminada y la migración de poblaciones en respuesta a la sequía o las lluvias reducen la densidad de potenciales presas silvestres de los depredadores, como el venado de cola blanca, el guache y el conejo, entre otros, por lo que algunos depredan al ganado para sobrevivir (Hernández-Guzmán *et al.*, 2011; Khorozyan *et al.*, 2015). Además, especialmente durante las lluvias, la vegetación es exuberante y las presas se camuflan mejor, en tanto que el ganado ingresa a estas áreas ante la ausencia de un pastoreo controlado por parte de los ganaderos.

Para compensar sus requerimientos metabólicos, los grandes depredadores comienzan a acechar a cabras y ovejas ante la ausencia de presas silvestres (armadillos, conejos, venados, zorros, entre otros); es decir, la baja biomasa de presas es un impulsor de estos comportamientos, lo que afecta la economía familiar y la conservación de los ecosistemas, e incrementa el conflicto entre el humano y los medianos y grandes depredadores. En principio, debe mantenerse, conservarse y restaurarse la biodiversidad para mantener la biomasa de presas silvestres y así evitar las extinciones locales de los depredadores (Khorozyan *et al.*, 2015; Suryawanshi *et al.*, 2017).

Por otra parte, en el Páramo del Almorzadero (Santander) se encontraron tres tipos de perros (*sensu* Barnett & Rudd, 1983): 1) los domésticos, que son parte integral de las comunidades urbanas y rurales; 2) los abandonados, que no cuentan con alimentación, refugio ni salud, y 3) los silvestres (o ferales) carroñeros y depredadores, cuyas presas provienen de la fauna silvestre y del ganado. Se propone un cuarto tipo, el de los perros en semilibertad o descuidados, que tienen dueños, pero no reciben el bienestar mínimo (cobijo, comida, medicación, etc.). También impactan la salud pública, el medioambiente, y las actividades productivas los perros domésticos que, incluso si reciben alimento y otros beneficios, pueden depredar la fauna silvestre y la doméstica (Silva-Rodríguez & Sieving, 2012). Además, estos se mueven libremente, lo que probablemente es una de las causas de la disminución de presas silvestres. Asimismo, es importante comprender cómo los animales domésticos (perros, gatos, ganado doméstico, etc.) afectan los ecosistemas naturales cuando se les introduce en ellos.

A medida que los perros domésticos se alejan del control y cuidado del ser humano (por abandono, hambre u otras causas), su comportamiento se aproxima al de su antepasado silvestre común, el lobo (*Canis lupus*), y son capaces de matar grandes presas (hasta 400 kg), aunque no son muy eficientes si no van en grupos estructurados o no tienen experiencia. Algunos autores describen los ataques de perros como de “mutilación excesiva”. Además, los rebaños de ovejas atacados por perros sufren mucho más estrés que si el ataque proviene de depredadores silvestres. Cuando entran en un encierro, las persecuciones de los perros suelen prolongarse más en el tiempo y las víctimas pueden morir por el ataque directo, por un paro cardíaco o por asfixia al amontonarse, entre otras causas (Zanini *et al.*, 2008).

El impacto de los ataques de perros al ganado, especialmente en áreas donde los grandes depredadores nativos son escasos, resulta ser mucho más devastador que el de éstos. En un estudio en los Pirineos franceses se reportaron 733 muertes de ovejas, el 91 % de ellas debido a los ataques de perros incontrolados que vagaban más o menos libremente por el monte, y de perros silvestres. Solamente en el 9 % restante de los casos hubo indicios de que los osos pardos (*Ursus arctos*) fueran los responsables de los ataques (Bouvier & Arthur, 1995).

En síntesis, hay evidencia de la disminución de los grandes carnívoros en matrices de paisaje dominadas por el hombre, alentada por la consideración de que podrían matar o herir animales domésticos (de compañía y producción) y humanos. La adjudicación de

muchos de los casos de depredación a estos grandes carnívoros, sin embargo, responde más a la imaginación que a la realidad (**Braczkowski et al.**, 2018); como bien lo dice José Reyes Carvajal, habitante del Páramo del Almorzadero, “El plago nadie lo ha visto.”

Las autoridades locales, regionales y nacionales deben impulsar el desarrollo e implementación de programas que incentiven la educación ambiental y la ciencia ciudadana relativa a la biodiversidad asociada con los lugares de vivienda de los pobladores (matriz de paisaje mixta: bosques y agroecosistemas) en el marco de los Lineamientos para la Política de Tenencia Responsable de Animales de Compañía y de Producción (**Carreño**, 2017). Deben proponerse, asimismo, encierros amigables con el medio ambiente, hechos en madera proveniente de plantaciones forestales comerciales certificadas, con enmallados adecuados según el tipo de ganado, y un pastoreo semiestabulado, el cual previene y minimiza los ataques, además de mitigar efectos negativos sobre el ecosistema como la compactación y la degradación del suelo (**Terán-Cabascango**, 2014). Los esfuerzos de protección de esta fauna deben contemplar un mayor apoyo para lograr una ganadería de subsistencia (**Suryawanshi et al.**, 2017).

Los programas deben enfatizar las funciones ecológicas de los grandes depredadores, su nivel trófico y su importancia para el mantenimiento de la estructura del hábitat, la conectividad, y la provisión de servicios ecosistémicos en los paisajes compartidos (bosques, áreas agroforestales) (**Braczkowski et al.**, 2018). Asimismo, deben incentivar una mayor comprensión de las razones de los conflictos entre humanos y grandes depredadores, e identificar los principales puntos de ataque, con el fin de diseñar acciones de conservación de las especies. De todas maneras, para que las propuestas de concientización sobre la importancia del cuidado de la biodiversidad (ecosistema, flora, fauna, agua, suelos, etc.) se perciban en la comunidad, debe partirse de la comprensión del contexto histórico del poblamiento en el territorio.

Las personas que viven muy cerca de los depredadores nativos generalmente los consideran peligrosos, incluso cuando no se han reportado incidentes. Además, no llegan a concebir a los perros como una posible amenaza para los humanos o el ganado. Los grupos de perros cerca de las áreas urbanas están conformados generalmente por animales domésticos y su comportamiento de ataque está relacionado con el instinto de manada. Cuando atacan al ganado, matan o hieren a varios animales, lo que lleva al ganadero a eliminarlos, generando así un problema social. En el caso de un ataque, el testimonio de los testigos debe evaluarse conjuntamente con la evidencia física y las circunstancias del evento. El testimonio de los expertos es crucial para determinar el origen de ciertas lesiones, particularmente cuando se sospecha un ataque animal. La depredación animal a veces presenta características extrañas que pueden ser malinterpretadas por las autoridades encargadas de hacer cumplir la ley. A modo de ejemplo, las lesiones causadas por los dientes caninos podrían parecer hechas con instrumentos afilados, así que en los ataques de animales, el conocimiento de las características ecológicas y ambientales que rodean la escena pueden ayudar en su interpretación (biología forense) (**Fonseca & Palacios**, 2012).

En hábitats bien conservados, es decir con todos los componentes de los ecosistemas, se ha comprobado que los grandes carnívoros tienden a depredar mayoritariamente a sus presas naturales, es decir, los ungulados silvestres. Cuando no hay suficientes presas debido a la acción humana (caza incontrolada o furtiva, destrucción del hábitat por quemas o plantación de extensos monocultivos, usos ganaderos insostenibles, etc.), deben recurrir al ganado como última opción (**Suryawanshi et al.**, 2017). Las manadas de lobos fuertemente cohesionadas y mantenidas en el tiempo en determinado territorio discriminan positivamente las presas naturales frente al ganado doméstico (**Sánchez et al.**, 2018).

Por ello se requieren más esfuerzos o proyectos a largo plazo para estudiar, monitorear, mantener y restaurar las poblaciones de presas silvestres, especialmente de ungulados silvestres, preferidos por la especie depredadora en cuestión. Además, el uso del pastoreo tradicional (encierro nocturno del ganado, agrupación de los partos, perros de guarda debidamente entrenados y alimentados, etc.), podría prevenir la depredación del ganado y los conflictos entre humanos y grandes carnívoros, en este caso, felinos (**Khorozyan et al.**, 2015).

Los grandes depredadores nativos como pumas, jaguares, leopardos, lobos y otros, son los mejores controladores de los animales asilvestrados, los cuales pueden incluso constituir sus presas principales en ciertas áreas (**Athreya *et al.*, 2016**). Aportan, además, servicios ecosistémicos indispensables e insustituibles como el control de enfermedades transmitidas por vectores, algunas de ellas muy graves para el ser humano y el propio ganado (rabia, moquillo, etc.) (**Brackowski *et al.*, 2018**). Así, la conservación adecuada de las poblaciones de superdepredadores, como los grandes felinos, contribuiría a su labor ecológica fundamental que es, precisamente, la de proporcionar estabilidad y buena salud a los ecosistemas y preservar los demás elementos del medio, y no hay que olvidar que el ser humano también forma parte de este.

Las cascadas tróficas que provocan los grandes depredadores en los ecosistemas son beneficiosas, pues mantienen su integridad y el flujo de materia y energía. Su conservación y la de los hábitats que ocupan redundará en nuestro propio beneficio y permitirá nuestra supervivencia como especie habitante de los mismos sistemas ecológicos naturales. La presencia de grandes depredadores en el ecosistema supone también la eliminación de aquellos individuos de la fauna silvestre con síntomas de enfermedad o debilidad, lo que reduce la posible aparición de enfermedades en los animales domésticos. Sólo a través de la educación ambiental y la formación de las comunidades locales, se puede hacer conciencia sobre los servicios ecosistémicos y beneficios que aportan los grandes depredadores, incluso para las actividades ganaderas.

Las autoridades locales, regionales y nacionales tienen un papel clave en la conservación de la biodiversidad mediante el empleo adecuado de recursos públicos, la promoción del desarrollo sostenible y la circulación económica con énfasis en las zonas socioeconómicas sensibles o degradadas. Asimismo, es fundamental la participación ciudadana (**Sánchez *et al.*, 2018**).

Otra problemática asociada con los perros que no se maneja adecuadamente son los envenenamientos indiscriminados y masivos por parte de algunos miembros de ciertas comunidades locales, usualmente en zonas donde abundan cánidos desatendidos o asilvestrados. Ello causa enormes perjuicios al resto de la cadena trófica, que también resulta intoxicada al alimentarse de los cadáveres emponzoñados, lo que afecta especialmente a las cohortes de carroñeros y oportunistas como el cóndor andino o, incluso, el propio oso de anteojos.

Es decir, se deben plantear iniciativas de educación que fomenten la tolerancia de la convivencia con la fauna de grandes y medianos depredadores y promueva la salud y la prevención del riesgo de los animales de compañía y producción (**Carreño, 2017**). Los talleres de capacitación interdisciplinarios de las entidades gubernamentales y las ONG con técnicos y pobladores son muy útiles para la conformación de redes de apoyo ante esta problemática cada vez más frecuente en el país; en este contexto, los medios de comunicación son fundamentales. En síntesis, la clave para la convivencia entre el humano y el entorno silvestre es la educación desde la escuela básica sobre la conservación y la ecología de los grandes depredadores (**Mora *et al.*, 2019**).

La comunidad debe comprender la necesidad de implementar alternativas de manejo del conflicto entre los medianos y grandes depredadores y el humano que eviten que el ganado quede libre, ingrese a las zonas boscosas y deteriore la matriz del paisaje por la compactación del suelo y la pérdida de la cobertura vegetal (**Carvajal, 2021; Carbone *et al.*, 2010**), todo ello en pro del mantenimiento de dicha matriz y el adecuado manejo de la productividad de los pobladores.

La conservación a largo plazo de los grandes depredadores requiere de la participación de los pequeños, medianos y grandes propietarios de ganado, de programas sostenibles de uso de la tierra y de prácticas óptimas de manejo del ganado (cabras, ovejas) para limitar la depredación y los conflictos entre humanos y grandes depredadores (**Boron *et al.*, 2016**).

En el futuro, las estrategias de convivencia deben ser específicas del lugar e incorporar los valores culturales, las condiciones ambientales y la práctica de una economía relacionada con sus artesanías y su biodiversidad. Es urgente mejorar el seguimiento de las medidas de mitigación para promover una política efectiva basada en la evidencia (**van Eeden *et al.*, 2017**).

Conclusiones

Al margen de cosmogonías y mitologías locales, y teniendo en cuenta la literatura científica y los datos obtenidos durante el estudio, el equipo de investigación considera que lo más probable es que la gran mayoría de ataques y daños al ganado en la zona de estudio se debieron a perros domésticos no atendidos adecuadamente (faltos de alimento y otros cuidados), o a perros ferales.

La coexistencia con grandes depredadores es posible si se acogen buenas prácticas en el cuidado del ganado: implemento de medidas disuasorias y preventivas mediante el empleo de pastores eléctricos o *fladry*, perros de guarda cuando sea viable y haya supervisión, custodia nocturna del ganado, y agrupación y estabulación durante los partos, entre otras.

En cuanto al problema del envenenamiento de los perros abandonados o asilvestrados, se recomienda con urgencia una mayor supervisión y control de su presencia en el medio natural, ya que representan una amenaza directa o indirecta para el ganado y la fauna silvestre e, incluso, para el ser humano.

Es conveniente una restauración ecosistémica desde una perspectiva holística (biocultural-educacional) que contribuya a un mayor equilibrio y al aumento de la biodiversidad en la zona de estudio, lo que beneficiaría a las comunidades locales.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1985/3942>

Agradecimientos

Este estudio hizo parte del Proyecto “Alianza Académico-Comunitaria por un Plan de Manejo de los Felinos del Páramo del Almorzadero, Santander” (HERMES 51257) financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia en el marco de la “Convocatoria para el Apoyo de Proyectos de Investigación, Creación Artística e Innovación de la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia – 2020”. Agradecemos a la comunidad del Páramo del Almorzadero (Santander), en especial a quienes nos guiaron y compartieron con nosotras su conocimiento sobre la biodiversidad del páramo: Julio Mario Merchán Basto, Doris Torres, Rosmira Cárdenas, Luz Stella Bautista Ortiz, Liliana Sofía Merchán Rangel, Juliana Katherine Merchán Rangel, Angie Julieth Merchán Rangel, Martha Yaneth Rangel Villamizar, Luz Marina Salinas, Lucy Villamizar, Seráfico Calderón, Edgar Calderón Tarazona, Brayan Calderón, José Vicente Castro Sepúlveda, Alcides Conde, Gilberto Conde Antolinez, Yamid Antonio Jaimes Barajas, Raul Mancera, José Reyes Carvajal y familia, Iván Orduz, Pedro Julio Ortiz Jaimes, Jesús Antonio Pachón Santana, Luis Hernando Rodríguez Rivera, Nilson Roberto Silva Silva, Padre Milton Suárez, Ismael Villamizar. Asimismo, agradecemos a los evaluadores del manuscrito por sus excelentes aportes.

Contribución de los autores

YMS: dirección y concepción de proyecto, asesoría en el diseño metodológico, toma de datos en campo, determinación del material biológico, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana, análisis de datos, escritura del manuscrito. ECG: diseño del trabajo con comunidades, toma de datos en campo, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana, diagramación de las socializaciones, escritura del manuscrito. HDS: realización de los mapas, análisis de datos, escritura del manuscrito. EAST: diseño del trabajo con comunidades, toma de datos en campo, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana, escritura del manuscrito. SUR: toma de datos en campo, determinación del material biológico, recopilación de las bases de datos y la información para la realización de los mapas, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana, escritura del manuscrito. MAPG: toma de datos en campo, determinación del material biológico, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana. JSJM: coordinador logístico del trabajo en campo, trabajo

de educación ambiental y ciencia ciudadana, escritura del manuscrito. MFBH: diseño metodológico, toma de datos en campo, determinación del material, trabajo de educación ambiental y ciencia ciudadana, análisis de datos, escritura del manuscrito. MJGL: diseño y análisis del trabajo de educación ambiental y de ciencia ciudadana, diagramación de las socializaciones, toma de datos en campo. AMS: concepción de proyecto, asesoría en el diseño metodológico del uso de cámaras trampa, análisis de datos, escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Allemand, M.M., Ferregueti, A.C., Pereira-Ribeiro, J., Duarte-Rocha, C.F., Bergallo, H.G.** (2018). Invasion by *Canis lupus familiaris* (Carnivora) in a protected area in the Atlantic Forest Biome, Brazil: Spatial distribution and abundance. *Mastozoología Neotropical*, 26 (2), 233-240.
- Aranda-Sánchez, J.M.** (2012). Manual para el rastreo de mamíferos silvestres de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Arruda-Buenos, A. de, Motta-Junior, J.C.** (2004). Food habits of two syntopic canids, the maned wolf (*Chrysocyon brachyurus*) and the crab-eating fox (*Cerdocyon thous*) in southeastern Brazil. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(1), 5-14, <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2004000100002>
- Athreya, V., Odden, M., Linnell, J., Krishnaswamy, J., Karanth, K.** (2016). A cat among the dogs: Leopard *Panthera pardus* diet in a human-dominated landscape in western Maharashtra, India. *Oryx*, 50(1), 156-162, <https://doi.org/10.1017/S0030605314000106>
- Barnett, D.B. & Rudd, R.L.** (1983). Feral dogs of the Galápagos Islands: impact and control. *International Journal for the Study of Animal Problems*, 4(1), 44-58.
- Bonacic, C. & Muñoz, A.** (2014). El nuevo peligro para la ganadería. *Agronomía y Forestal*, 49, 16-19.
- Boron, V., Tzanopoulos, J., Gallo, J., Barragan, J., Jaimes-Rodríguez, L., Schaller, G., Payán-Garrido, E.** (2016). Jaguar densities across human-dominated landscapes in Colombia: the contribution of unprotected areas to long term conservation. *PLoS ONE*, 11(5), e0153973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153973>
- Bouvier, M. & Arthur, C.P.** (1995). Protection et indemnisation des dégâts d'ours aux troupeaux domestiques dans les Pyrénées occidentales: Fonctionnement, importance économique et rôle dans la protection de l'ours. En F. Bourliere, V. Barre, J.J. Camerra, V. Herrenschmidt, F. Moutou, C. Servheen, S. Stuart, M.C. Saint Girons (Eds.), *Proceedings on the Management and Restoration of Small and Relictual Bear Populations* (510-521). London: Museum of Natural History.
- Braczkowski, A., O'Bryan, C.J., Stringer, M., Watson, J.E.M., Possingham, H.P., Beyer, H.L.** (2018). Leopards provide public health benefits in Mumbai, India. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(3), 176-182, <https://doi.org/10.1002/fee.1776>
- Cabrera, M. & Ramírez, W.** (2014). Restauración ecológica de los páramos de Colombia: transformación y herramientas para su conservación. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Carbone, C., Pettolelli, N., Stepijens, P.A.** (2010). The bigger they come, the harder they fall: Body size and prey abundance influence predator -prey ratios. *Biology Letters*, 7, 312-315, <https://doi.org/10.1098/rsbl.2010.0996>
- Carreño B., L.A.** (2017). Lineamientos para la política de tenencia responsable de animales de compañía y de producción. Bogotá, Colombia: Ministerio de Salud.
- Carvajal C., M.J.** (2021). Restauración ecológica participativa de zonas degradadas por procesos ganaderos y agrícolas en el Páramo del Almorzadero. Trabajo de grado, Bucaramanga, Santander: Universidad Industrial de Santander.
- Congreso de Colombia - Ley 1930.** (2018). Sobre la gestión integral de los páramos en Colombia. <https://www.ambienteysociedad.org.co/ley-1930-del-27-de-julio-de-2018-por-medio-de-la-cual-se-dictan-disposiciones-para-la-gestion-integral-de-los-paramos-en-colombia/>
- DANE.** (2005). Censo General 2005. Dane. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1>

- DANE.** (2014). Censo Nacional Agropecuario 2014. Dane. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuaria/centso-nacional-agropecuaria-2014>
- Di Bitetti, M.S.** (2008). Depredadores topes y cascadas tróficas en ambientes terrestres. *Ciencia Hoy*, 18(108), 32-34.
- Dias, T.C., Stabach, J.A., Huang, Q., Labruna, M.B., Leimgruber, P., Ferraz, K.M.P.M.B., Lopes, B., Luz, H.R., Costa, F.B., Benatti, H.R., Correa L.R., Nievas, A.M., Monticelli, P.F., Piovezan, U., Szabo, M.P.J., Aguiar, D.M. Brites-Neto J., Port-Carvalho, M., Rocha, V.J.** (2020). Habitat selection in natural and human-modified landscapes by capybaras (*Hydrochoerus hydrochaeris*), an important host for *Amblyomma sculptum* ticks. *PLoS ONE*, 15(8), e0229277. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229277>
- Díaz-Pulido, A. & Payán-Garrido, E.** (2012). Manual de fototrampeo: una herramienta de investigación para la conservación de la biodiversidad en Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Fundación Panthera Colombia.
- Eisenberg, J.F.** (2000). Mammals of the Neotropics: Ecuador, Bolivia, Brasil. Chicago, USA: University of Chicago Press.
- Fonseca, G.M. & Palacios, R.** (2012). An unusual case of predation: Dog pack or cougar attack? *Journal of Forensic Sciences*, 58(1), 224-227. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2012.02281.x>
- Garavito, L.** (2011). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Ingeniare*, 19, 127-136.
- González-H., A.** (2001). Análisis de la variabilidad fenotípica de una población de *Odocoileus virginianus* (Zimmermann, 1780) ante las condiciones ambientales del Parque Nacional Natural El Tuparro, departamento Vichada, Colombia. Trabajo de grado, Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- González-Maya, J.F., Galindo-Tarazona, R., Urquijo Collazos, M.M., Zárate Vanegas, M., Parra-Romero, A.** (2017). El oso andino en el Macizo de Chingaza. Bogotá, Colombia: Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá D.C., EAB-ESP, Corporación Autónoma Regional del Guavio (CORPOGUAVIO), Parques Nacionales Naturales de Colombia, ProCAT Colombia.
- Hernández-Guzmán, A., Payán, E., Monroy-Vilchis, O.** (2011). Hábitos alimentarios del *Puma concolor* (Carnívora: Felidae) en el Parque Nacional Natural Puracé, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 59(3), 1285-1294.
- Khorozyan, I., Ghoddousi, A., Soofi, M., Waltert, M.** (2015). Big cats kill more livestock when wild prey reaches a minimum threshold. *Biological Conservation*, 192, 268-275, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.09.031>
- Knopff, K.H., Knopff, A.A., Kortello, A., Boyce, M.S.** (2010). Cougar kill rate and prey composition in a multiprey system. *The Journal of Wildlife Management* 74(7), 1435-1447. <https://doi.org/10.1111/j.1937-2817.2010.tb01270.x>
- Lazo, P.X., Mosquera, G.M., McDonnell, J.J., Crespo, P.** (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in Andean Páramo catchments. *Journal of Hydrology*, 572, 805-819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.050>
- Lopes, B., McEvoy, J.F., Gonçalves M., R., Luz, H.R., Costa, F.B., Ribeiro B., H., da Costa D., T., Rocha, V.J., do Nascimento R., V., Piovezan, U., Ferreira M., P., Nievas, A.M., Campos P., R., Gaglianone M., M.E., Brasil, J., Leimgruber, P., Labruna, M.B., Paschoalotto M.de B. F., K.M.** (2021). Human-modified landscapes alter home range and movement patterns of capybaras. *Journal of Mammalogy*, 102(1), 319-332. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyaa144>
- Malaver, C.** (2023). Estos fueron los seis mamíferos que fueron captados en los Cerros Orientales de Bogotá. <https://www.eltiempo.com/bogota/estos-fueron-los-seis-mamiferos-que-fueron-captados-en-los-cerros-orientales-de-bogota-827150>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** (2022). Delimitación participativa del Páramo del Almorzadero. Bogotá, Colombia: Dirección de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos. <http://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/delimitacion-participativa-del-paramo-de-almorzadero/>
- Mora, J.M., Polisar, J., Portillo, É., Castañeda, F.** (2019). Estado de conservación de jaguar (*Panthera onca*) en Honduras. En R.A. Medellín, A. de la Torre, H. Zarza, C. Chávez, G. Ceballos (Eds.), El jaguar en el Siglo XXI: la perspectiva continental (137-167). Ciudad de México, México: Ediciones Científicas Universitarias.

- Morales, M., Otero, J., van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Eraso, N., Franco, C., Betancourth, J.C., Olaya, E., Posada, E., Cárdenas, L. (2007). Atlas de páramos de Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Muñoz-Saba, Y., Calvo-Roa, N., Gómez-Sandoval, P.A., Casallas-Pabón, D., Lynch, J.D., Barrientos, L.S., Gómez-Sánchez, D.A. (2019). Guía de campo de los mamíferos, anfibios y reptiles de Santa María (Boyacá, Colombia). Serie Guías de Campo del Instituto de Ciencias Naturales, N° 23. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Myers, P., Espinosa, R., Parr, C.S., Jones, T., Hammond, G.S., Dewey, T.A. (2008). *Nasuella olivacea*, mountain coati. ADW: University of Michigan Museum of Zoology.
- Patton, J.L. (2015). Family Cuniculidae G.S. Miller and Gidley, 1918. En J.L. Patton, U.F.J. Pardiñas, G. D'Elia (Eds.), *Mammals of South America (726-733)*. Chicago and London: University of Chicago Press.
- Payán-Garrido, E. & Soto-Vargas, C. (2012). Los felinos de Colombia. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Panthera Colombia.
- Perdomo-Gaitán, M.A. (2021). Caracterización de excretas de medianos y grandes mamíferos de las regiones Andina, Caribe y Orinoquia. Trabajo de grado, Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Pineda-Guerrero, A. & Zárrate-Charry, D.A. (2014). Situaciones de conflicto por depredación y soluciones entre felinos y población local: una mirada diferente. *Boletín Alúna*, 5(1), 58-65.
- Ripple, W.J., Estes, J.A., Beschta, R.L., Wilmers, C.C., Ritchie, E.G., Hebblewhite, M., Berger, J., Elmhagen, B., Letnic, M., Nelson, M.P., Schmitz, O.J., Smith, D.W., Wallach, A.D., Wirsing, A.J. (2014). Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science*, 343, 1241484. <https://doi.org/10.1126/science.1241484>
- Rojas, J. (2013a). El pago por servicios ambientales como alternativa para el uso sostenible de los servicios ecosistémicos de los páramos. *Ambiente y Sostenibilidad*, 1(1), 57. <https://doi.org/10.25100/ays.v1i1.4339>
- Rojas Z, O.A. (2013b). Reubicación de plantas para el enriquecimiento con especies nativas en la restauración ecológica de áreas potrerizadas de páramo (Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia). Tesis de maestría, Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Romero, V. (2021). *Dasybus novemcinctus*. En J. Brito, M.A. Camacho, V. Romero, A.F. Vallejo (Eds.), *Mamíferos del Ecuador*. Versión 2018.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://bioweb.bio/faunaweb/mammaliaweb/FichaEspecie/Dasybus%20novemcinctus>
- Sánchez, A.M., Estévez, R., Prieto, F. (2018). Por la convivencia del hombre y el lobo: aproximación al balance de mortalidad no natural del lobo Ibérico. España: Voluntariado Nacional Censo Lobo Ibérico, Observatorio de la Sostenibilidad (OS), Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestales y del Medio Natural.
- Sánchez, F., Sánchez-Palomino, P., Cadena, A. (2004). Inventario de mamíferos en un bosque de los Andes Centrales de Colombia. *Caldasia*, 26(1), 291-309.
- Silva-Rodríguez, E.A. & Sieving, K.E. (2012). Domestic dogs shape the landscape-scale distribution of a threatened forest ungulate. *Biological Conservation*, 150, 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.03.008>
- Suryawanshi, K.R., Redpath, S.M., Bhatnagar, Y.V., Ramakrishnan, U., Chaturvedi, V., Smout, S.C., Mishra, C. (2017). Impact of wild prey availability on livestock predation by snow leopards. *Royal Society Open Science*, 4, 170026. <https://doi.org/10.1098/rsos.170026>
- Terán-Cabascango, J.J. (2014). Manejo semi-estabulado de ganado de leche en la Asociación Campo Verde de Turucuch. Trabajo de grado, Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Thorington, R.W., Thorington Jr., R.W., Koprowski, J.L., Steele, M.A. (2012). *Squirrels of the World*. Baltimore M.D., USA: Johns Hopkins University Press.
- Van Eeden, L.M., Crowther, M.S., Dickman, C.R., Macdonald, D.W., Ripple, W.J., Ritchie, E.G., Newsome, T.M. (2017). Managing conflict between large carnivores and livestock. *Conservation Biology*, 32(1), 26-34.
- Vásquez, A. & Buitrago, A. (2011). El Gran Libro de los Páramos. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Proyecto Páramo Andino.
- Zanini, F., Leiva, D., Cabeza, S., Elisondo, C., Olmedo, E., Pérez, H. (2008). Poblaciones caninas asilvestradas: impacto en la producción pecuaria de Tierra del Fuego. Argentina.

Ciencias Físicas

Artículo original

Estudio del índice de radiación ultravioleta en la zona Centro Occidente de México, su asociación con el riesgo de cáncer de piel y propuesta tecnológica para la difusión y prevención del riesgo

Study of the ultraviolet radiation index in the Central Western area of Mexico, its association with the risk of skin cancer, and a technological proposal for the dissemination of the problem and its prevention

✉ Gustavo A. López-Saldaña¹, ✉ José L. Cendejas-Valdez^{2,*}, ✉ J. Leonardo Soto-Sumano³,
✉ Ma. Elena Benítez-Ramírez²

¹ Posgrado en Tecnologías de la Información y Comunicación, Universidad Tecnológica de Morelia, Morelia, Michoacán, México

² CA TRATEC—Programa para el Desarrollo Profesional Docente-PRODEP, Posgrado en Tecnologías de la Información y Comunicación, Universidad Tecnológica de Morelia, Morelia, Michoacán, México

³ Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas-CUCEA, CA TIC—PRODEP, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México

Citación: López-Saldaña GA, Cendejas-Valdez JL, Soto-Sumano JL, *et al.* Estudio del índice de radiación ultravioleta en la zona Centro Occidente de México, su asociación con el riesgo de cáncer de piel y propuesta tecnológica para la difusión y prevención del riesgo. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):25-37, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2190>

Editor: Gabriel Tellez

***Correspondencia:**

José Luis Cendejas-Valdez;
luis.cendejas@utmorrelia.edu.mx

Recibido: 19 de noviembre de 2023

Aceptado: 20 de febrero de 2024

Publicado en línea: 22 de marzo de 2024

Resumen

En el 2012 la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasificó la radiación ultravioleta (*ultraviolet radiation*, UVR) como carcinógeno del grupo 1, ello porque existen pruebas suficientes para considerarla causa de cáncer en el ser humano. Presentamos aquí los resultados de nuestro estudio sobre la UVR en la zona Centro Occidente de México y su asociación con el riesgo de cáncer de piel, así como la propuesta de una solución tecnológica que contribuya a la difusión de este problema y ofrezca recomendaciones para su prevención. Con este objetivo, se midió y se clasificó la radiación solar ultravioleta durante un año para, posteriormente, investigar y analizar el incremento de cáncer de piel asociado a la UVR. Los resultados fueron los siguientes: a) la presencia de niveles “muy altos” de radiación ultravioleta según el índice de UVR, con un promedio anual en el 2022 de 9,0, y de 10,7 en el cuatrimestre con mayor radiación; b) la causa de uno de cada tres casos de melanoma (un tipo de cáncer de piel) en México es la exposición a la UVR; c) las fuentes secundarias evidenciaron un incremento en los casos de melanoma en México, y d) la propuesta y desarrollo de una App para la divulgación, prevención y reducción del riesgo. El trabajo se ajustó a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 3.4 y 3.d planteados en la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Palabras clave: Índice de radiación ultravioleta (IUV); Cáncer de piel; Agenda 2030; Aplicación móvil; Rayos UV.

Abstract

In 2012, the World Health Organization (WHO) classified ultraviolet radiation (UVR) as a group 1 carcinogen, which means there is sufficient evidence that it can cause cancer in humans. Here we show the results of our study on UVR in the Central Western zone of Mexico and its association with the risk of skin cancer; besides, we propose a technological solution for the diffusion of this problem with recommendations for its prevention. For this, we measured and classified solar ultraviolet radiation for a year to subsequently investigate and analyze the increase in skin cancer associated with UVR. These were our results: a) we found “very high” levels of ultraviolet radiation according to the UV index, with an annual average of 9.0, and 10.7 in the four months with the highest radiation;



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

b) one out of three cases of melanoma (a type of skin cancer) in Mexico is caused by UVR exposure; c) secondary sources showed an increase in cases of skin melanoma in Mexico, and d) a proposal and the development of an App for the dissemination, prevention, and risk reduction. Our study is aligned with the Objectives of Sustainable Development 3.4 and 3.d set by the United Nations (UN) 2030 Agenda.

Keywords: Ultraviolet radiation index (UVI); Skin cancer; 2030 Agenda; Mobile application; UV rays.

Introducción

Desde 1970 la comunidad científica obtuvo evidencias de que la capa de ozono estaba reduciéndose. **Molina & Rowland** (1974) y **Crutzen** (1974) alertaron sobre este hecho en su estudio de los efectos del CFC-11 y su impacto en la capa de ozono. Una vez que las imágenes de satélite divulgadas por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) confirmaron el hueco de ozono en la Antártida, se declaró una emergencia mundial que desembocó en la adopción de programas para detener la disminución del ozono. A pesar de ello, la UVR ha seguido en aumento, alcanzando la superficie terrestre (**Solomon**, 1999; **Dahlback**, 2002), lo que aumenta la sobreexposición y los problemas de salud asociados, con el consiguiente incremento de la incidencia de enfermedades cutáneas como el cáncer de piel (**International Agency for Research on Cancer [IARC]**, 2017). En los Estados Unidos se diagnostican más de 9.500 casos de cáncer de piel diariamente y más de dos personas mueren cada hora a causa de esta enfermedad (**Rogers et al.**, 2015; **American Cancer Society**, 2023; **Mansouri & Housewright**, 2017). En México la tasa de mortalidad general por melanoma aumentó un 78 % entre 1998 y 2016, siendo los individuos de sexo masculino del grupo de edad de 60 años y más los más afectados (**Hernández et al.**, 2019), en tanto que en Colombia se estimaron 1.805 casos de melanoma de piel y 490 muertes por esta causa en el 2020 (**IARC**, 2017).

Para facilitar la comprensión del problema, la agencia Environment Canada (EC) creó el índice de radiación ultravioleta (IUV) que ofrece información de cuán intensa y dañina es la UVR en un área. Posteriormente, en el 2012, la OMS clasificó la UVR como un carcinógeno del grupo 1 (**IARC**, 2012), confirmando su peligrosidad con base en pruebas suficientes para clasificarla como causa de cáncer.

El IUV en la superficie terrestre es un indicador que representa la capacidad de producir lesiones cutáneas en la población y ha servido como medio para hacer conciencia y advertir a las personas de la necesidad de adoptar medidas de protección cuando se exponen a la UVR. El IUV ha sido adoptado internacionalmente por la OMS, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Comisión Internacional sobre Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) y la Oficina Federal Alemana para la Protección contra la Radiación (Bundesamt für Strahlenschutz, BfS).

Presentamos aquí los resultados del estudio sobre el IUV en la zona Centro Occidente de México, así como su asociación con el riesgo de cáncer de piel y proponemos una solución tecnológica que contribuya a la difusión de este problema y de las recomendaciones para prevenirlo. Las etapas del estudio fueron las siguientes: a) determinación de los antecedentes y el objetivo de la investigación; b) obtención y extracción de la información sobre las mediciones de la UVR en la Unidad Meteorológica de la Universidad Tecnológica de Morelia (UM-UTM) durante el 2022; c) la estimación de casos de melanoma y su fracción atribuible poblacional (*population attributable fraction*, PAF); d) desarrollo de la aplicación móvil con datos de la UM-UTM; f) resultados, y g) conclusiones.

Antecedentes

La energía que sostiene y da vida a la Tierra proviene del Sol en forma de radiación electromagnética. Esta es una forma de energía producida por la oscilación o la aceleración de la carga eléctrica emitida por todos los objetos cuya temperatura es superior al cero

absoluto (Hartmann, 2015), la cual viaja en el vacío a la velocidad de la luz. La radiación de interés está dentro del rango de longitud de onda que va de 0,1 μm a 100 μm (Robinson & Henderson-Sellers, 2014). Dentro de esta región, el ojo humano responde a una muy pequeña porción, conocida como luz visible (Figura 1), que está dentro del rango de 400 a 800 nm y corresponde al 99 % de la energía emitida por el Sol, 9 % de la cual es ultravioleta, 49 % visible y 42 % infrarroja (Peixoto & Oort, 1992). La región UV abarca el intervalo de longitudes de onda de 100 a 400 nm y se divide en tres categorías: 1) la UV-C, de 100 a 280 nm; 2) la UV-B, de 280 a 315 nm, y 3) la UV-A, de 315 a 400 nm (Figura 1). Cuanto más corta sea la longitud de onda de la UVR, más dañina es desde el punto de vista biológico (UV-C) (Benavides, 2010). Como se observa en la figura 1 (color violeta), la radiación ultravioleta se encuentra localizada en los límites definidos como radiación ionizante y no ionizante; afortunadamente, gracias a la capa de ozono contamos con un filtro importante que reduce la llegada directa de los rayos UV a la Tierra. Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, el componente ultravioleta contiene aproximadamente un 95 % de UV-A y un 5 % de UV-B; los rayos UV-C se eliminan de la radiación extraterrestre debido al ozono estratosférico (IARC, 2013). El ozono es la combinación de tres átomos de oxígeno y se convierte en un gas que se produce naturalmente en la estratósfera (Chadyšienė *et al.*, 2005).

La exposición a la luz solar, específicamente a la UVR, tiene efectos positivos y negativos para la salud (Lucas *et al.*, 2014). La exposición solar excesiva ha sido motivo de mayor preocupación, debido a sus efectos adversos en los seres humanos, los ecosistemas terrestres y acuáticos, los materiales y la calidad del aire (Delic *et al.*, 2017). La intensidad de los rayos UV de la luz solar depende de diversos factores ambientales (Tabla 1).

Índice UV (IUV)

En 1992 la EC creó el programa de medición del IUV, cuyo objetivo era brindar información sobre la radiación generada por los rayos UV en los rangos de 250 a 400 nm utilizando un indicador fácil de entender que cuantificara los niveles de UVR esperados para el día siguiente (He *et al.*, 2013). El índice se basa en el grado en que la radiación solar interacciona con la piel para producir quemaduras o eritemas; se define y se sustituye utilizando la ecuación 1 (Organización Internacional de Normalización [ISO], 1999).

$$I_{UV} = k_{er} \cdot \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda \quad (1),$$

donde E_{λ} es la irradiancia espectral solar (medida del espectro solar transmitido a través de la atmósfera), expresada en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$, $s_{er}(\lambda)$, el espectro de acción de referencia para el eritema y k_{er} , una constante igual a $40 \text{m}^2/\text{W}$.

El índice es adimensional y se expresa como un valor superior a cero; cuánto más alto, mayor es la probabilidad de lesiones cutáneas y oculares y menor el tiempo que tardan en producirse las lesiones (WHO *et al.*, 2002) (Tabla 2). Para medir la radiación

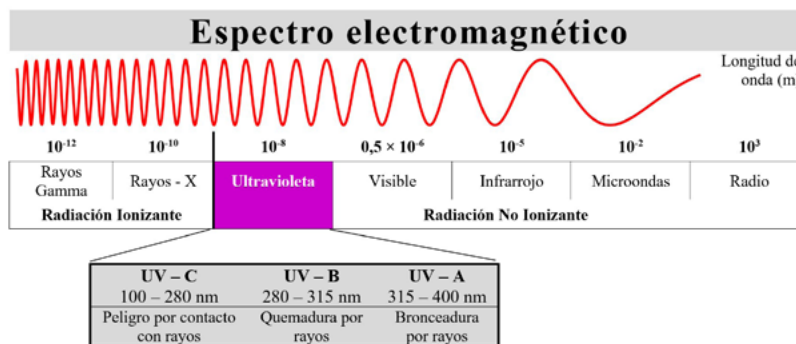


Figura 1. Diagrama del espectro electromagnético que muestra los tipos y longitudes de onda

Tabla 1. Factores ambientales que inciden en los rayos UV

Posición del sol: cuanto más alta sea la posición del sol, mayor será la UVR. Por otra parte, la incidencia de la luz solar varía con las estaciones, así que la intensidad de los rayos UV depende de la hora del día y del mes del año.
Latitud: a mayor proximidad con el ecuador terrestre, mayor radiación.
Altitud: al aumentar la altitud, la atmósfera se vuelve más ligera y absorbe menos rayos UV. La intensidad de la radiación aumenta entre 10 y 12 % por cada mil metros de altitud.
Nubosidad: aunque la intensidad de la radiación es máxima cuando el cielo está despejado, puede aumentar en días nublados debido a la reflexión de las partículas finas de agua.
Capa de ozono: absorbe parte de la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra. La concentración de ozono varía a lo largo del año e incluso en el mismo día.
Reflexión del suelo: las diferentes superficies reflejan y dispersan la radiación ultravioleta de distinta manera. Por ejemplo, la nieve reciente puede reflejar hasta un 80 % mientras que la arena seca de una playa refleja hasta un 15 % y la espuma del agua de mar, alrededor de 25 %.

Nota. Adaptado de Índice UV Solar mundial: Guía práctica (World Health Organization [WHO] *et al.* (2002)

Tabla 2. Escala del IUV

Baja		Moderada			Alta		Muy Alta			Extremadamente alta
No necesita protección		Necesita protección					Necesita protección extra			
Puede permanecer en el exterior sin riesgo		• Manténgase a la sombra durante las horas centrales del día • Póngase camisa, crema de protección solar y sombrero					• Evite salir durante las horas centrales del día • Busque la sombra • Son imprescindibles camisa, crema de protección solar y sombrero			

Nota. Adaptado de Índice UV Solar mundial: Guía práctica (World Health Organization [WHO] *et al.*, 2002)

solar y el ozono en la región UV del espectro, la EC recomienda el espectrofotómetro de ozono Brewer de tercera generación (Mark III), la cual es significativamente superior a las otras generaciones (Cracknell & Varotsos, 2012). El IUV ahora está en uso operativo en más de 100 países en todo el mundo y ha sido establecido como el programa estándar de concientización pública sobre la UVR por la OMM y la OMS (WHO *et al.*, 2002). Según la Secretaría de Salud, en México la exposición a los rayos UV continúa siendo un problema y se espera que el cáncer de piel cause aproximadamente 1,300 casos al año (Secretaría de Salud, 2015). El IUV se clasifica en cinco categorías de exposición, las cuales son: 1) baja; 2) moderada; 3) alta; 4) muy alta; 5) extremadamente alta. La **Tabla 2** representa la relación entre el IUV, el riesgo de daño y la recomendación de protección contra el sol sugerida, (WHO *et al.*, 2002).

Enfermedades de la piel ocasionadas por la UVR

Las personas se exponen a los rayos del sol en los momentos de recreación y deporte, cuando se broncean o en el trabajo, entre otros. Cualquiera de estas exposiciones lleva consigo un menor o mayor grado de riesgo de contraer alguna enfermedad en la piel. Los efectos biológicos de la exposición solar son diversos y dependen de su longitud de onda, penetración en la piel y tiempo de exposición, por lo que pueden aparecer años

más tarde. A corto plazo se destacan el eritema, la quemadura solar, la fotodermatosis y la inmunosupresión (**Duro et al.**, 2003), y a largo plazo, la fotocarcinogénesis y el fotoenvejecimiento. Los efectos de estas enfermedades se presentan en la **tabla 3**.

Según las estadísticas de la International Agency for Research on Cancer (IARC), el cáncer de piel está aumentando de una forma preocupante en todo el mundo, con más de 230.000 nuevos casos y 55.000 muertes estimadas en el 2012 a nivel mundial (IARC, 2017); el 87% de todos los nuevos casos ocurren en Europa, América del Norte y Oceanía. En Estados Unidos las tasas anuales de incidencia de melanoma de piel aumentaron en un 2 % entre el 2006 y el 2015 en hombres y mujeres (**Islami et al.**, 2020).

Como lo señalan **Duro et al.** (2003), aunque se desconoce el mecanismo exacto que acciona la actividad tumorigénica, se sabe que las exposiciones solares acumuladas a lo largo de la vida, así como las cortas pero intensas, incrementan el riesgo de cáncer cutáneo, particularmente si la exposición es suficiente para causar una quemadura solar y, sobre todo, si ocurre en la infancia.

Según **Arnold et al.** (2018), las personas tienen incorporada en su piel una protección natural contra la luz UV que les permite evitar los trastornos cutáneos que causa. Los principales mecanismos de protección naturales o endógenos actúan de dos formas: absorbiendo la radiación o desviándola. La melanina constituye el factor de protección endógeno más importante de la piel. Actúa absorbiendo la radiación con longitudes de onda entre los 350 y los 1.200 nm; la exposición solar estimula su producción y ello se traduce en bronceado. No todas las personas toleran los efectos dañinos de los rayos UV. Ante una misma exposición solar, la respuesta de la piel muestra una enorme variabilidad en la población.

Tabla 3. Enfermedades ocasionadas por los rayos UV

Enfermedad	Efectos
El eritema solar	Es una respuesta inflamatoria de la piel que aparece a las pocas horas de la exposición solar y alcanza su máxima intensidad entre 12 y 24 horas después. En casos extremos de exposición puede convertirse en una quemadura solar de primer o segundo grado superficial, con formación de ampollas. Este tipo de reacción se utiliza como sistema de medida del efecto biológico de los rayos UV.
La inmunosupresión	Es inducida por los rayos UV-B y en menor medida por los UV-A como consecuencia de la alteración morfológica y funcional de las células de Langerhans epidérmicas.
La fotodermatosis	Es un término que engloba un conjunto de enfermedades cutáneas producidas o desencadenadas por la exposición solar, fundamentalmente los UV-A.
El fotoenvejecimiento o envejecimiento cutáneo extrínseco	Se caracteriza por una piel áspera, seca y apergaminada, sin elasticidad, con arrugas profundas y gruesas, telangiectasias, lentigos y alteraciones de la pigmentación. Aparece como consecuencia de exposiciones repetidas y prolongadas al sol, sobre todo radiación UV-A. Las zonas expuestas son las más afectadas: cara, cuello, escote, nuca y dorso de manos. Su intensidad depende del tipo de piel y la dosis total de radiación acumulada a lo largo de la vida.
La fotocarcinogénesis	Es la inducción de lesiones precancerosas y cáncer de piel por efecto de la exposición al sol. Es conocida a partir de datos epidemiológicos procedentes de estudios de casos, controles y estudios de correlación geográfica.

Nota. Adaptado de Skin cancer, including related pathways and therapy and the role of luteolin derivatives as potential therapeutics (**Juszczak et al.**, 2022)

Cáncer de piel atribuible a la UVR

En el 2012 la OMS, a través de la IARC, clasificó la UVR como un carcinógeno del grupo 1. Otros carcinógenos conocidos del grupo 1 son el plutonio, el amianto y la radiación ionizante (IARC, 2012). La exposición a la UVR es el factor de riesgo más importante para los cánceres de piel (melanoma y no melanoma); se sabe que induce mutaciones carcinogénicas y elimina elementos del sistema inmunológico, por lo que se ha convertido en el principal factor causante de cáncer de piel (Arnold *et al.*, 2018). Además, los cambios climáticos actuales y la reducción de la capa de ozono desde 1970 debida a la fotodisociación de los clorofluorometanos en la estratósfera (Molina & Rowland (1974), conducen a una filtración disminuida de la radiación UV-A y UV-B y un aumento de la UVR que alcanza el nivel del mar. Sin embargo, gracias a las medidas adoptadas en el marco del Protocolo de Montreal, las sustancias que agotan la capa de ozono (SAO) han disminuido, por lo que se está progresando en la recuperación de la capa de ozono estratosférico. Se espera que la columna total de ozono regrese a los valores de 1980 para el 2066 en la Antártida (World Meteorological Organization [WMO], 2022).

Fracción atribuible poblacional (PAF) de la UVR

La PAF es el porcentaje de casos de una enfermedad que puede evitarse en la población si se suprime la exposición al factor de riesgo (Porta, 2008). Esta se expresa mediante la Ecuación 2:

$$PAF = \frac{\text{Tasa de incidencia en la población total} - \text{Tasa de incidencia no expuesta}}{\text{Tasa de incidencia en la población total}} \quad (2).$$

En lo que a la UVR concierne, el PAF corresponde a una medida de impacto que estima la carga de enfermedad atribuible en la población asumiendo la causalidad de la UVR en el cáncer de piel. Se puede asumir la causalidad debido a que la categoría de agentes del grupo 1 de la IARC se aplica cuando existen pruebas suficientes de carcinogenicidad en humanos. En la **figura 2** se muestra a manera de guía la clasificación referente a los carcinógenos.

La carga de enfermedad permite estimar las pérdidas en salud a través de la comprobación de todas las causas de muerte, y aporta un indicador compuesto que integra los daños provocados por la muerte prematura y los daños por vivir enfermo y discapacitado con diferentes niveles de gravedad de una o varias enfermedades a la vez (Gómez, 2021). La cuantificación de la carga de enfermedad del cáncer atribuible a la exposición a la UVR, es importante para la planificación del control del cáncer y clarifica el impacto de las acciones destinadas a reducir la exposición. Hasta la fecha, pocos estudios han estimado el PAF para la UVR en México.



Figura 2. Clasificación de los carcinógenos según la IARC

Un estudio del Reino Unido informó que el 86 % de todos los casos de melanoma, equivalente al 3,5 % de todos los nuevos casos de cáncer, eran atribuibles a la exposición a la UVR (**Parkin et al., 2011**), en tanto que en dos estudios australianos, más del 95 % de los casos de melanoma se debía a los altos niveles ambientales de exposición a la UVR (**Olsen et al., 2015**). Un reciente análisis realizado en Cali, Colombia, concluyó que el 62 % de todos los melanomas en hombres y el 19 % en las mujeres eran atribuibles a la exposición a la UVR (**de Vries et al., 2017**). En la **figura 3** muestra una gráfica los casos de melanoma atribuibles a la UVR en el mundo (**Arnold et al., 2018**).

Según **Arnold et al. (2018)**, las poblaciones de piel oscura y pigmentadas se caracterizan por tener tasas de incidencia de melanoma muy bajas, lo que constituye una buena referencia para cuantificar el exceso de carga de melanoma debido a la UVR en otras poblaciones. Estos hallazgos subrayan la necesidad de una acción de salud pública, una mayor conciencia sobre el melanoma y sus factores de riesgo, así como la necesidad de promover cambios en el comportamiento que disminuyan la exposición al sol en todas las edades.

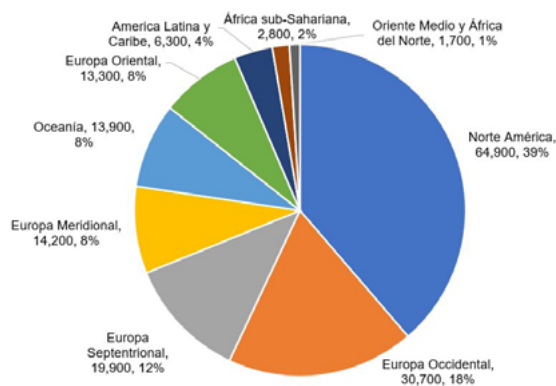


Figura 3. Casos de melanoma atribuibles a la radiación ultravioleta en el 2012 por región del mundo

Materiales y métodos

Se definieron las bases y el alcance del estudio, el cual se fundamentó en diferentes enfoques: experimental, exploratorio, descriptivo y correlacional (**Khotari, 2004**). Se definieron, asimismo, un conjunto de etapas (**Figura 4**).

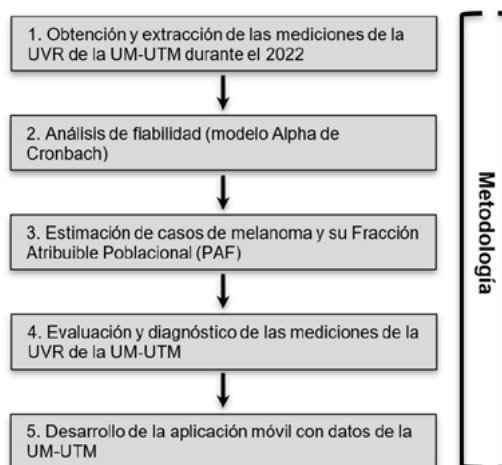


Figura 4. Modelo metodológico del estudio

Obtención y extracción de las mediciones de la UVR hechas en la UM-UTM durante el 2022

La estación meteorológica de la UM-UTM cuenta con un sensor de UVR de fotodiodo de silicio sellado herméticamente (tecnología similar a la utilizada en los paneles solares), que mide la irradiancia UV solar global (la suma de los componentes de la UVR solar transmitida directamente y la dispersión en la atmósfera). Las lecturas obtenidas se almacenan localmente así: IUUV, dosis de UV y UV máxima. Por medio de un registrador de datos (*datalogger*) de la misma estación, la información se estructura en una base de datos permanente para poder visualizarla en tiempo real, publicarla en Internet y exportarla.

Análisis de fiabilidad

Una vez determinado el problema generado por los rayos UV y el daño en el ser humano, se midió esta variable meteorológica en la UM-UTM y las lecturas del IUUV se almacenaron como conjunto de datos (*dataset*) para su posterior análisis. Ante la ausencia de un patrón de referencia para la validación de los datos correspondientes al 2022 recolectados en la UM-UTM, se hizo un análisis de fiabilidad con el modelo alfa de Cronbach (**Yuan *et al.*, 2003**) de las lecturas del sensor UV correspondientes a la IUUV, la dosis de UV, y la UV máxima a partir de la Ecuación 3:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left[1 - \frac{\sum S_i^2}{S_T^2} \right] \quad (3),$$

donde K corresponde al número de ítems en la escala, S_i^2 a la varianza del ítem i y S_T^2 a la varianza de las puntuaciones observadas de los individuos.

En el procesamiento de los datos, se tomaron como entrada 15.113 muestras, de las cuales se excluyeron 105 casos de valores ausentes, equivalentes al 0,7 % del total. El resultado de este análisis fue una puntuación alfa de 0,861, considerada como una fiabilidad buena (**Yuan *et al.*, 2003**), por lo que la medición obtenida del sensor UV de la UM-UTM se consideró consistente y precisa.

Estimación de casos de melanoma y su PAF

En México la información disponible acerca de la incidencia de melanoma es limitada y se encuentra fragmentada, lo que hace complejo su análisis e interpretación. A pesar de ello, se hizo un análisis a partir de las fuentes, métodos y resultados de la investigación de **Arnold *et al.* (2018)** para cuantificar la PAF (porcentaje de casos de una enfermedad que puede evitarse en la población) en México. Al no existir población que esté exenta de la exposición a la luz solar, no es posible aplicar el enfoque tradicional para cuantificarla, ya que el cálculo de la dosis personal acumulada estaría sujeto a errores, en cambio se puede calcular la diferencia entre la incidencia de melanoma en poblaciones de composición étnica similar “expuestas” y “no expuestas” (**Olsen *et al.*, 2015**). Según esto, la PAF para la UVR se calculó por medio de la Ecuación 4:

$$PAF = \frac{I_p - I_u}{I_p} \quad (4),$$

donde I_p corresponde a la incidencia de melanoma en el 2012 en las poblaciones de estudio y I_u a la incidencia en la población de referencia.

Para obtener los valores de la población de referencia I_u , **Parkin *et al.* (2011)** ajustaron un modelo de cohorte retrospectivo con base en los datos de la región sur del Támesis en el Reino Unido, ya que esta es la serie de datos de incidencia de melanoma más extensa y de mayor calidad desde 1960. A partir de este estudio se determinaron las tasas de incidencia estimadas en la cohorte nacida en 1903 como población de referencia.

El número de casos nuevos en el 2012 en México se estimó a partir de la tasa de mortalidad nacional reportada a la OMS, la cual se sometió al modelo de mortalidad-incidencia de los países vecinos que sí cuentan con información oficial sobre el melanoma (modelo de la región Centroamérica). De un total de 611 casos, 233 (38%) se presentaron en el rango de edad de 30-49 años, 243 (40%) en el rango de 50-69, y 133 (22%) en mayores de 70.

Para calcular la PAF es necesario determinar la tasa de incidencia I_p de forma indirecta, según lo planteado por **Boyle & Parking** (1991), expresada como la diferencia proporcional entre la incidencia de casos nuevos estimados y el número esperado de casos. Posteriormente, se utilizaron las tasas de incidencia de la población de referencia, I_u (cohorte del sur del Támesis de 1903), para calcular la PAF de la UVR mediante la Ecuación 4. La estimación de la varianza de la PAF se obtuvo mediante el método delta para calcular intervalos de confianza del 95 %. El resultado para la población mexicana en el 2012 fue de 32,30 %.

La proyección de casos al 2020 se obtuvo de las tendencias reportadas por el Observatorio Global del Cáncer (GLOBOCAN) que, a su vez, se basan en los datos nacionales reportados a la OMS.

El melanoma ocupa la posición 21, con un número de casos de 2.051 (1%) de los 195.499 casos nuevos de los diferentes tipos de cáncer en ese año y repite esa posición para las muertes ocasionadas, 773 (0,86%) de las 90.222 por todos los casos de cáncer (IARC, 2017).

Desarrollo de la aplicación móvil con datos de la UM-UTM

La propuesta digital incluye el desarrollo de una aplicación móvil (App) que presenta en tiempo real los valores del IUV obtenidos por la UM-UTM; estos son enviados a los usuarios que hayan instalado la App en su dispositivo móvil. La comunicación y obtención de dichos datos involucran tres procesos claves que se describen a continuación.

Preparación del servidor de datos meteorológicos. El conjunto de datos generados a partir de las mediciones de la UM-UTM debió almacenarse en un servidor que, en la presente propuesta, fue la plataforma Weather Underground, la cual permite el almacenamiento gratuito de los datos de estaciones meteorológicas reales, con el objetivo de brindar pronósticos meteorológicos de todo el mundo. La UM-UTM fue dada de alta satisfactoriamente y con ello se obtuvieron las claves de acceso para enviar de forma continua las lecturas realizadas hacia el servidor.

Administración de la carga de datos. A través del sistema de control web de la UM-UTM (WEATHERLINK), se vinculó esta al servidor de datos Weather Underground con las claves de acceso provistas, estableciendo el envío de datos cada quince minutos.

Construcción de la interfaz de programación de aplicaciones (API). Se emplearon los parámetros de conexión provistos por el servidor de Weather Underground para construir la API de recuperación de datos con la cual se obtienen las lecturas de la UM – UTM. En la **figura 5** se ilustra el proceso que se sigue para la comunicación del sistema de *software* y los contenedores que lo componen (aplicación, almacenamiento de datos y microservicios).

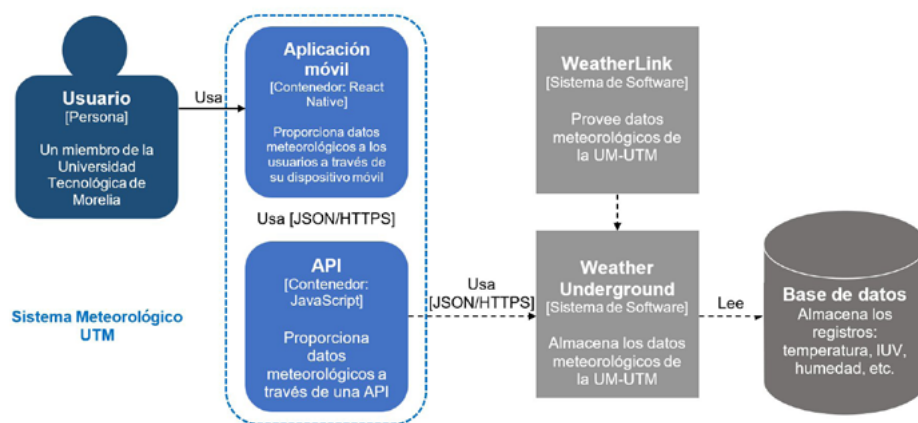


Figura 5. Proceso de comunicación del sistema de *software* y los contenedores

Resultados y discusión

Una vez que se concluyó que las muestras del *dataset* de la UM-UTM eran fiables, se evaluó el elemento “UV máxima”, correspondiente al registro máximo del IUV diario. Los resultados del análisis del *dataset* de la UM-UTM permitieron conocer el comportamiento del IUV en el 2022 (**Figura 6**), siendo el cuatrimestre junio-septiembre el que alcanzó mayores niveles; según las categorías de exposición, el máximo diario permaneció en niveles muy altos y extremadamente altos. Para facilitar la comprensión de lo anotado, se agregaron recuadros con los colores correspondientes a las categorías de exposición (**Tabla 2**). Asimismo, con los datos máximos diarios del IUV, se calculó el promedio anual y se obtuvo un valor de 9,0, en tanto que el cuatrimestre con mayor radiación registró 10,7. Cabe mencionar que no es posible presentar información más extensa sobre los registros de la UVR en la región porque el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) no ofrece los datos sobre la variable en cuestión, y fuera de este organismo público, pocas estaciones con acceso abierto cuentan con el sensor de UVR, o el conjunto de datos es poco extenso en comparación con el que está recopilando la UM-UTM.

La aplicación móvil de la UM - UTM recupera los siguientes datos de la API: fecha de lectura, temperatura, sensación térmica, radiación solar, y humedad e IUV. En la **figura 7** se aprecian las interfaces de la aplicación móvil de la UM – UTM, así como la recomendación que se propone al usuario con el objetivo de reducir su riesgo ante la exposición a la radiación solar para que pueda disfrutar del aire libre de manera segura, recordando siempre que la exposición al sol sin protección aumenta el riesgo de cáncer de piel a lo largo de la vida.

Los efectos en la salud de los rayos UV pueden prevenirse en gran medida con prácticas de protección solar tempranas y constantes, principalmente en la población de personas con piel clara, las cuales están estrechamente vinculadas a las costumbres personales, como la exposición al sol y a su componente ultravioleta (UV), así como a la errónea percepción social de que el bronceado es deseable y saludable. Debido a la falta

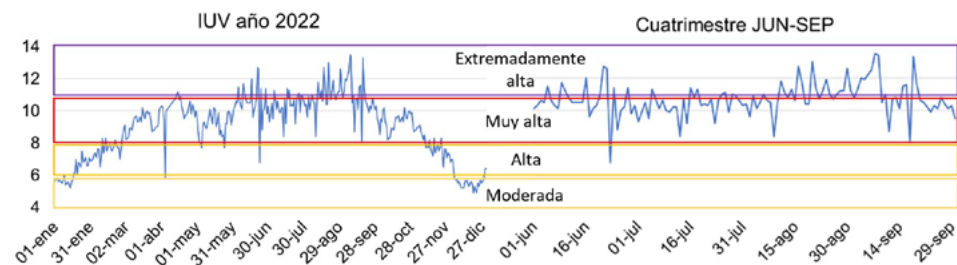


Figura 6. Resultados de la medición del IUV obtenida por la UM-UTM



Figura 7. Aplicación móvil de interpretación de datos de la UM - UTM. a) Pantalla de inicio; b) ejemplo de IUV de nivel moderado

de acceso a la información de los pacientes con melanoma, atribuida principalmente a la integración de la información nacional en una base de datos común, se recurrió a fuentes indirectas (IARC, 2017; Arnold *et al.*, 2018). Sin embargo, por la metodología empleada, los datos presentados se encuentran en sintonía con los resultados de los estudios de mayor alcance en este campo (Parkin *et al.*, 2011; Olsen *et al.*, 2015; de Vries *et al.*, 2017); aun así, consideramos que esto es una debilidad en este primer estudio.

Conclusiones

Las mediciones obtenidas por la UM-UTM muestran una alta radiación durante gran parte del año, con efectos negativos e irreversibles para la salud de la población si no se toman acciones preventivas. La UVR solar es uno de los componentes ambientales con mayor incidencia en las lesiones de piel, pudiendo ocasionar enfermedades como el melanoma. Los resultados de nuestro estudio permiten concluir que en México uno de cada tres casos de melanoma es causado por la UVR. Nuestra propuesta es ofrecer a la población la posibilidad de reducir el riesgo de contraer dicha enfermedad mediante la difusión del tema en la App desarrollada con el nombre de “Sistema Meteorológico UTM”, la cual presenta sugerencias para que el usuario puede protegerse y contrarrestar los efectos y daños que puede causar en la piel la exposición al sol.

Es de vital importancia poner mayor atención a este problema y generar programas educativos en las escuelas que den a conocer los efectos nocivos de la UVR e incentiven cambios en el estilo de vida de la sociedad actual. Los jóvenes deben entender que las enfermedades de la piel pueden causar daños graves irreversibles, pero que es posible cuidar su salud siguiendo las recomendaciones propuestas por la OMS. Los resultados del presente estudio recomiendan que se continúe la investigación de los efectos de la UVR solar a nivel nacional utilizando el Registro Nacional de Cáncer aprobado por la Cámara de Diputados en el 2018. Asimismo, los resultados contribuyen al logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 3 que busca la reducción de la mortalidad prematura mediante la prevención y el fortalecimiento de la capacidad del país en materia de alertas tempranas y de reducción y gestión de riesgos en salud.

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica de Morelia (UTM), por el tiempo y apoyo brindado, así como a los integrantes del Cuerpo Académico de Transferencia Tecnológica para la Construcción de Software (TRATEC) – PRODEP de la UTM por sus comentarios y apoyo.

A la Universidad de Guadalajara (UdeG), por su ayuda en la aplicación de la tecnología y en el soporte del *software* utilizado para el manejo de los datos, así como para la publicación de este documento. Un agradecimiento especial a Liliana Gómez Pizano, investigadora de la Facultad de Enfermería de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) por su aporte a esta investigación.

Contribución de los autores

G L-S, J C-V y L S-S diseñaron el estudio y redactaron el manuscrito; G L-S y J C-V recolectaron e interpretaron los datos; E B-R desarrolló la propuesta tecnológica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- American Cancer Society. (2023). *Cancer Facts & Figures 2023*. <https://www.cancer.org/content/dam/cancer-org/research/cancer-facts-and-statistics/annual-cancer-facts-and-figures/2023/2023-cancer-facts-and-figures.pdf>
- Arnold, M., de Vries, E., Whiteman, D. C., Jemal, A., Bray, F., Parkin, D. M., Soerjomataram, I. (2018). Global burden of cutaneous melanoma attributable to ultraviolet radiation in 2012. *International Journal of Cancer*, 143 (6), 1305-1314. <https://doi.org/10.1002/ijc.31527>

- Aroste, V.** (2017). *Clasificación de los carcinógenos (IARC)* [Imagen]. Material Educativo. <https://fullseguridad.net/2017/06/02/listado-agentes-cancerigenos-segun-iarc/>
- Benavides, H., Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.** (2010). *Información técnica sobre la Radiación Ultravioleta, el Índice UV y su pronóstico* (IDEAM–METEO/001-2010). Bogotá, D.C.: IDEAM. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022454/NotatecnicaUVPaginaWEBfinal.pdf>
- Boyle, P. & Parkin, D. M.** (1991). Cancer registration: principles and methods. Statistical methods for registries. *IARC Scientific Publications*, (95), 126-158. https://publications.iarc.fr/_publications/media/download/3523/ee33be978ff8031c5613f293298ae01d8347bb33.pdf
- Chadyšienė, R., Girždienė, R., Girždys, A.** (2005). Ultraviolet radiation and ground-level ozone variation in Lithuania. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 13(1), 31-36. <https://doi.org/10.1080/16486897.2005.9636843>
- Cracknell, A. P. & Varotsos, C.** (2012). *Remote sensing and atmospheric ozone* (p. 35). Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10334-6>
- Crutzen, P. J.** (1974). Estimates of possible future ozone reductions from continued use of fluorochloro-methanes (CF₂CL₂, CFCL₃). *Geophysical Research Letters*, 1(5), 205-208. <https://doi.org/10.1029/gl001i005p00205>
- Dahlback, A.** (2002). Recent changes in surface ultraviolet solar radiation and stratospheric ozone at a high Arctic site. *UV Radiation and Arctic Ecosystems*. Springer https://doi.org/10.1007/978-3-642-56075-0_1
- de Vries, E., Amador, J. R., Rincón, C., Uribe, C., Parkin, D. M.** (2017). Cutaneous melanoma attributable to solar radiation in Cali, Colombia. *International Journal of Cancer*, 140 (9), 2070-2074. <https://doi.org/10.1002/ijc.30638>
- Delic, N. C., Lyons, J. G., Di Girolamo, N., Halliday, G. M.** (2017). Damaging Effects of Ultraviolet Radiation on the Cornea. *Photochemistry and photobiology*, 93(4), 920-929. <https://doi.org/10.1111/php.12686>
- Duro, E., Campillos, M. T., Causín, S.** (2003). El sol y los filtros solares. *Medifam*, 13(3). <https://doi.org/10.4321/s1131-57682003000300005>
- Gómez, H.** (2021). Carga de la enfermedad. J. Rivera, T. Barrientos y C. Oropeza (Eds.). *Síntesis sobre políticas de salud. Propuestas basadas en evidencia* (203-209). Instituto Nacional de Salud Pública. https://www.insp.mx/resources/images/stories/2022/docs/220118_Sintesis_sobre_politicas_de_salud.pdf
- Hartmann, D. L.** (2015). *Global Physical Climatology* (2.ª Ed., pp. 49-94). Elsevier Science. ISBN: 9780123285317.
- He, H., Fioletov, V., Tarasick, D. W., Mathews, T. W., Long, C. S.** (2013). Validation of Environment Canada and NOAA UV Index forecasts with Brewer measurements from Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(6), 1477-1489. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-12-0286.1>
- Hernández, D. A., Aldaco, F., Cervantes, G., Erazo, A. A., Pérez, P., Torrecillas, L., Díaz, G.** (2019). La mortalidad por melanoma en México aumenta. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 23 (3), 123-129.
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans.** (2013). *Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields*. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 102(Pt 2), 1-460. https://publications.iarc.fr/_publications/media/download/3143/6464cac7e8eca3fa20f11d4d134613e4870158c5.pdf
- International Agency for Research on Cancer.** (2012). *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 100D*. IARC. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304362/>
- International Agency for Research on Cancer.** (2017). *GLOBOCAN 2012: Estimated cancer incidence, mortality and prevalence Worldwide in 2012 v1.0*. IARC; 2013. <https://publications.iarc.fr/Databases/Iarc-Cancerbases/GLOBOCAN-2012-Estimated-Cancer-Incidence-Mortality-And-Prevalence-Worldwide-In-2012-V1.0-2012>
- Islami, F., Sauer, A. G., Miller, K. D., Fedewa, S. A., Minihan, A. K., Geller, A. C., Lichtenfeld, J. L., Jemal, A.** (2020). Cutaneous melanomas attributable to ultraviolet radiation exposure by state. *International Journal of Cancer*, 147(5), 1385-1390. <https://doi.org/10.1002/ijc.32921>
- Juszczak, A. M., Wölflle, U., Končić, M. Z., Tomczyk, M.** (2022). Skin cancer, including related pathways and therapy and the role of luteolin derivatives as potential therapeutics. *Medicinal Research Reviews*, 42(4), 1423-1462. <https://doi.org/10.1002/med.21880>

- Khotari, C. R.** (2004). *Research Methodology: Methods and Techniques* (2.^a ed., pp. 2-4). New Age International. Ltd.
- Lucas, R., Norval, M., Neale, R. E., Young, A. R., De Gruijl, F. R., Takizawa, Y., Van Der Leun, J. C.** (2014). The consequences for human health of stratospheric ozone depletion in association with other environmental factors. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 14 (1), 53-87. <https://doi.org/10.1039/c4pp90033b>
- Mansouri, B., Housewright, C. D.** (2017). The Treatment of Actinic Keratoses—The rule rather than the exception. *JAMA Dermatology*, 153(11), 1200. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2017.3395>
- Molina, M. J. & Rowland, F. S.** (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249(5460), 810-812. <https://doi.org/10.1038/249810a0>
- Olsen, C. M., Wilson, L. F., Green, A. C., Bain, C., Fritschi, L., Neale, R. E., Whiteman, D. C.** (2015). Cancers in Australia attributable to exposure to solar ultraviolet radiation and prevented by regular sunscreen use. *Australian and New Zealand journal of public health*, 39 (5), 471-476. <https://doi.org/10.1111/1753-6405.12470>
- Organización Internacional de Normalización.** (1999). *Erythema reference action spectrum and standard erythema dose* (ISO 17166:1999). <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:17166:ed-1:v2:en>
- Parkin, D. M., Mesher, D., Sasieni, P.** (2011). 13. Cancers attributable to solar (ultraviolet) radiation exposure in the UK in 2010. *British Journal of Cancer*, 105(S2), S66-S69. <https://doi.org/10.1038/bjc.2011.486>
- Peixoto, J. & Oort, A.** (1992). *Physics of climate*. American Institute of Physics. <https://link.springer.com/book/9780883187128>
- Porta, M.** (2008). A Dictionary of Epidemiology. *Revista Española De Salud Pública*, 82(4). <https://doi.org/10.1590/s1135-57272008000400008>
- Robinson, P. J. & Henderson-Sellers, A.** (2014). *Contemporary climatology* (2.^a ed., p.18). Routledge eBooks. <https://doi.org/10.4324/9781315842660>
- Rogers, H. W., Weinstock, M. A., Feldman, S. R., Coldiron, B. M.** (2015). Incidence Estimate of Nonmelanoma Skin Cancer (Keratinocyte Carcinomas) in the U.S. Population, 2012. *JAMA dermatology*, 151(10), 1081-1086. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2015.1187>
- Secretaría de Salud.** (2015). *Cáncer de piel duplica su incidencia cada 10 años*. gob.mx. <https://www.gob.mx/salud/prensa/cancer-de-piel-duplica-su-incidencia-cada-10-anos>
- Solomon, S.** (1999). Stratospheric Ozone Depletion: A review of Concepts and history. *Reviews of Geophysics*, 37(3), 275-316. <https://doi.org/10.1029/1999rg900008>
- World Health Organization, United Nations Environment Programme & International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.** (2002). Índice UV Solar mundial: Guía práctica. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42633>
- World Health Organization.** (2020). *Cancer Mexico 2020 country profile*. <https://www.who.int/publications/m/item/cancer-mex-2020>
- World Meteorological Organization.** (2022). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022* (Número de informe 278). <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/downloads/executivesummary.pdf>
- Yuan, K., Guarnaccia, C. A., Hayslip, B.** (2003). A study of the distribution of sample coefficient Alpha with the Hopkins symptom checklist: Bootstrap versus Asymptotics. *Educational and Psychological Measurement*, 63(1), 5-23. <https://doi.org/10.1177/0013164402239314>

Artículo original

Cuatro nuevas especies de *Quararibea* “grupo grandifolia” (Malvaceae) de Colombia y Ecuador

Four new species of *Quararibea* “grandifolia group” (Malvaceae) from Colombia and Ecuador

✉ José Luis Fernández-Alonso

Real Jardín Botánico RJB-CSIC, Departamento de Biodiversidad y Conservación, Madrid, España

Resumen

Como avance de la próxima revisión de un grupo de especies del género *Quararibea* (Malvaceae), el llamado “grupo grandifolia”, integrado por al menos 13 especies de árboles de Mesoamérica y del centro y norte de Suramérica, se describen en este trabajo cuatro especies nuevas. Dos son de Colombia, una de ellas propia de los bosques pluviales del Pacífico en el Chocó (*Quararibea recondita*) y la otra de los bosques muy húmedos premontanos del sur de Antioquia, en las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca (*Q. citarensis*). Las otras dos especies (*Q. silverstonei* y *Q. tafallae*) provienen de los bosques húmedos premontanos y nublados de la vertiente y del corredor del Pacífico en el occidente de Ecuador, que va desde las provincias de Esmeraldas-Carchi hasta las de Guayas-Azuay. Una de ellas había sido ilustrada para la Flora Huayaquilensis de J.J. Tafalla a inicios del siglo XIX, manuscrito editado y dado a conocer sólo en fechas recientes. *Myrodia obovata* Ruiz in Tafalla (nom. inval.) y *Matisia eichleri* K. Schum. [*in schaedt*] son reconocidos como sinónimos de la especie *Quararibea tafallae* que aquí se describe.

Palabras clave: Flora Huayaquilensis; Matisieae; *Myrodia*; Neotrópico; Taxonomía.

Abstract

As an advance of the upcoming review of a group of species of the genus *Quararibea* (Malvaceae), the “grandifolia group” that includes at least 13 species of trees from Mesoamerica and Central-Northern South America, four new species are described in this work. Two are from Colombia, one of them typical of the Pacific rainforests in Chocó (*Quararibea recondita*) and the other one from the very humid premontane forests of southern Antioquia in the slopes of the Magdalena and Cauca River valleys (*Q. citarensis*). The other two species (*Q. silverstonei* and *Q. tafallae*) come from the humid premontane and cloud forests along the slope and the Pacific corridor of western Ecuador, from Esmeraldas-Carchi to Guayas-Azuay provinces. One of the species described here had been illustrated at the beginning of the 19th century on the Flora Huayaquilensis by J.J. Tafalla, whose manuscript was only recently edited and made public. *Myrodia obovata* Ruiz in Tafalla (nom. inval.) and *Matisia eichleri* K. Schum. [*in schaedt*] are recognized as synonyms of *Quararibea tafallae* described here.

Keywords: Flora Huayaquilensis; Matisieae; *Myrodia*; Neotropic; Taxonomy.

Introducción

Ultimando ya los trabajos de revisión de un grupo de especies del género *Quararibea* Aubl. (Malvaceae), al que hemos denominado “grupo grandifolia” (Fernández-Alonso, 2021; Fernández-Alonso & Cornejo, 2021), y como aporte previo a la publicación del tratamiento sinóptico del grupo mencionado (Fernández-Alonso, 2024, en prep.), se aborda en esta ocasión la descripción de cuatro especies nuevas, dos de ellas de Colombia y otras dos del Occidente de Ecuador. El género *Quararibea* (Malvoideae, Matisieae Benth.), propio de la region neotropical, agrupa algo más de 60 especies que crecen

Citación: José Luis Fernández-Alonso. Cuatro nuevas especies de *Quararibea* “grupo grandifolia” (Malvaceae) de Colombia y Ecuador. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):38-64, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2233>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:

José Luis Fernández-Alonso;
jlfernandez@rjb.csic.es

Recibido: 11 de noviembre de 2023

Aceptado: 15 de enero de 2024

Publicado en línea: 1 de febrero de 2024



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

principalmente en Mesamérica y en el norte y centro de Suramérica (**Cascante-Marín et al.**, 2018; **Ferreira**, 2020; **Fernández-Alonso**, 2022b). De Colombia se han reconocido hasta la fecha 23 especies de *Quararibea* (**Fernández-Alonso**, 2016; **Fernández-Alonso**, 2022a), a las hay que añadir dos de las descritas en este trabajo para un total de 25. Del mismo modo, el número de especies presentes en Ecuador asciende a 12, incluidas las que aquí se describen (**Fernández-Alonso & Cornejo**, 2021).

El “grupo grandifolia” incluye al menos 13 especies de árboles o arbolitos que presentan androceo con la columna estaminal distalmente rasgado-digitada de simetría radial y ramas estaminales generalmente de 4 mm o más de longitud, un rasgo inusual en este género en el que la mayoría de las especies tiene el androceo con columna estaminal dentada o cortamente lobulada en el extremo distal (**Alverson**, 1989; **Fernández-Alonso**, 1996, 1999). Aunque esta particularidad del androceo en este grupo de especies de *Quararibea* las acerca al género *Matisia* Bonpl., la presencia en este último del androceo con simetría bilateral y cinco carpelos en el gineceo, permite separar a este otro género de forma clara (**Fernández-Alonso**, 2021). Este “grupo grandifolia” se encuentra principalmente diversificado en el occidente de Colombia y Ecuador (siete especies) y en las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca en Colombia (cuatro especies) (**Fernández-Alonso & Castroviejo**, 2001; **Fernández-Alonso**, 2021, **Fernández-Alonso & Cornejo**, 2021). Solo dos especies del grupo presentan una distribución más amplia, *Q. funebris* (La Llave) Vischer, que desde Costa Rica llega hasta México y Guatemala (**Schultes**, 1957), y otra (*Q. duckei* Huber), que se conoce en Guyana Francesa, Surinam, Brasil y Bolivia (**Huber**, 1915; **Ferreira**, 2020).

Como resultado del estudio de algunas recolecciones recientes efectuadas en Colombia y Ecuador, tentativamente identificadas como *Quararibea grandifolia* Little s.l., y de un nuevo análisis de otras morfoespecies con información insuficiente (ausencia de flores o frutos) en los herbarios, se presenta aquí la descripción de cuatro nuevas especies ahora reconocidas. Una de ellas, *Q. tafallae*, pudo relacionarse con iconografías y pliegos de un árbol recolectado y tratado en la Flora Huayaquilensis de J.J. Tafalla, comisionado de la Expedición Botánica en la Real Audiencia de Quito, virreinato del Perú (*Flora Peruviana et Chilensis* 1777-1831), territorio que actualmente corresponde a la costa de Ecuador (**Muñoz-Garmendía**, 2003). Este documento, que permaneció inédito y disgregado por más de 170 años, fue reordenado, transcrito y publicado en tiempos recientes (**Tafalla**, 1991; **Estrella**, 2012; **Tepe**, 2018), aunque sin incluir un análisis crítico del contenido botánico, lo que hubiera permitido validar parte de los taxones tratados.

Materiales y métodos

Se estudiaron unas 260 colecciones del género *Quararibea* depositadas principalmente en los herbarios COL, GH, GUAY, MA, MO, NY, PSO, QCNE y US (acrónimos según **Thiers**, 2023) y también algunas imágenes de campo a las que se tuvo acceso. En el herbario MA, se revisaron especialmente las colecciones de Malvaceae s.l. del herbario histórico de Ruiz y Pavón (*Flora Peruviana et Chilensis*). Se estudiaron también imágenes complementarias de material de herbario y tipos nomenclaturales en la base de datos del herbario QCA (**QCA-bd**, 2021), en la Tropicos del Missouri Botanical Garden (**Tropicos**, 2023) y en la Global Plants de **JSTOR** (2023).

El estudio morfológico y de la distribución geográfica de los nuevos taxones propuestos y de las especies relacionadas con las que aquí se comparan, se basó en los materiales comentados. En el estudio morfológico se siguió la metodología ya referida en contribuciones anteriores (**Fernández-Alonso**, 1996, 2001a, 2021) y la terminología descriptiva se basó en **Font i Quer** (1985), **Harris & Harris** (2001) y **Ellis** (2009). Se tomaron algunas fotografías de acercamiento (tricomas, cortes transversales y detalles de estructuras florales) con lupa binocular Nikon SMZ645 (Japón) de lente de 100× acoplada a una cámara Canon PowerShot SX260HS (Amstelveen, Holanda). También se contó con algunas fotografías de campo e imágenes de pliegos de herbario amablemente facilitadas

por Xavier Cornejo (GUAY). Para los comentarios y avances preliminares sobre la conservación y la categorización de la especie, se tuvieron en cuenta los lineamientos de la IUCN (2022).

Resultados

1. *Quararibea citarensis* Fern.Alonso, sp. nov. (Figuras 1, 2)

TIPO: COLOMBIA. **Antioquia.** Municipio de San Francisco. Corregimiento de Aquitania, tierra fría, 1150–1250 m, 2 abr 1992, arbusto 3 m, escaso, (fl), R. Fonnegra & al. 4302 (holotipo HUA 81755; isotipo COL 617654).

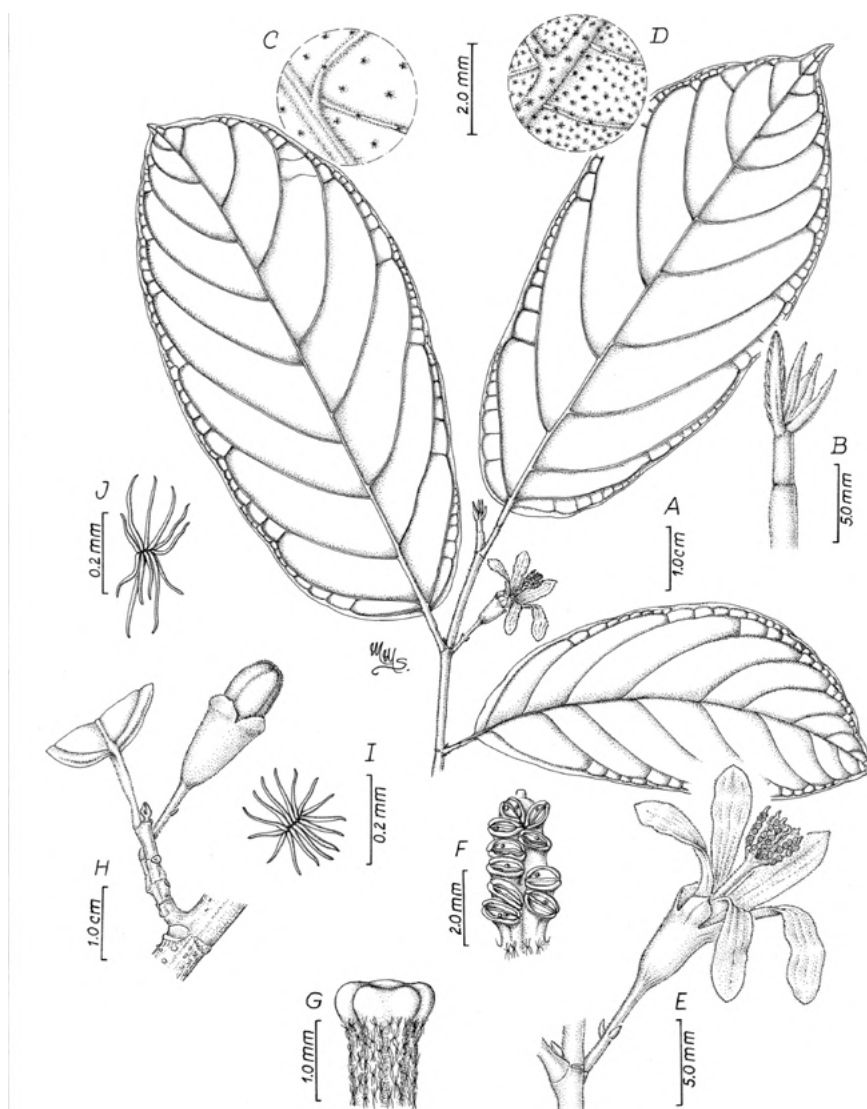


Figura 1. *Quararibea citarensis* Fern.Alonso. Lámina elaborada a partir del tipo Fonnegra 4302 (holotipo HUA). **A.** Rama terminal con flor. **B.** Yema terminal con sus catáfilos estipulares. **C-D.** Detalles del indumento estrellado-lepidoto en las venas y lámina en la haz y el envés, respectivamente. **E.** Flor en vista lateral que muestra su disposición opuesta a la hoja, el pedicelo floral con las bractéolas, la corola patente-recurvada y el androceo en posición central con las ramas en posición erecta. **F.** Rama estaminal que muestra las dos series de tecas a lo largo. **G.** Parte terminal del estilo que muestra el indumento y los lóbulos estigmáticos distales. **H.** Detalle de un botón floral en una rama corta. **I-J.** Detalle del indumento de tipo fasciculado-lepidoto (I) o estrellado (J)

Diagnosis. This species resembles *Quararibea funebris*, differing from it by being a shrub or small tree (3–10 m vs. 10–30 m trees in *Q. funebris*), and by having shorter leaf blades (10–13 cm length vs. 15–30 cm), shorter floral pedicel (12–15 mm length vs. 15–20 mm), shorter calyx (12–14 mm length vs. 15–30 mm), and a corolla with shorter petals (26–30 mm length vs. 37–50 mm).

Arbustos o arbolitos de 3–10 m, 5–20 cm DAP; **ramas** terminales marrones (en seco), glabras, nítidas, cilíndricas, notoriamente lenticeladas; entrenudos de 3–4,5 cm de longitud; **yemas** terminales generalmente con 2–4 primordios foliares estipulares, estrechamente lanceolados, de $3-6 \times 1,5$ mm, densamente cubiertos de indumento lepidoto muy fino (**Figuras 1b, 2a**). **Hojas** alternas, caducas; **pecíolo** de 9–12 mm de longitud, 1,5 mm de diámetro, con pulvínulo distal poco conspicuo; **estípulas** lanceoladas de $3-5 \times 1,5$ mm en su base, prontamente caducas, que dejan cicatrices conspicuas, estrechamente triangulares en las ramas; **láminas** membranáceas, elípticas o elíptico-oblongas de $10-13 \times 7-9,5$ cm, limbo a veces inequilátero, cuneado o redondeado en la zona de unión al pecíolo en la base; ápice agudo, apiculado, con apículo triangular de 1–1,5 cm; margen entero, ligeramente ondulado; haz con vena media primaria impresa; con 7–9 venas secundarias a cada lado y una submarginal adicional poco conspicua; envés con vena media y venas laterales resaltadas; venas de tercer y cuarto orden reticuladas, poco resaltadas en haz y envés; haz con indumento lepidoto disperso, envés con indumento abundante muy fino, estrellado-lepidoto (**Figuras 1 c-d**); sin domacios diferenciados en la confluencia de las venas laterales con el nervio medio. **Flores** dispuestas en ramas jóvenes, cortas, solitarias y opuestas a las hojas; **pedicelo** de 12–15(17) $\times$ 1–1,5 mm, liso, glabrescente, con fino indumento lepidoto; con 2(3) bractéolas persistentes agrupadas en el tercio inferior del pedicelo, bractéolas erecto-patentes, anchamente triangulares de ca. 1 mm de longitud y 1 mm de ancho en su zona basal (**Figura 1e**); con fino indumento lepidoto; **botón** floral obovoide, obtuso; **cáliz** verde, cónico-campanulado de 12–14 $\times$ 8–9 mm de ancho en la zona distal; tubo de 9–11 mm de longitud, (3)4–5 lobulado-rasgado en el tercio o cuarto distal; lóbulos obtusos o apiculados de 3–4 $\times$ 3–4 mm; en su cara externa de aspecto glabrescente, con indumento muy fino estrellado-lepidoto; en su cara interna con indumento seríceo acostado, uniformemente dispuesto; **corola** blanca, 5 pétalos patentes o reflejos, espatulados de 26–30 mm de largo,



Figura 2. *Quararibea citarensis* Fern.Alonso. **A.** Fonnegra 4302, isotipo (HUA), detalle de la flor opuesta a la hoja, desprovista de pétalos y la yema terminal. **B.** Fonnegra 6556 paratipo (HUA), detalle de la flor en vista lateral que muestra el pedicelo con bractéolas, los lóbulos calicinos distales y la columna estaminal con ramas erectas

5 mm de ancho en la zona distal, ca. 2 mm de ancho en el tercio basal, unguiculados en la base y redondeados distalmente, de aspecto glabro; **androceo** con columna estaminal blanca (en fresco), cilíndrica, ligeramente estriada longitudinalmente de 22–23 mm de longitud, 1,5–2 mm de grosor, con pubescencia muy fina de pelos estrellados, con 5 **ramas estaminales** erectas o erecto-patentes en la antesis, agrupadas a modo de cilindro ensanchado de 4,5 x 5–5,5 mm, ramas individuales cilíndricas de 4 mm de longitud y 1–1,5 mm de grosor, con anteras marrones, estrechamente reniformes a cimbiformes, muy comprimidas, de 0,5 mm de largo x 1 mm de ancho, dispuestas perpendicularmente y densamente en las ramas, de 10–12 en cada rama (50–60 por flor); **ovario** subgloboso, 2-locular, estilo recto, de 22–24 mm de longitud, alcanzando la zona apical de las ramas estaminales, indumento estrellado muy fino; estigma ligeramente ensanchado y 4–5 lobulado, de ca. 2 mm de diámetro. **Fruto** no visto.

Etimología. El nombre hace referencia a una de las localidades conocidas para esta especie, los Farallones de Citará, que en parte pertenecen al municipio antioqueño de Betania. El nombre Citará, a su vez, se asocia a una de las etnias indígenas, los citarás (actuales emberás) que habitaban el alto y medio Atrato y el suroriente antioqueño (Fernández de Piedrahita, 1688; Osorio, 2006).

Distribución, hábitat y estatus de conservación (IUCN). Conocida sólo en dos regiones de Antioquia con bosque húmedo premontano y bosque muy húmedo montano bajo, una en San Francisco, en la vertiente oriental de la cordillera Central, a 1150–1250 m, vertiente del Valle del Magdalena, y la otra en la cordillera Occidental, zona de los Farallones de Citará, vertiente del Cauca, a 1750–2100 m. El estatus de conservación de la especie no ha sido evaluado (IUCN, 2022), pues aún se necesita información de campo sobre su presencia actual en las dos localidades conocidas.

Fenología. Se ha registrado floración en los meses de abril y noviembre, pero no se conocen especímenes con fruto.

Usos y nombre común. No conocidos.

Notas taxonómicas. Aunque presenta alguna semejanza general con la especie mesoamericana *Quararibea funebris*, puede diferenciarse bien por los siguientes caracteres: Hasta donde se sabe, *Q. citarensis* es un arbusto o arbolito de escaso porte, de 3–10 m (vs. árboles de *Q. funebris* de 10–15 (30) m), hojas membranáceas y más pequeñas, de 10–13 x 7–9,5 cm (vs. hojas firmemente cartáceas de 12–30 x 5–13 cm); flores menores con cáliz de 12 a 14 mm de longitud y corola de 22–24 mm de longitud (vs. cáliz de 15–30(35) mm de longitud y corola de 37–50 mm de longitud), androceo claramente rasgado-digitado con ramas estaminales de 4 mm de longitud (vs. androceo con lóbulos de 1,5–3 mm de longitud) y anteras más pequeñas, de ca. 0,5 x 1 mm, perpendiculares a la rama (vs. anteras de 1,5–2 mm x 0,7–1 mm). Aunque en el aspecto general el indumento de las flores recuerda algunas especies del “grupo asterolepis”, como es el caso de *Q. stenophylla* Pitt. o de *Q. witti* K. Schum. & Ulbr., la presencia en *Q. citarensis* de la columna estaminal más profundamente rasgado-digitada, con ramas estaminales de ca. 4 mm de longitud (**Figura 1f**), la separa claramente de ellas (en estas especies los lóbulos o ramas estaminales no superan los 2,5–3 mm). De otra especie relacionada, *Q. cacao* (Triana & Planch.) Baill., se diferencia bien porque esta presenta hojas coriáceas y flores con pedicelos más cortos, de 8–11(12) mm de longitud (Triana & Planchon, 1862; Fernández-Alonso, 2001b).

Especímenes adicionales examinados (paratipos). COLOMBIA. Antioquia. Municipio de Betania, Farallones del Citará, paraje Las Canoas, margen derecha del río Pedral, 1730–2100 m, 5° 44'N 76° 00'O, 11 nov 1997, árbol 10 m, (fl), R. Fonnegra & al. 6556 (COL, HUA 108638).

2. *Quararibea recondita* Fern.Alonso, sp. nov. (Figuras 3, 4, 5)

TIPO: COLOMBIA. Chocó. Serranía del Baudó; municipio de Nuquí, corregimiento de Jurubidá, cerca de Morromico, margen de la quebrada Playa de Pedro, 0–50 m, 24 sep 1999, (fl), J. Betancur & C. Devenisch 8453 (holotipo COL 570587; isotipos CHOCO, COL570586, 570588, HUA, MA 943952).

Diagnosis. This species resembles *Quararibea tulekuna* by the winged calyx and the relatively elongated petals and staminal column. This new species can be clearly separated from *Q. tulekuna* by its smaller size (small trees of ca. 8 m vs. trees up to 30 m in *Q. tulekuna*), narrowly obovate leaf blades, 7–11 cm wide with only five secondary veins on each side (vs. lanceolate-elliptic leaf blades, 3–7 cm wide, with 6–7 secondary veins on each side), smaller flowers with calyx 13 x 4–5 mm and corolla 2.5–2.8 x 2 mm (vs. calyx 18 x 6 mm and corolla 35 x 0.5 mm), staminal column 25–28 mm long (vs. 35–37 mm), staminal branches of ca. 2 mm (vs. 1–1.2 mm), and androecium with only 20–30 theca (vs. 40–50).



Figura 3. Lámina de *Quararibea recondita* Fern.Alonso. **A.** Detalle de la parte distal de una rama con la yema terminal. **B.** Indumento del envés. **C.** Detalle de un botón floral opuesto a la hoja y una yema terminal con estípulas. **D.** Flor en vista lateral que muestra el pedicelo con bractéolas, cáliz, corola, columna estaminal, ramas estaminales y porción superior del estilo. **E-F.** Detalle de los tricomas fasciculado-lepidotos del cáliz. **G.** Detalle de la zona de inserción de las anteras en la columna estaminal. **H.** Detalle de la parte superior del estilo con el disco estigmático lobulado. (A-G. a partir de la serie típica *Betancur* 8453). Ilustración de Marcela Morales

Árboles pequeños de hasta 8–10 m de alto, con ramas jóvenes delgadas, angulosas y glabrescentes; entrenudos de 18–30 mm, yemas terminales poco diferenciadas, con 3–4 primordios foliares estipulares estrechamente triangular-falcados, de 2–4 x 1,5 mm, con indumento denso estrellado-lepidoto (**Figuras 3a, 4b**); **hojas** muy olorosas en seco –olor a regaliz o fenogreco–, con **estípulas** prontamente caducas, estrechamente triangular-falcadas, de ca. 3 mm de longitud; **pecíolo** de 13–18 x 15 mm, con pulvínulo distal cilíndrico, muy alargado, de hasta 8–10 mm de longitud, escasamente engrosado;



Figura 4. *Quararibea recondita* Fern.Alonso. **A.** Fotografía del holotipo Betancur 8453 (COL 570587). **B.** Detalle del ápice de una rama que muestra las estípulas, los pecíolos y una yema terminal con catáfilos estipulares. **C.** Botón floral con su pedicelo y una yema axilar protegida por catáfilos estipulares agrupados. (**B** y **C.** a partir de la serie típica Betancur 8453)

láminas verde pálido, delicadamente membranáceas, estrechamente obovadas, truncadas y levemente asimétricas en la base, de (13)15–26 x 7–11 cm, acuminadas en el ápice, margen entero o levemente sinuado, con 4–5 nervios laterales a cada lado (nerviación broquidódroma en la margen), con nerviación terciaria paralela, poco resaltada; de aspecto glabro pero con indumento estrellado o estrellado-lepidoto, muy fino y disperso en el haz y más conspicuo en el envés. **Flores** con **pedicelo** tenue, de 7–9 mm de longitud, con 3 bractéolas estrechamente cónicas, en posición basal o subbasal, una de ellas de 4 mm de longitud, con inserción ligeramente superior, y las otras dos de ca. 2 mm de longitud partiendo desde la base; con fino indumento equinado-lepidoto; **botones florales** fusiformes, de 12–13 x 4 mm, estrechamente cuspidados, con 10 alas longitudinales poco resaltadas, con indumento muy fino, lepidoto, mezclado con indumento equinado muy corto (**Figura 3c**); cáliz verde, estrechamente obcónico, de aspecto bilabiado, de 12–14 mm

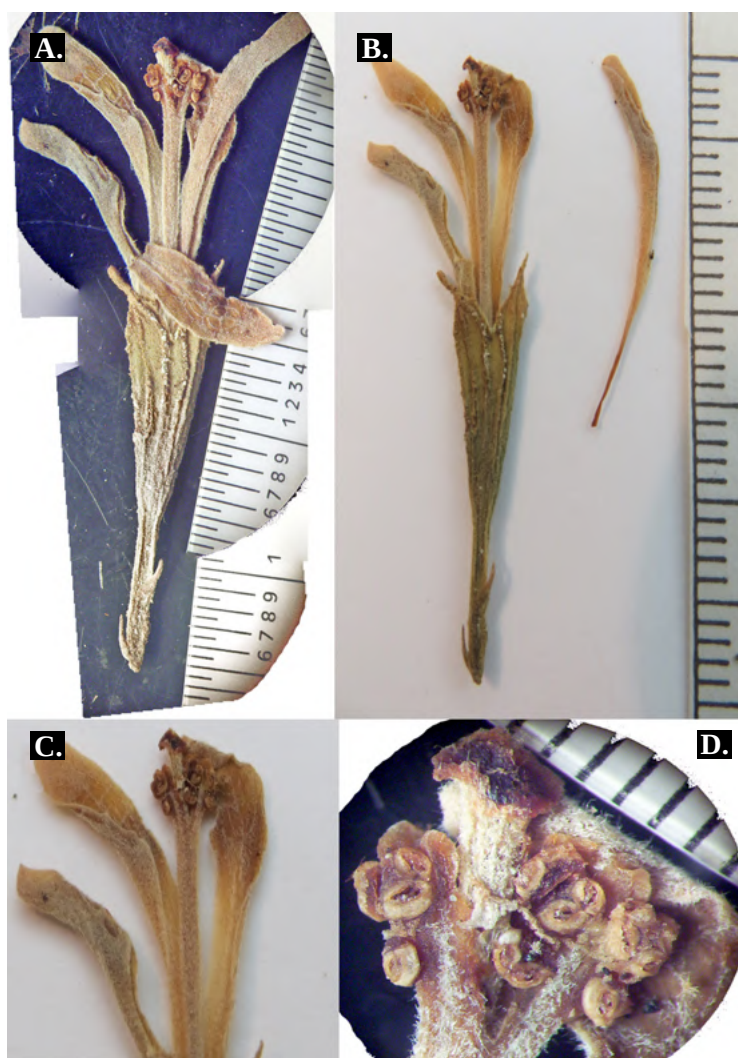


Figura 5. *Quararibea recondita* Fern.Alonso. **A.** Flor en vista lateral fotografiada con estereomicroscopio que muestra el pedicelo floral con las bractéolas, los pétalos y la columna estaminal. **B.** Flor en vista lateral, detalle de un pétalo con su mitad basal estrecha (uña). **C.** Detalle del indumento de los pétalos, la columna estaminal, las ramas estaminales y el estilo-estigma. **D.** Parte superior del androceo y estilo fotografiado bajo el estereomicroscopio que muestra las ramas estaminales y anteras, el indumento del estilo (superior) y el estigma lobulado (a partir de la serie típica *Betancur* 8453)

de longitud x 4–5 mm de ancho, con parte soldada de 9 mm y tres grandes lóbulos de ca. 4 mm de longitud, acuminados; acumen de 2 mm; cara externa con indumento fino equinado y lepidoto, principalmente en las alas (**Figuras 3 e-f**); 10 alas longitudinales poco resaltadas, cara interna con indumento acostado y seríceo, ocráceo; **corola** blanca con pétalos erecto-arqueados, estrechamente espatulados, obtusos en el ápice, de 25–28(30) x 2–2,5 mm, recubiertos de indumento estrellado-algodonoso por la cara externa y más disperso por la cara interna (**Figura 5 b-c**); **androceo** con columna estaminal blanquecina, más corta que los pétalos, de 25–28 x 1,2 mm, recubierta de indumento estrellado fino, de ca. 0,2–0,5 mm de longitud; ramas estaminales cortas, de ca. 2,0 mm de longitud, erecto-patentes, con 4–6 tecas por rama (20–30 en total), tecas de 0,5–0,8 mm, reniforme-orbiculadas (**Figuras 5c, d**); **gineceo** con estilo de 27–29 mm de longitud y 1 mm de grosor, longitudinalmente estriado, con indumento blanquecino denso, estrellado; estigma 5-lobulado-capitado, de 2 mm de diámetro, de aspecto liso y glabrescente (**Figura 3h**); ovario con 2 carpelos. **Fruto** no visto.

Etimología. El nombre hace referencia a la localización de la especie en una región poco explorada y alejada de las vías de comunicación.

Distribución, hábitat y estatus de conservación (IUCN). Árbol de pequeño porte asociado a cursos de agua. En las localidades donde se la ha encontrado en Colombia hasta la fecha es una planta rara. Se conoce de la Serranía del Baudó, en su parte meridional, en ambiente de bosque pluvial (bp-T), alejada de las poblaciones de la especie afín en el Darién, *Q. tulekuna* Fern.Alonso, (**Fernández-Alonso, 2001b**). Especie no evaluada en términos de conservación e indicada como escasa en la localidad tipo (según la etiqueta de herbario). Se requiere información de campo sobre la presencia actual de esta especie en las dos localidades conocidas.

Fenología. Sólo se conoce el registro de floración en el mes de septiembre. No se conocen especímenes con fruto.

Usos y nombre común. No registrados.

Notas taxonómicas. A grandes rasgos, esta especie presenta similitudes con *Q. tulekuna* Fern.Alonso y *Q. cornejoi* en algunos caracteres de valores intermedios. *Q. cornejoi* se diferencia de la que se describe por sus pedicelos florales más cortos (3–4 mm), cálices más cortos (8–9 mm), con alas poco conspicuas, pétalos más cortos (ca. 15 mm) y columna estaminal más corta (8–9 mm). *Q. tulekuna* se diferencia de la que se describe por sus hojas con láminas de lanceoladas a lanceolado-elípticas, cálices más largos (18 mm), con alas poco conspicuas, pétalos más largos (ca. 35 mm) y columna estaminal también más larga (35–37 mm). Aparte de la serie típica, sólo se conocen muestras de una recolección estéril (*F. García & al. 1833*) en la región de Bahía Solano (Chocó) que, dado los caracteres vegetativos (morfología e indumento de hojas y estípulas plenamente coincidentes), asignamos a esta misma especie.

Especímenes adicionales examinados (paratipos). COLOMBIA. **Chocó:** municipio de Bahía Solano, Parque Nacional Ensenada de Utría, camino a Boroboro, entre las quebradas de Sansoré y Munzú, 6° 21'N 76° 26'O, 190 m, 8 ago 1990, arbolito estéril, *F. García & al. 1833* (CHOCO, FMB, MO).

3. *Quararibea silverstonei* Fern.Alonso, sp. nov. (**Figuras 6, 7**)

TIPO: ECUADOR. **Cotopaxi.** Cantón La Maná, cordillera Occidental, vertiente occidental, Reserva Ecológica Los Ilinizas, sector El Oriente, acceso desde La Carmela, 1525 m, bosque nublado primario, 0° 40'29"S 79°04'42"O, árbol 7 m, (fl), 15 jul 2003, *P. Silverstone-S. et al. 9174* (holotipo, CUV-37412 [+ flores en líquido, anthoteca], isotipo COL, MA 943953, MO 2769337, QCNE).

Diagnosis. This species is similar to *Quararibea calycoptera* Fern.Alonso & Cornejo, from which it differs for having leaves with 10–20 mm long petioles and chartaceous or subchartaceous blades generally rounded or subcordate at the base (vs. leaves with petioles up to 10 mm long and blades narrowly cuneate in *Q. calycoptera*), conical-infundibuliform

floral calyx 19–20 x 5–6 mm (vs. broadly campanulate floral calyx 27–31 x 10–12 mm), and bud and calyx with 10 poorly developed longitudinal wings or ridges up to 0,5 mm tall (vs. bud and calyx with very conspicuous 5–10 longitudinal wings, 2–3 mm tall).

Árboles de (5)8–15(25) m de alto; tronco recto, con corteza grisácea o con tinte negruzco. **Ramas** de primer orden dispuestas en forma verticilada; ramitas terminales subcilíndricas, glabrescentes, con indumento marrón pálido; entrenudos de (4)5–6 cm, ocasionalmente con perforaciones (0,5 mm) cilíndricas, de hormigas asociadas (domacios). **Yemas** apicales con estípulas y primordios foliares estrechamente subulados, de 4–6 x 2 mm, densamente cubiertos de indumento lepidoto equinado muy fino, color marrón. **Hojas** alternas, dísticas; **pecíolo** de (10)15–20 x 2,5–3 mm, cilíndrico, con pulvínulo fusiforme de 8–10 mm de longitud en la mitad distal; **estípulas** subuladas a estrechamente triangulares, de 3–10 x 2–3 mm, prontamente caducas; cicatrices estipulares pálidas y conspicuas



Figura 6. *Quararibea silverstonei* Fern.Alonso, Cotopaxi, Silverstone 9174, fl. **A.** Holotipo (CUVC 37412). **B.** Detalle de rama joven con cicatriz estipular oblicua, pecíolos largos y base de la lámina subcordada. **C.** Detalle de una flor que muestra el indumento del cáliz, los pétalos reflejos, la columna estaminal glabrescente y la venación de 2°, 3° y 4° órdenes resaltada en el envés foliar (fondo)

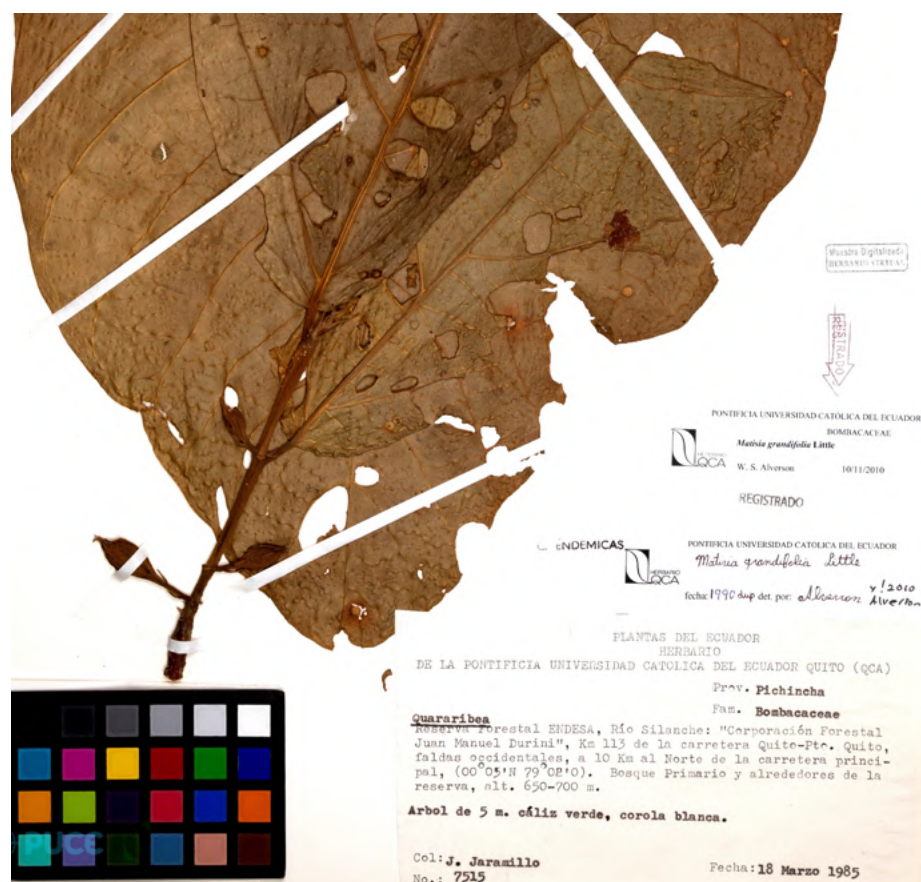


Figura 7. *Quararibea silverstonei*, Pichincha, J. Jaramillo 7515, fl, paratipo (QCA 21677), con botones florales y bractéolas largas dispersas en los pedicelos

en las ramas, oblicuas o en media luna, de 6–8 mm de longitud (**Figura 6b**); láminas cartáceas o subcartáceas verde pálido en ambas superficies, oblongo-elípticas, oblongas u oblanceoladas, de 25–50 x 12–30 cm, a veces acuminadas con acumen estrechamente triangular hasta de 2 cm; con base redondeada a ligeramente cordado-auriculada; margen entero; haz nítida, con vena media ancha y ligeramente acanalada, impresa, al igual que las venas secundarias; envés con vena media muy resaltada, con (8)9–11 venas laterales a cada lado, prolongadas hasta el margen foliar; venas de 3er orden, generalmente perpendiculares a las secundarias, paralelas entre sí y uniformes, venas de 4º y 5º órdenes, poligonales, también resaltadas; glabrescentes en ambas caras o con indumento lepidoto muy fino y disperso en el envés. **Flores** opuestas a las hojas, en nudos con tallo ligeramente ensanchado-aplastado y estriado longitudinalmente, con aroma agradable, **pedicelo** de 12–15 x ca. 2 mm, longitudinalmente anguloso, con fino indumento lepidoto; con 3 bractéolas persistentes (**Figura 7**), distribuidas en la mitad superior del pedicelo, de 3–7(10) mm de longitud, de subuladas a anchamente triangulares; glabrescentes o con fino indumento lepidoto; **botón** floral fusiforme y largamente apiculado, con 10 venas o alas cortas resaltadas (hasta de 0,5 mm alto), longitudinales, indumento lepidoto; **cáliz** verdoso o marrón-grisáceo, de 19–20 x 5–6 mm, cónico-infundibuliforme, tubo de 12–14 x 5 mm, con (3)4 lóbulos apicales, triangular acuminados, de ca. 3 mm de longitud, a veces rasgado irregularmente, con indumento fino lepidoto en la cara externa (**Figura 6c**) y conspicuamente seríceo acostado en la cara interna; **corola** con 5 pétalos blancos o blanco-crema, linear-oblongos, obtusos en el ápice y unguiculados en la base, reflejo-arqueados, de 35–40 x 4–5 mm en los 2/3 distales y de 2–3 mm en la uña basal, glabrescentes en la mitad basal y con fino indumento

estrellado en el tercio distal superior; **androceo** con columna estaminal blanca de 18–24 mm y 2 mm de grosor, glabra, que rebasa el cáliz en 5 mm; con 5 ramas apicales de 6–7 mm de longitud; con 4(6) tecas cada una, insertas principalmente en posición distal en la lacinia; tecas estrechamente reniformes, de 2 x 1 mm; **gineceo** con estilo recto, de ca. 25 mm de longitud, con estigma terminal amarillento, cónico, 5-lobulado, de 2–3 mm de diámetro, de aspecto glabro, brillante; ovario subesférico, generalmente con 4 carpelos y 2 óvulos por carpelo. **Pedúnculo** fructífero estriado que conserva las tres bractéolas del pedicelo, éstas de 4–10 x 2–3 mm; cáliz persistente estrechamente cupular que recubre el fruto en 2/3 partes, de 20–25 x 25 mm, con 4–5 lóbulos triangulares, recorridos por una arista dorsal hasta la base. **Fruto** propiamente dicho, verde pálido, ovoide a anchamente ovoide, de 23–25 x 15–18 mm, apiculado; generalmente con 3–4 pirenos desarrollados, de 12–13 x 9–9,5 mm, ovoides subtruncados, con amplia cicatriz basal de 4 mm de ancho, ligeramente comprimidos y convexos por una cara (dorsal) y 2–3 estrías longitudinales.

Etimología. El nombre hace referencia al profesor Philip Arthur Silverstone-Sopkin (1939-2018), herpetólogo y botánico estadounidense, profesor de botánica por muchos años en la Universidad del Valle y Director del Herbario CUVIC (Cali, Colombia). Philip quien estudió y documentó con gran dedicación la flora del suroccidente de Colombia; en una de sus expediciones al Volcán Cotopaxi en Ecuador recolectó también, entre otras novedades, las colecciones tipo de la especie endémica *Salvia sigchosica* Fern. Alonso y el material que ha sido seleccionado como tipo de esta especie de *Quararibea* (Fernández-Alonso, 2006; Ramos-Pérez & Silverstone-Sopkin, 2018).

Distribución, hábitat y estatus de conservación (IUCN). Se conoce de los bosques húmedos premontanos nublados y bosque húmedo basal del occidente de Ecuador, en las provincias de Cotopaxi, Guayas, Manabí y Pichincha, entre los (600)700-1600 m. Generalmente se encuentra en las zonas aledañas de los bosques nublados primarios de la vertiente occidental de la cordillera Occidental de Ecuador. Según los criterios de la IUCN (2022), a esta especie le correspondería la categoría de NT. Hay que anotar que parte de las localidades conocidas de esta especie están ubicadas en zonas objeto de algún grado de protección. Está presente en la Reserva Ecológica Los Ilinizas (La Maná, Cotopaxi), en la Reserva Forestal Endesa (Puerto Quito, Pichincha) y en el Parque Nacional de Machalilla (San Sebastián, Manabí). Hay, además, un registro atípico de la Reserva Biológica Lalo-Loor (Manabí), en cotas más bajas (200-300 m), asociadas a franjas de bosque seco tropical.

Fenología. Hay registros de floración prácticamente a lo largo de todo el año, entre los meses de enero a noviembre, y un registro de fructificación en febrero.

Usos y nombre común. No registrados.

Especímenes adicionales examinados (paratipos). ECUADOR. **Guayas.** Cordillera Chongón-Colonche, bosque protector Loma Alta, 600 m, en BmHPM nublado, (fr), 22 feb 1997, C. Bonifaz & al. 3564 (GUAY 8714, COL 458362); ibidem, bosque protector Loma Alta, BHPM nublado estacional, secundario, 01° 48'S, 80°47'O, 600 m, árbol 10 m, común, nv: molinillo, (fr), 9 jul 1995, X. Cornejo y C. Bonifaz 4216 (GUAY 6728, COL 458362). **Manabí.** San Sebastián, Parque Nacional Machalilla, 8–9 km al SE de Agua Blanca, 550–730 m, remanentes de BHT, arb. 25 m, (fl), 10 ene 1991 A. Gentry & al 72410 (F 2114144, JAUM 45786, MO); Reserva Biológica Lalo Loor, 0°5'S, 80°8'O, 200–300 m, BsT, 18 nov 2006, (fl), árbol 15 m, A.J. Perez & al. 3112 (QCA 140781). **Pichincha.** Reserva forestal Endesa, río Silanche, Km 113 carretera Quito-Puerto Quito, 0°5'N 79°2'O, 650–700 m, bosque primario, árbol 5 m, (fl), 18 mar 1985, J. Jaramillo 7515 (QCA 21677); ibidem, Pedro Vicente Maldonado, vía Puerto Quito, 0°5'N 79°5'O, 650 m, BHPM, árbol 8 m, (fl), 9 jun 1975, Padilla & Proaño 13 (QCA 21679); ibidem, Reserva Forestal Endesa, Km 113 carretera Quito-Puerto Quito, 0°3'N 77°20'O, 1390 m, bosque primario, árbol ester., 27 may 2000, C. Proaño 89. (QCA 12345).

Notas taxonómicas. *Q. silverstonei* guarda alguna afinidad con *Q. calycoptera* pero se diferencia bien de esta porque la primera presenta hojas membranáceas con pecíolos más cortos (de hasta 10 mm long); cáliz floral más largo, de 27–31 mm de longitud y anchamente campanulado, y alas del cáliz más elevadas, de 2–3 mm de alto. Hay un

registro atípico en la provincia de Manabí, en el bosque seco de la Reserva Biológica de Lalo Loor, en la cota de los 200–300 m (A.J. Perez & al. 3112). Aunque desconocemos el hábitat específico donde crece este árbol en la región, quizás se trate de ambientes azonales asociados a cursos de agua dentro de áreas con bosque seco tropical. El bosque seco tropical es un hábitat inusual para *Quararibea*; en el caso de la especie colombiana recientemente descrita en este tipo de ambiente, *Q. villanuevae* Fern.Alonso, probablemente se trate asimismo de habitats azonales próximos a los cursos de agua (Fernández-Alonso, 2021).

La presencia de orificios en los entrenudos jóvenes asociados a hormigas en al menos dos de las colecciones de esta especie (Manabí y Pichincha), como es el caso de *Jaramillo 7515*, corrobora lo ya observado en otras especies de este grupo como *Q. grandifolia* y *Q. calycoptera* (Fernández-Alonso & Cornejo, 2021). Este fenómeno también ha sido observado en otros árboles de la familia como *Ceiba pentandra*, cuya mirmecofilia ya fue señalada en la literatura especializada en Colombia y Panamá (Ibáñez, et al., 2005; Vergara, 2007).

4. *Quararibea tafallae* Fern.Alonso, sp. nov. (Figuras 8, 9, 10, 11, 12)

TIPO: ECUADOR. Los Ríos. Hacienda Clementina, cara N del Cerro Samama, cerca del Destacamento Pita, 350–400 m, bosque primario, 1° 39'S 79°20'O, árbol 8 m, (fl,fr), 11 oct 2004, B.Stahl & al. 6233 (holotipo, GUAY 12847, isotipos COL513465, GB).

=*Myrodia obovata* Ruiz, in Tafalla, Flora Huayaquilensis Tomus II, t. 145. 1991, nomen inval., syn. nov.

=*Matisia eichleri* Schum., nom. nud [in schaedt. Mus. Bot. Berol./ Fotogr. F0BN009559], syn. nov. (Figura 11)

Diagnosis. Like *Quararibea grandifolia* (Little) Cuatrec., from which it differs by the leaves with longer petioles 10–20 mm long (vs. 5–9 mm long in *Q. grandifolia*); blades oblong 18–40 cm long and 7–8(10) pairs of veins (vs. blades oblanceolate, 50–60 cm long, and 12–14 pairs of veins); floral pedicel 8–13 mm long (vs. 4–7 mm long). It is also somewhat similar to *Q. silverstonei* Fern.Alonso, but differing in its leaves with 7–8(10) pairs of veins (vs. 9–11 pairs of veins in *Q. silverstonei*); floral pedicel 8–13 mm long, with bracteoles 1.5–2 mm long in the upper third or fourth of the pedicel (vs. floral pedicel 12–15 mm long, with bracteoles 3–10 mm long located in the superior half of the pedicel); calix tubular or tubular-conic with 5–10 wings, 0.5–0.7(1.0) mm tall (vs. calix conic-infundibuliform, with 10 wings up to 0.5 mm tall).

Árboles de 8–20(25) m de alto; tronco recto, ligeramente acanalado, con corteza grisácea; copa generalmente pequeña. **Ramas** de primer orden delgadas, dispuestas en forma verticilada; ramitas terminales cilíndricas o subcilíndricas, glabras, con ligero brillo y frecuentemente con aspecto carnososo; corteza verde o con tinte negruzco; leño blanco. **Hojas** alternas, dísticas; yemas apicales con estípulas y primordios foliares densamente cubiertos de indumento lepidoto muy fino, **pecíolo** de (10)15–20 x 2,5–3 mm, cilíndrico, con engrosamiento pulvinar distal, de ca. 10 mm de longitud, cónico-fusiforme; **estípulas** triangular-subuladas, de 4–5 x 2–3 mm, prontamente caducas, que dejan cicatrices conspicuas en las ramas; **láminas** cartáceas o subcartáceas, más raramente membranosocartáceas; oblongas, o a veces obovado-oblongas o elíptico-oblongas, de (18)20–40 x (8)10–15 cm, frecuentemente acuminadas con acumen estrechamente triangular de 1,5 cm, con base ligeramente cordado-auriculada o cuneado-redondeada y a veces inequilátera; margen entero, ligeramente ondulado; haz nítida, con venas impresas y a veces con aspecto levemente reticulado-bullado; envés con vena media muy resaltada, con 7–8(10) venas laterales a cada lado y venas de 3er y 4º órdenes, poligonales, también resaltadas; glabras en ambas caras o con indumento lepidoto muy fino y disperso en el envés. **Flores** opuestas a las hojas, en nudos con tallo ligeramente ensanchado-aplastado y estriado longitudinalmente; rara vez con 1-2 flores asociadas a los rastros foliares en la base de las ramitas jóvenes (Figura 8). **Pedicelo** de 8–11(13) x ca. 2–3 mm, longitudinalmente anguloso, con fino indumento lepidoto, con 3 bractéolas persistentes en el tercio o cuarto distal a modo de cálculo, junto a la copa calicina, o a veces con una de ellas ligeramente desplazada ca. 1 mm en posición inferior,

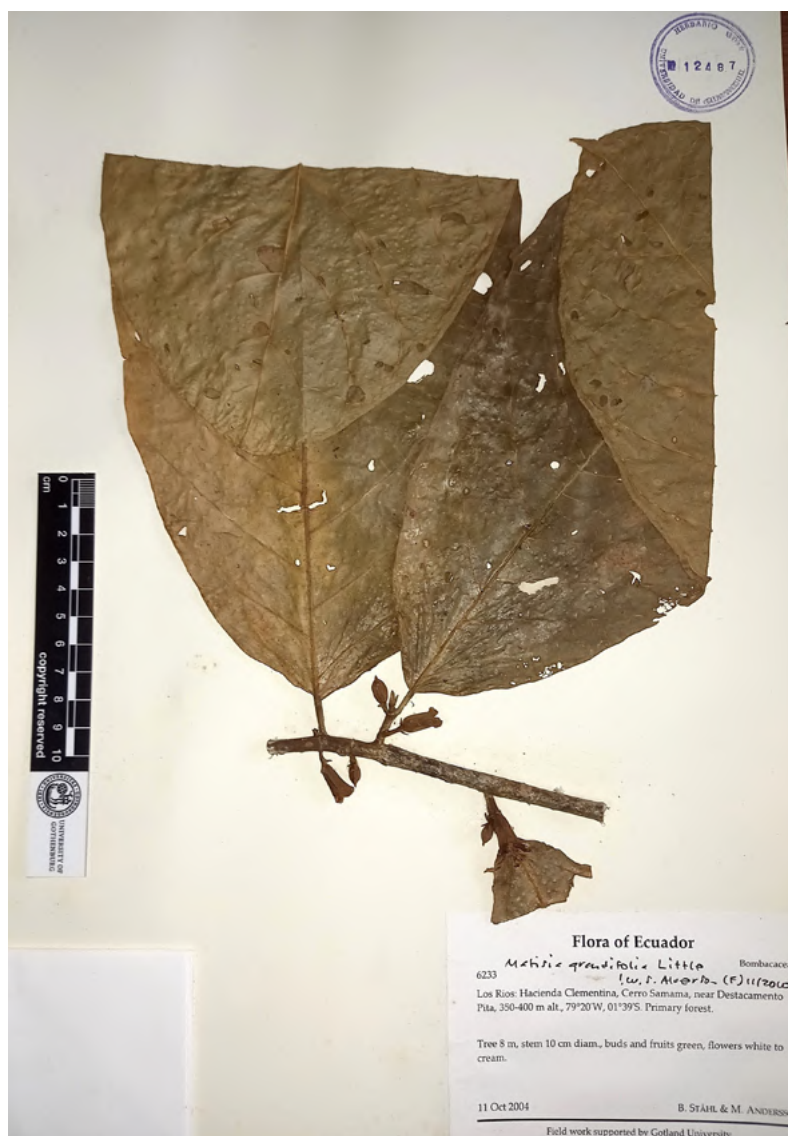


Figura 8. *Quararibea tafallae* Fern.Alonso, Los Ríos, B. Stahl 6233, fl. holotipo (GUAY 12487).

de 1,5–2 mm de longitud, anchamente triangulares, acuminadas; glabrescentes o con fino indumento lepidoto. **Botón floral** generalmente cilíndrico apiculado, más raramente ovoide-fusiforme, con 5–8(10) alas longitudinales y aspecto levemente seríceo por el indumento lepidoto; **cáliz** verdoso o pardo-grisáceo, de (14)15–20 x 5–6 mm, tubular a tubular-cónico, tubo de 12–15 x 6–7 mm, con (5)7–10 alas poco pronunciadas, elevadas 0,5–0,7(1,0) mm, con 3(4) lóbulos apicales, triangular-acuminados, de 3–4 mm de longitud, a veces rasgado irregularmente; **corola** con 5 pétalos blancos o blanco-crema, linear-oblongos, obtusos en el ápice y unguiculados en la base; reflejo-arqueados, de 33–36 x 4–5 mm en los 2/3 distales y de 2–3 mm en la uña basal, de aspecto glabro; **androceo** con columna estaminal blanca de (17)18–23 mm y 2 mm de grosor, glabrescente, con 5 ramas apicales de 5–6 mm de longitud; con 5–6 tecas cada una de ellas inserta en la cara externa de la lacinia, **estilo** recto, de ca. 25 mm de longitud, con estigma terminal amarillento, cónico, 5-lobulado, de 2–3 mm de diámetro, aspecto glabro, brillante; ovario subsférico, generalmente con 4 carpelos y 2 óvulos por carpelo. **Pedúnculo** fructífero estriado, de 9–14 mm de longitud, que conserva las 3 bractéolas apicales, acrescentes, estas de 4–5 x 3–4 mm; cáliz persistente,

de 19–21 x 16–17 mm, con un pequeño engrosamiento cupular basal de 3–4 mm de longitud y 7–8 mm de ancho, con 5–8(10) alas longitudinales y 4–5 lóbulos triangulares, recorridos por una costilla dorsal hasta la base (**Figura 9**). **Fruto** propiamente dicho, verde pálido, subgloboso, de 20–22 x 19–20 mm, raramente apiculado (en seco) y umbilicado apicalmente, generalmente con 3 pirenos desarrollados, de 12–13 x 9–9,5 mm, ovoides, subtruncados, con amplia cicatriz basal de 4 mm de ancho, ligeramente comprimidos y convexos por una cara (dorsal) y 2–3 estrías longitudinales.

Etimología. El nombre de la especie hace referencia a Juan José Tafalla y Navascués (1755–1811), farmacéutico navarro integrante de la Expedición Botánica al Virreinato del Perú liderada por Hipólito Ruiz y José Pavón, responsables de la obra *Flora Peruviana et Chilensis* (**Pupulin**, 2012b; **Tepe**, 2018). Tafalla trabajó desde 1784 como agregado botánico en la Flora de Perú y fue comisionado después (1799-1808) para estudiar la flora del territorio de la Real Audiencia de Quito (Ecuador). Es autor de un detallado estudio de la flora del occidente de este país (**Estrella**, 2012; **Tepe**, 2018). Los manuscritos y



Figura 9. *Quararibea tafallae* Fern.Alonso, Manabi, X. Cornejo 3874 fr, paratipo (GUAY 6498).

láminas aportados paulatinamente por Tafalla fueron en su momento intercalados en el conjunto de documentos de la Expedición, como parte de la obra general de la *Flora Peruviana et Chilensis*, que en su mayoría quedaría sin publicar (Rodríguez-Nozal, 1994, 2004; Adanero, 2011). Sólo tardíamente, después de la reordenación llevada a cabo por Eduardo Estrella de la documentación de las plantas de Tafalla provenientes de la región de Huayaquil, en la actual costa de Ecuador, esta fue publicada con su título original de *Flora Huayaquilensis* (Estrella, 1989). Una de las detalladas láminas de esta flora corresponde a un árbol estudiado y parcialmente descrito, primero por J.J. Tafalla, y anotado y corregido después (sobre los manuscritos) por H. Ruiz (Estrella, 1989; Tafalla, 1989, 1991). En su honor, la especie lleva ahora el nombre de su primer descubridor.



Figura 10. *Quararibea tafallae* Fern.Alonso. Lámina de “*Myrodia obovata* Tafalla & Ruiz”, Ic. 524; “*Molinillo*”, de X. Cortés y Alcozer.. *Myrodia obovata* / “Peru” [Ecuador]/Rama florida. Parte inferior, detalles anatómicos: **a.** flor entera; **b.** cáliz y androceo; **c.** pétalo; **d.** columna estaminal, ramas estaminales y estigma; **e.** fruto con el cáliz y las bractéolas acrescentes; **f.** huesos o pirenos que encierran la semilla. Ref. Archivo: MA-AJB04-D-1038

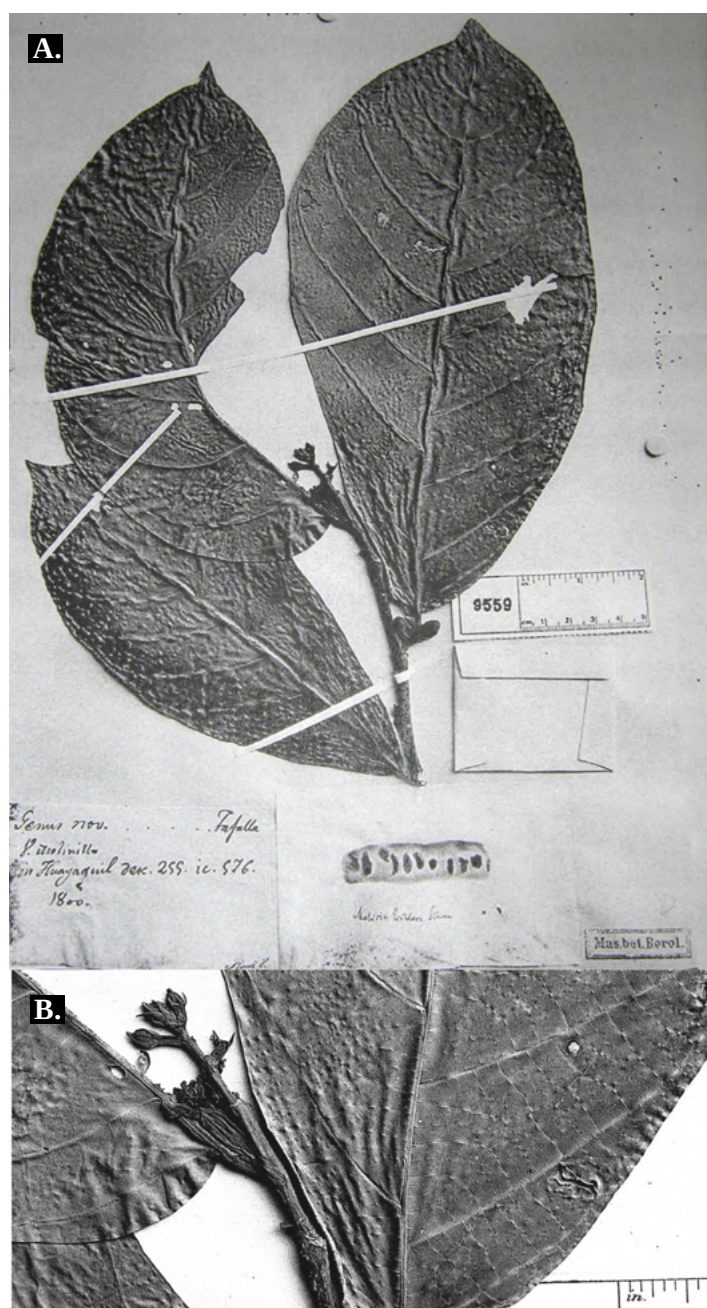


Figura 11. *Quararibea tafallae* Fern.Alonso, foto del pliego de B [sub *Matisia eichleri* Schum.] A. Foto F 559 del herbario de Berlín, en F, sub “*Matisia Eichleri* Schum. [nomen]”. *Genus novum...* [J.J.] Tafalla/ V. Molinillo / in Huayaquil desc. 299. ic. 576/ [año]1800/ Ruiz L.[egit]/. B. Detalle de la base de la hoja, una flor y la yema terminal. Colección F0BN009559. Fotografía de un duplicado de la recolección efectuada por J.J. Tafalla en Guayaquil, Ecuador

Distribución, hábitat y estatus de conservación (IUCN). Se conoce en un sector amplio del occidente de Ecuador, generalmente en zonas de bosque muy húmedo premontano nublado o bosque húmedo premontano estacional, en las provincias de Carchi, Azuay, Cañar y Manabí y en sectores de Los Ríos y Guayas. Se encuentra en bosque primario y en remanentes de bosque secundario. Se conocen registros desde los (100) 250–1000 m, con un registro inusual en la cota de 1900–2000 m. en la provincia de Carchi. En la

descripción manuscrita de **Tafalla** (1989), se indicaba su presencia en las selvas aledañas a “Bulu-Bulu”, que según la información recabada, quedan junto a la Reserva Ecológica Manglares de Churute, una región cercana a Guayaquil en Guayas. Actualmente, el área del río Bulu Bulu ha sido totalmente transformada en cultivos agrícolas y no existe la referida selva de Bulu Bulu como tal (Xavier Cornejo, com. pers.). De esta provincia se conocen, además, registros recientes de la cordillera de Bucay y de Cantón de Santa Elena, que se citan en este trabajo y corroboran lo referido por Tafalla para la Flora Huayaquilensis (**Tafalla**, 1991).

En su actual circunscripción taxonómica, el estatus de conservación de esta especie no ha sido formalmente evaluado. En primera instancia, y dada la amplia distribución conocida (cinco provincias y cerca de 12 localidades), la especie no entraría en ninguna en las tres categorías de amenaza, pudiendo considerársela como de preocupación menor (LR) según los criterios de la **IUCN** (2022). No obstante, por lo que se comenta en las notas taxonómicas sobre algunas variantes morfológicas de esta especie, asociadas con diferentes cotas altitudinales y sectores marginales de su área de distribución (Azuay y Carchi), sería más recomendable considerar la categoría más conservadora de (LT), o casi amenazada, al menos para las poblaciones divergentes. Se sugiere, asimismo, hacer un estudio de campo más detallado de las variantes intraespecíficas aquí reconocidas y la posible reevaluación de su estatus taxonómico.

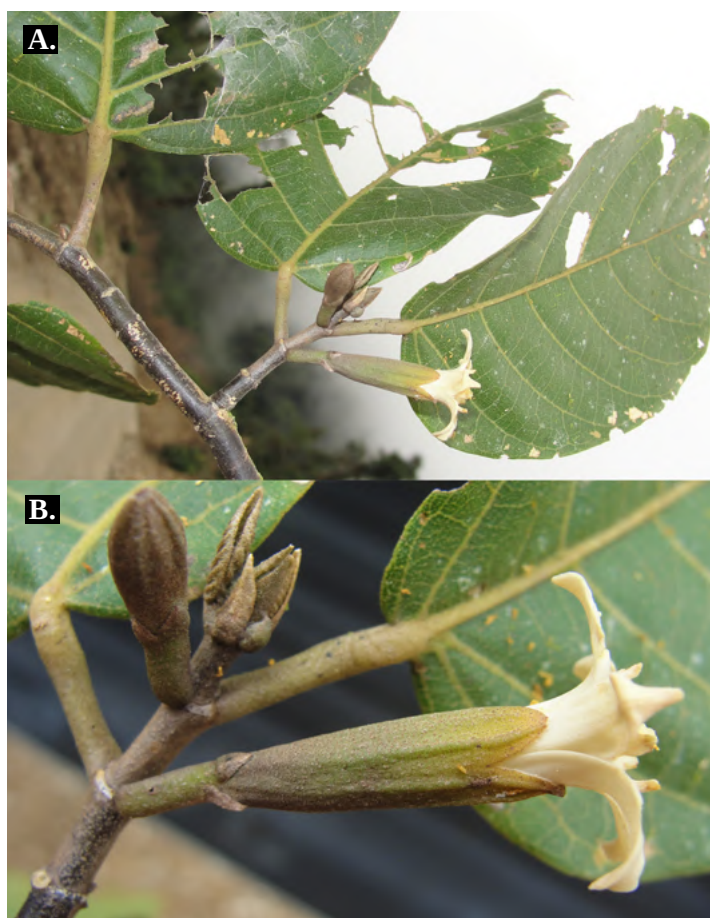


Figura 12. *Quararibea tafallae* Fern.Alonso, Ecuador Carchi, W. Palacios 17276 (QCNE). **A.** Detalle de una rama florífera con corteza oscura y nítida mostrando la base de la hoja, la disposición de las flores y de la yema terminal. **B.** Detalle de flor en anthesis con pétalos patentes, el botón floral con las bractéolas y el indumento lepidoto del pedicelo y las bractéolas. Fotografías de W. Palacios QCNE

Fenología. Hay registros de floración de esta especie durante todo el año y registros de fructificación de febrero a julio y de octubre.

Usos y nombre común. “Molinillo” (Guayas, Manabí), nombre que se debe a la presencia en las zonas distales, de tallos delgados con varias ramas verticiladas con los que se contruyen los utensilios denominados molinillos para batir manualmente algunas bebidas como el chocolate, uso sobre el que hay alguna referencia en la literatura (**Cervantes-Servin**, 1999; **Fernández-Alonso**, 2021). Hay una anotación original de H. Ruiz en la descripción de esta especie concerniente al nombre vernáculo en la región y el uso de esta planta para la fabricación del utensilio mencionado: *Llamanlé los naturales “Molinillo” por que con el verticilo que forman los ramos, arman un molinillo para batir los frijoles despues de cocinados, y es de figura de una rueca con que hilan las mujeres en España* (**Tafalla**, 1991). Este nombre también aparece en la etiqueta del pliego de Guayaquil, hecha por Tafalla (**Figura 11**), que en el herbario B (F0BN009559) se encontraba asociado al nombre *Matisia eichleri* Schum. (ined.). En algunos registros de herbario se recoge su condición de árbol maderable para la obtención de largueros de camas, puntales, tablas, listones y vigas para la construcción de casas (*Cornejo 3874*, *Hernández 121*). Los frutos del árbol, ricos en pulpa, son consumidos por mamíferos (*Cornejo 4216*, GUAY), que actuarían como dispersores de los pirenos (**Figura 9**).

Especímenes adicionales examinados (paratipos). ECUADOR. **Azuay**, 20–25 Km al E de Jesus María, cerca del límite provincial de Cañar, 02°30'S, 79°21'O, 780 m, BmhT, árbol 12 m, (fl), 12 abr 1980, A.H. Gentry & al. 28514 (QCNE 98482, MO –fotografías-). **Carchi**. Cordillera Occidental, municipio El Espejo, carretera Primavera El Limonal-Chical, faldas del Cerro Golondrinas, BmhM, 00°50'N, 78°13'O, 1990 m, árbol 20 m, (fl), 5 mar 2010 W. Palacios 17276 (MO 3194961/A:6921874, QCNE, y fotografías WP!). **Guayas**. 2–4 km al oeste de Bucay, BmhT alterado, 2°10'S, 79°40'O, 170 m, árbol 15 m, (fr), 31 oct 1974, A. Gentry 12296a (QCA 21671, MO 1519087/A:2588149); cantón Santa Elena, comuna Loma Alta, 5 Km al NO de Suspiro, bosque nublado secundario, 500 m, 01°49'S, 80°36'O, árbol 8 m, (fl), 23 ene 1997, P.J.M. Maas & al 8565 (U 1377481, QCNE); [Ecuador. Guayas. Guayaquil], lámina de “*Myrodia obovata*/ Ic. 524 v. *Molinillo*” /Tafalla Navascués, J. J. Flora Huayaquilensis [...] Tomus II, t. 145. 1991/ Archivo MA-AJB04-D-1038 (lámina, MA); ibidem [Guayas. Guayaquil] Huayaquil, desc. 299, ic. 576/ [año] sep 1800/ 9559 Mus. Bot. Berol./, (fl), “Ruiz” [J.J. Tafalla] L.[egit], (Fot. F) F0BN009559!. **Los Ríos**. Hacienda Clementina, 79°21'O, 1°40'S, 80 m, BhT secundario, en recuperación, árbol 8 m, (fr), 20 mar 1996, X. Cornejo & al. 4806 (COL 458363, GUAY 7717); ibidem, cerro Samama, cerca de Destacamento Pita, 79°20'O, 1°39'S, 350–400 m, bosque primario, árbol 8 m, (fl), 11 oct 2004, B. Stahl y M. Andersson 6222 (COL 513430, GUAY 12466 + Foto BS); ibidem, cerro Samama, 350–400 m, bosque primario, árbol 8 m, (fl), 11 oct 2004, B. Stahl y M. Andersson 6224 (COL, GB); ibidem, desde Pita a La Torre, 1°39'S, 79°20'O, 650 m, (fl), 28 sep 2005, B. Stahl y S. Pettersson 6398 (COL513464 -000219720-, GUAY 12887); ibidem, cerro Samama, cerca de Puerta Negra, 01° 39'S, 79°20'O, 300-350 m, BsT estacional, ambiente perturbado, (fl), arbolito 4 m, 3 oct 2005, B. Stahl y S. Pettersson 6463 (COL 513463 -219720-, GUAY 12961); ibidem, cara N del cerro Samama, vía Destacamento Pita a La Torre, 425 m, bosque primario, 1°39'S, 79°20'O, árbol 8 m, (fl), 26 may 2006, B.Stahl & al. 6627 (GUAY 12785, COL). **Manabí**. San Sebastián, Parque Nacional Machalilla, 550–730 m, BhPM estacional, secundario, 80°42'O, 1°35'S, 600 m, árbol 10 m, (fr), frecuente, nv: molinillo, 20 may 1995, X. Cornejo y C. Bonifaz 3874 (GUAY 6498); Parque Nacional Machalilla, sector San Sebastián, BhT y BhPM de Garúa, secundario, en terreno pendiente, 80° 40'O, 1°34'S, 520–570 m, árbol 8 m, (fl), nv: molinillo, 11 ene 1993 C. Joose y M. Coello 904 (QCA 21678); carretera Jipijapa-Puerto Cayo, cordillera costera, 428–550 m, 1°20'S, 80°39'O, remanentes de BPM, 8 jun 2003, estéril, J. Santiana et al 118 (COL 506741; QCA 7703560).

Notas taxonómicas. Guarda cierta afinidad con *Q. grandifolia*, descrita en los bosques de Pichincha por debajo de 700 m, pero se puede diferenciar bien porque esta especie presenta hojas con pecíolos más cortos (de menos de 10 mm), láminas oblanceoladas con

base foliar generalmente cuneada, pedicelo floral más corto, de 4–7 mm, y cáliz con 10 alas de ca. 1,0 mm de alto. Las diferencias con *Q. silverstonei*, ya referidas en la diagnosis, también son claras, presentándose en esta última especie láminas con mayor número de venas laterales, pedicelos florales más largos, con bractéolas de mayor tamaño, dispersas en la mitad distal del pedicelo, y cálices florales cónico-infundibuliformes con alas escasamente resaltadas.

La presencia de hormigas asociadas a los brotes jóvenes en *Q. calycoptera* (Fernández-Alonso & Cornejo, 2021), especie que tiene entrenudos huecos engrosados con perforaciones circulares (domacios) y en *Q. silverstonei*, descrita aquí, también se observa en *Q. tafallae*, como consta en algunos de los pliegos estudiados (Santiana & al. 118, Stahl & al. 6233).

Con respecto a algunas variantes morfológicas locales observadas dentro de la circunscripción de *Q. tafallae*, debe señalarse lo siguiente.

a) En una colección de Hacienda Clementina, provincia de Los Ríos (Cornejo & al. 4806), asignable a *Q. tafallae*, se observa similitud con *Q. grandiflora* en caracteres como la base de la hoja (tiende a cuneada) y el cáliz con aristas longitudinales bien marcadas. Este espécimen representaría una transición entre los dos taxones que requeriría una evaluación de campo más detallada.

b) La colección *Gentry 28514*, proveniente de la región de Azuay-Cañar (780 m), aunque comparte las características de esta especie en lo concerniente a las hojas, los pedicelos y la posición de las bractéolas, representa también una notable variante regional que requeriría un análisis más detallado con base en nuevas recolecciones. Presenta hojas inusualmente cordado-auriculadas en la base (senos o aurículas basales de hasta de 12 mm), con hasta 10(–11) pares de nervios laterales y pedicelos florales más gráciles, que sobrepasan en longitud el botón floral.

c) La colección *Palacios 17276*, proveniente de una localidad inusualmente elevada (ca. 2000 m) de la provincia de Carchi, podría representar otro extremo de variación de esta especie. El escaso material conocido de este árbol se asemeja, en términos generales, a la ilustración de la *Myrodia obovata* [Ruiz], de la Flora Huayaquilensis de Tafalla, proveniente de las selvas de Bulubulu (Tafalla, 1991). Aunque esta planta de Carchi presenta en general los caracteres diagnósticos de la especie aquí descrita, podemos resaltar también algunas diferencias: los catáfilos estipulares de las yemas terminales con indumento seríceo-lepidoto, las láminas foliares con base redonda-auriculada, el pedicelo floral con bractéolas anchamente triangulares, marrón lepidotas, y la columna estaminal aparentemente más corta, que sobrepasa ligeramente los dientes del cáliz (Figura 12). No obstante, el material de las plantas de esta localidad que ha podido estudiarse, no permite aclarar plenamente su morfología, lo que hace necesarias nuevas recolecciones en este enclave elevado de Carchi.

Sobre la identidad de Myrodia obovata Tafalla, Flora Huayaquilensis, Matisia Eichleri Schum. [ined], herbario de Berlín y Quararibea tafallae Fern.Alonso

En el conjunto de colecciones de herbario, iconografías y descripciones relacionadas con la *Flora Peruviana et Chilensis* de Ruiz & Pavón, se incluye la parte correspondiente a la Flora Huayaquilensis de J. Tafalla (Muñoz-Garmendía, 2003; Ruiz, 2007; González-Bueno, 2009). En estos materiales sobre los géneros *Matisia* y *Quararibea* se ha encontrado información correspondiente a cuatro especies completamente identificadas. Dos especies pertenecen al género *Matisia*: a) *M. cordata* Bonpl. [sub *Myrodia cordata*]: descripción, láminas y pliego en herbario MA, (EC. Huayaquil, fl. MA 813252), y b) *M. castano* Pl. & Triana (s.l.), de la que no se conoce lámina y sí pliego de herbario (EC. Huayaquil, “pilchicaspi”, fl. MA 813248). Por otra parte, el género *Quararibea* está representado por otras dos especies: a) *Q. tafallae* Fern.Alonso [sub *Myrodia obovata* Ruiz ined.]: descripción, lámina y espécimen en herbario B –no conservado- (foto!), y b) *Q. caldasiana* Fern. Alonso, s.l., de la que solo conocemos un pliego del herbario MA (Per/Ec. esteril, MA 813246). De este material del herbario histórico de la Flora Peruviana, las colecciones de *M. castano* y de *Q. caldasiana* y *Q. tafallae*, especies que crecen actualmente en zonas

del occidente ecuatoriano y no llegan a darse en Perú, son sin duda asignables a Tafalla y Manzanillo, únicos botánico agregados de la Expedición de la Flora Peruviana que exploraron las regiones del actual occidente de Ecuador (Estrella, 2012). A mediados del siglo pasado, se constató la presencia entre los materiales fotografiados en el herbario de Berlín (B) de un pliego de Tafalla que, como documentamos aquí, se corresponde con el “*Genus nov./ Myrodia obovata*” de su Flora Huayaquilensis (Figura 11); de esta planta no se conocen registros en el herbario original de la Flora Peruviana en Madrid (MA). Analizamos a continuación la situación y la relevancia taxonómica de estos materiales.

a- Precisiones sobre *Myrodia obovata* Ruiz in Tafalla, Flora Huayaquilensis, (1991) [nom. inval.]

Lámina. “*Myrodia obovata*” Ic. 524; V. Molinillo / Xav[ier] Cor[tés] y Alcozer del. Dibujo original de la Expedición de Ruiz y Pavón (1777-1816)- Tafalla Navascués, Juan José. Flora Huayaquilensis [...] Tomus II, t. 145. 1991.

Archivo MA-AJB04-D-1038 (MA). Dibujo original en tinta y acuarela. Identificación. *Myrodia obovata* /Perú[Ecuador!]/Rama florida. Parte inferior, detalles anatómicos: A: flor entera; B, C y D: despiece floral; E y F: fruto y semillas. Manuscritos: relacionados de la misma Expedición: MA-AJB04-M-0004_001_f34, publicados en Tafalla (1991: 190-191)

La lámina 524 del “molinillo” de la Flora Huayaquilensis (Figura 10), de excelente factura, representa especialmente los detalles de los primordios de la rama (yema terminal con estípulas y botones florales con sus bractéolas) y todos los de la disección floral, sumamente precisos (ramas estaminales, anteras y disco estigmático), y deja ver con claridad el estilo inigualable de la escuela de pintores de la Flora de Bogotá, en la que Javier Cortés y Alcocer laboró durante casi una década (1790-1798) para vincularse después a los trabajos de la Flora Peruana a cargo de Tafalla y Manzanillo como experto ilustrador de plantas (González & Amaya, 1993; González-Bueno, 2009). La indicación “Perú” que aparece en la etiqueta del pliego corresponde realmente a Ecuador, tal como se indica en la descripción manuscrita *Habitat Silvis Bulu-Bulu*, región que, como ya se indicó, corresponde a la zona de influencia de Guayaquil (Tafalla, 1989). Con respecto al árbol referido en la Flora Huayaquilensis como *Myrodia obovata* [Ruiz], que aquí se describe como la nueva especie *Quararibea tafallae* Fern.Alonso, cabe precisar algunos puntos sobre los manuscritos transcritos y las láminas publicadas de esta especie en la Flora Huayaquilensis (Tafalla, 1991).

Situación de *Myrodia obovata* [Ruiz] in Tafalla, Fl. Huayaq. (1991) en relación con el código ICBN

La situación de la publicación del nombre *Myrodia obovata* en la citada obra en lo concerniente a las normas del código ICBN (Turland et al., 2018) justifica el nuevo nombre *Quararibea tafallae* asignado aquí a esta planta.

La descripción transcrita, editada y publicada recientemente por Estrella (1989) incluye una serie de correcciones incorporadas *a posteriori* por H. Ruiz al manuscrito original remitido por Tafalla (1991). La descripción original de Tafalla como “Genero Nuevo”, y las varias notas posteriores consignadas por Ruiz y Pavón, incluyen identificaciones alternativas: primero, su asignación al género *Myrodia* y después, las sucesivas identificaciones específicas como *M. affine*, b) *M. verticillata* y c) *M. obovata* para la especie de la iconografía 524, asignada originalmente al Tomo IV de la *Flora Peruviana et Chilensis* (Tafalla, 1991). Si bien la autoría y la secuencia de estas anotaciones quedó bien explicada en la publicación de la Flora Huayaquilensis, el nombre final asignado por H. Ruiz, *Myrodia obovata* Ruiz –nomen–, aparece sin ninguna indicación clara por parte del editor a este respecto ([Estrella, ed.] in Tafalla, 1991). Según el artículo 40.1 del ICBN, al no hacerse referencia a una colección tipo en una publicación posterior al 1 de enero de 1958, “este nombre no estaría validamente publicado.” Asimismo, según el artículo 40.4, después del 1 de enero de 2007, “no sería posible tipificar este nombre con base en la ilustración” en mención, publicada en 1991 (Turland et al., 2018). Esta situación de plantas descritas e iconografiadas en la Flora del Perú que no cuentan con pliegos en el herbario original o

principal de la Expedición, se ha presentado ya en otros casos documentados, como en la familia Orchidaceae (**Pupulin**, 2012a, 2012b). El minucioso análisis de esta familia puso de manifiesto la ausencia de varias ilustraciones, descripciones y pliegos originales, los cuales constaban en las catalogaciones antiguas del legado de la Expedición en Madrid, pero fueron dispersadas en vida de José Pavón, o extraídas en fechas posteriores de los archivos y herbarios de las Floras americanas (**Hiepko**, 1987; **Rodríguez-Nozal**, 1994; **Pupulin**, 2012a). En conclusión, se propone:

Myrodia obovata Ruiz, in Tafalla, Flora Huayaquilensis Tomus II, t. 145. 1991, *nomen inval.*, syn. nov.; = *Quararibea tafallae* Fern.Alonso.

b- *Matisia Eichleri* Schum. [in *schaeda*, nom. nud.] herbario de Berlín (B).

Durante el estudio de las colecciones históricas del género *Quararibea* y otros afines de la tribu Matisieae, localizamos una imagen de una colección [destruida] del herbario B (bajo el nombre inédito de *Matisia Eichleri* Schum.). Este material, que procedía del herbario original de *Flora Peruviana et Chilensis*, sí está directamente relacionada con la lámina y la descripción de *Myrodia obovata* de la Flora Peruviana.

***Matisia eichleri* Schum.** [ined], (F) F0BN009559. //9559/Mus. Bot. Berol.// “*Matisia Eichleri Schum.*” / [fragmentos de la flor diseccionada, pegados y alineados] // *Genus novum... Tafalla/ V. Molinillo / in Huayaquil desc. 299 . ic. 576/ // [Sobre aparentemente con algún fragmento!]. [año]1800/ “Ruiz” [Tafalla!] L.[egit]” //9559/Mus. Bot. Berol.// (Fotografía (F) F0BN009559)!*

La muestra que fuera fotografiada en el herbario B (F0BN009559) y asociada, según etiqueta marcada con el nombre de J.J. Tafalla, a la localidad de Huayaquil [Guayaquil], a las iconografías y descripciones de la Expedición de Ruiz y Pavón, y al nombre *Matisia eichleri* Schum., coincide bien con la planta representada en la lámina 524, *Myrodia obovata*, de la Flora Huayaquilensis conservada en el Real Jardín Botánico (MA-AJB04-D-1038), la cual fue publicada recientemente (**Tafalla**, 1991).

Esta asociación (colecciones históricas, ilustraciones históricas y pliegos recientes), no referida con anterioridad, pudo constatar en el presente trabajo. Asimismo, coincide bien con la *Quararibea tafallae* que se describe por sus hojas con pecíolos de 8–10 mm longitud, láminas con base obtusa, redonda o ligeramene auriculada y asimétrica, pedicelo floral de ca. 6,5–8 mm longitud, con las tres bractéolas distales y cáliz cilíndrico con 10 alas poco elevadas (**Figura 11**).

Desafortunadamente, no se han localizado duplicados de esta colección de Berlín (F0BN009559) en el herbario general de MA, ni en el histórico de la Flora Peruviana. Habría que buscar algún posible duplicado de esta planta en los herbarios que cuentan con colecciones cedidas o distribuidas en su día por Pavón. En este sentido, cabría descartar el herbario FI-W, donde existen al menos 270 plantas de Huayaquil dentro del conjunto de 2.460 muestras de la Expedición de Perú y Chile remitidas por Pavón (**Pichi-Sermoli**, 1950; **Blanco**, 1995).

Por lo señalado se propone:

Matisia eichleri Schum. [ined], nom. nud. [in *schaeda*. Mus. Bot. Berol./ Fotogr. F0BN009559], syn. nov. = *Quararibea tafallae* Fern.Alonso.

Clave para la identificación de las especies de *Quararibea* “grupo *grandifolia*”

1. Flores con cáliz alado longitudinalmente en mayor o menor grado.....2
 - 1'. Flores con cáliz no alado.....7
2. Hojas membranáceas, cartáceas o subcoriáceas, glabras o glabrescentes, no acuminadas, cálices de más de 14 mm de longitud y androceo con ramas estaminales de más de 4,5 mm de longitud.....3
 - 2'. Hojas membranáceas, pubescentes y acuminadas, con cálices de hasta 12–14 mm de longitud y androceo con ramas estaminales de menos de 4 mm de longitud.....6
3. Pedicelo floral 9–18 mm de longitud, bractéolas 3–11 mm de longitud, dispersas en la mitad superior del pedicelo.....4

- 3'. Pedicelo floral de 4–11(13) mm de longitud, bractéolas de 1,5–5 mm de longitud, las tres agrupadas en el tercio o cuarto distal del pedicelo.....5
4. Hojas membranáceas, pecíolo de hasta 10 mm de longitud, láminas estrechamente cuneadas en la base, cáliz floral anchamente campanulado, de 27–31 x 10–12 mm, botón floral y cáliz con 5–10 alas muy conspicuas, de 2–3 mm de alto.....2. **Q. calycoptera** Fern.Alonso & Cornejo
- 4'. Hojas cartáceas o subcartáceas, pecíolo de 10–20 mm de longitud, láminas generalmente redondeadas o subcordadas en la base, cáliz floral cónico-infundibuliforme, de 19–20 x 5–6 mm, botón floral y cáliz con 10 alas o aristas poco desarrolladas, hasta de 0,5 mm de alto.....12. **Q. silverstonei** Fern.Alonso
5. Hojas con pecíolo menor de 10 mm de longitud, láminas oblanceoladas, agudas en la base, pedicelo floral de 4–7 mm de longitud, cáliz floral con 10 alas longitudinales bien marcadas, de ca.1 mm de alto.....8. **Q. grandifolia** (Little) Cuatrec.
- 5'. Hojas con pecíolos de (10)12–20 mm de longitud, láminas oblongas, redondeadas o subcordadas en la base, pedicelo floral de 8–11(13) mm de longitud, cáliz floral anguloso con 5–10 aristas longitudinales poco marcadas o alas de 0,5–0,7(1,0) mm de alto13. **Q. tafallae** Fern.Alonso
6. Flores con pedicelos de 8–10 mm de longitud, cáliz de 12–14 mm de longitud con 10 alas longitudinales, corola de 25–30 mm longitud, columna estaminal de 25–28 mm de longitud, ramas estaminales cortas hasta 2 mm de longitud...10. **Q. recondita** Fern.Alonso
- 6'. Flores con pedicelos de 3–4 mm de longitud, cáliz de 8–9 mm de longitud con 10 alas longitudinales poco conspicuas, corola de ca. 15 mm longitud, columna estaminal de 8–9 mm de longitud, ramas estaminales de 3 mm longitud5. **Q. cornejoi** Fern.Alonso
7. Flores con cáliz de (12)14–25 mm de longitud, frutos mayores de 20–25 mm de longitud.....8
- 7'. Flores con cáliz de 7–11 mm de longitud, frutos pequeños hasta de 20 mm longitud.....11
8. Flores con cáliz de 22–25 mm de longitud, ramas estaminales de 5–7 mm de longitud, fruto subgloboso comprimido distalmente, más ancho que largo, de 38–40 x 42–45 mm11. **Q. ruiziana** Fern.Alonso
- 8'. Flores con cáliz de (12)13–20 mm de longitud, ramas estaminales de (2)2,5–4,5 mm de longitud, fruto más largo que ancho menor de 30 mm de anchura.....9
9. Hojas coriáceas de 10–20 cm longitud, pedicelos florales hasta de 8–11(12) mm longitud, ovario con dos carpelos, fruto recubierto 2/3 partes de su longitud por cáliz urceolado.....1. **Q. cacao** (Triana & Planch.) Baill.
- 9'. Hojas membranoso-cartáceas o cartáceas de 10–25 cm de longitud, pedicelos florales de 12–20 mm longitud, ovario con 2 o 4 carpelos, fruto no recubierto por el cáliz en más de la mitad de su longitud.....10
10. Hojas cartáceas de 14–25 cm de longitud, pedicelos florales de 12–20 mm de longitud, cáliz floral de 13–20 mm de longitud, corola de 35–50 mm de longitud, ramas estaminales de 2–3(4) mm de longitud, ovario con 3–4 lóculos.....7. **Q. funebris** (La Llave) Vischer
- 10'. Hojas membranáceas de 10–13 cm de longitud, pedicelos florales de 12–15 mm de longitud, cáliz floral de 12–14 mm de longitud, corola de 26–30 mm de longitud, ramas estaminales de 4 mm de longitud, ovario con 2 lóculos.....4. **Q. citarensis** Fern.Alonso
11. Hojas membranáceas, ovadas, con domacios membranosos en los nervios del envés, ramas estaminales engrosadas distalmente con las anteras agrupadas de a 4–66. **Q. duckei** Huber

11'. Hojas subcartáceas a cartáceas, oblongas a elípticas, sin domacios en los nervios del envés, ramas estaminales cilíndricas, no engrosadas distalmente y sin las anteras agrupadas12

12. Hojas subcartáceas, oblongas a elípticas, pedicelo floral de 7–10(12) mm de longitud, ramas estaminales largas, de 4–5 mm de longitud, cáliz fructífero recubriendo el fruto hasta la mitad.....3.Q. *casasecae* Fern.Alonso & Castrov.

12'. Hojas cartáceas, anchamente oblongas, pedicelo floral de 10–15 mm de longitud, ramas estaminales de 3–4 mm longitud, cáliz fructífero recubriendo el fruto solamente en el cuarto basal.....9.Q. *latilimbata* Fern.Alonso

Agradecimientos

Para el presente trabajo fueron fundamentales las muestras recibidas para su identificación, así como los préstamos remitidos en los años pasados por colegas de los siguientes herbarios: COL (C. Parra y J. Betancur), CUV (P. Silverstone (†), HUA (F. Cardona), JAUM (A. Cogollo), GB (B. Stahl), GUAY (Carmen Bonifaz, X. Cornejo), MO (J. Solomon), UDBC (W. Ariza) y QCNE (D. Fernández, D. Neill, W. Palacios). Las colecciones (duplicados) recibidas para identificación quedaron depositadas en el herbario COL y algunas en MA. Destaco la colaboración de X. Cornejo (GUAY) y W. Palacios (QCNE), por el envío de algunas imágenes de pliegos de herbario y de campo que fueron importantes para la conclusión de este trabajo. Dos imágenes de *Quararibea tafallae*, de W. Palacios, se publican en este trabajo. Este estudio se llevó a cabo gracias al apoyo del Real Jardín Botánico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y del Ministerio de Ciencia e Innovación de España, que facilitaron los trabajos de revisión en plantas tropicales con cargo a los proyectos Intramural CSIC: 200930I071 y CGL2010-19747. El Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia y su herbario COL apoyaron los trabajos de campo y de revisión relacionados con la familia Malvaceae s.l. Agradezco a los revisores del manuscrito por los valiosos comentarios y aportes recibidos.

Conflicto de intereses

El autor declara que no tiene conflictos de intereses.

Referencias

- Adanero, C.** (2011). Juan Tafalla, botánico navarro, 200 años después. *Revista de la Societat Catalana d'Historia de la Farmacia*, 6(17), 23-32.
- Alverson, W.S.** (1989). *Matisia* and *Quararibea* (Bombacaceae) should be retained as separate genera. *Taxon*, 38(3), 377-388. <https://doi.org/10.2307/1222268>
- Blanco, P.** (1995). Los herbarios de las expediciones científicas españolas al nuevo mundo. *Asclepio*, 47(2), 185-209.
- Cascante-Marín, A., Sánchez-González, J., Alverson, W.S.** 2018. A New *Quararibea* (Malvaceae) from the Caribbean Lowlands of Costa Rica. *Novon*, 26(3), 262-267. <https://doi.org/10.3417/2018106>
- Cervantes-Servín, L.M.** (1999). Estudio etnobotánico, histórico, de manejo y explotación de “rosita de cacao”, *Quararibea funebris* (La Llave) Vischer, Bombacaceae, en los Valles Centrales de Oaxaca. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Ellis, B., Daly, D.C., Hickey, L.J., Johnson, K.R., Mitchell, J.D., Wilf, P., Wing, S.L.** (2009) *Manual of leaf architecture*. Cornell University Press and the New York Botanical Garden Press. <https://doi.org/10.1079/9781845935849.0000>
- Cervantes-Servín, E.** (1989). Introducción histórica: La expedición de Juan Tafalla a la Real Audiencia de Quito (1799–1808) y la “Flora Huayaquilensis”. Tafalla Navasqués J.J. (Ed.). *Flora Huayaquilensis: sive, Descriptiones et icones plantarum Huayaquilensium secundum systema Linnaeanum digestae*. Tomus I. ICONA and Real Jardín Botánico.
- Estrella, E. -ed.-** (1989). Introducción histórica: La real expedición de Juan Tafalla en la Real Audiencia de Quito, Madrid, XIII-CVI.

- Estrella, E.** (2012). *Juan Tafalla. La aportación de la flora Huayaquilensis*. Colección Personajes navarros. Gobierno de Navarra. España.
- Fernández-Alonso, J.L.** (1996). Contribuciones al conocimiento del género *Phragmotheca* Cuatrec. (Bombacaceae-Quararibae). *Caldasia*, 18(3), 253-284.
- Fernández-Alonso, J.L.** (1999). Nueva especie y notas del género *Quararibea* (Bombacaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23 (Suplemento), 49-52.
- Fernández-Alonso, J.L.** (2001a). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae I. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia*, *Quararibea* y *Spirotheca*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 25(95), 183-206.
- Fernández-Alonso, J.L.** (2001b). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae-II. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia* y *Quararibea* del norte de Sudamérica. *Caldasia*, 23(2), 351-382.
- Fernández-Alonso, J.L.** (2006). Revisión taxonómica de *Salvia* sect. *Siphonantha* (Labiatae). *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 63(2), 145-157. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2006.v63.i2.4>
- Fernández-Alonso, J.L.** (2016). *Quararibea*. (Malvaceae). In: Bernal, R., S. R. Gradstein y M. Celis (eds.). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*, Vol. 2. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Fernández-Alonso, J.L.** (2021). Malvaceae Neotropicae novae vel minus cognitae X. Nuevas especies de *Quararibea* de Colombia y Ecuador. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 78 (2), 1-16. e112. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2584>
- Fernández-Alonso, J.L.** (2022a). *Matisia*, *Phragmotheca* y *Quararibea*. En: Bernal, R., S. R. Gradstein y M. Celis (eds.). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Fernández-Alonso, J.L.** (2022b). Malvaceae Neotropicae novae vel minus cognitae XI. Una nueva *Quararibea* de Panamá y notas sobre especies afines. *Caldasia*, 44(3): 641-647. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n3.97215>
- Fernández-Alonso, J.L. & Castroviejo, S.** (2001). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae IV. De *Matisia* et *Quararibea* nonnullis in provincia chocona regni novogranatensis provenientibus. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 59(1), 152-156.
- Fernández-Alonso, J.L. & Cornejo, X.** (2021). *Quararibea calycoptera* (Malvaceae), una nueva especie de los bosques muy húmedos del Pacífico de Ecuador y Colombia. *Acta Botanica Mexicana*, 128: e1960, 1-10. <https://doi.org/10.21829/abm128.2021.1960>
- Fernández de Piedrahita, L.** (1688). *Historia general de las Conquistas del nuevo reyno de Granada*. Verdussen J.B. impr., Amberes. <http://hdl.handle.net/20.500.11938/71740>.
- Ferreira, C.D.M.** (2020). *Quararibea*, in *Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB23600>
- Font i Quer, P.** (1985). *Diccionario de Botánica*. Editorial Labor. Barcelona, España.
- González, B. & Amaya, J.A.** (1996). Pintores de la Expedición Botánica. *Credencial Historia*, 74, 1-15.
- González-Bueno, A.** (2009). La naturaleza en imágenes. Los pintores de la Flora del Nuevo Reyno de Granada. Pp. 211–238. En: B. Ribas Ozonas (ed.). *José Celestino Mutis en el bicentenario de su fallecimiento (1808–2008)*. Instituto de España, Real Academia Nacional de Farmacia.
- Harris, J.G. & Harris, M.W.** (2001). *Plant identification terminology: An illustrated glossary*. 2nd ed. Spring Lake Publishing.
- Hiepkö, P.** (1987). The collections of the Botanical Museum Berlin-Dahlem (B) and their history. *Englera*, 7, 219-252.
- Huber, J.E.** (1915). Bombacaceae. en: *Plantae ducleanae Austro-guyanensis*. *Bulletin de la Société Botanique de Geneve*, ser 2, 6, 186-187.
- Ibáñez, A., Castroviejo, S., Fernández-Alonso, J.L., Correa, M.** (2005). *Catálogo de la flora de la región de Bahía Honda (Veraguas, Panamá)*. En: Castroviejo, S. y A. Ibáñez (eds.) *Estudios sobre la biodiversidad de la región de Bahía Honda (Veraguas, Panamá)*. Biblioteca de Ciencias 20. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España.
- IUCN Standards and Petitions Committee.** (2022). *Guidelines for using the IUCN Red List Categories and Criteria*. Version 15.1. Prepared by the Standards and Petitions Committee. <https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>

- JSTOR.** (2023). *Global Plants database JSTOR*. <https://plants.jstor.org/>
- Linares, J.L.** (2003 [2005]). Listado comentado de los árboles nativos y cultivados en la República de El Salvador. *Ceiba*, 44(2), 105-268.
- Little Jr., E.L.** (1948). New species of trees from western Ecuador. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 38(3), 87-105.
- Little, E.L. & Dixon, R.G.** (1969). Árboles comunes de la provincia de Esmeraldas, Estudio de Preinversión para el desarrollo forestal del Noroccidente de Ecuador, Informe final, Tomo IV. Food and Agriculture Organization.
- Martínez-Salas, E.M., Sousa-Sánchez, M., Ramos-Álvarez, C.H.** (2001). Región de Calakmul, Campeche. *Listados Florísticos México*, 22, 1-55.
- Mociño, J.M. & Sessé, M. de** (2010). *La Real Expedición Botánica a Nueva España 7* (Lamiaceae-Malvaceae). Siglo XXI ed. S.A. y UNAM, Mexico.
- Molina-Rosito, A.** (1975). Enumeración de las plantas de Honduras. *Ceiba*, 19(1), 1-118.
- Muñoz-Garmendía, F.** [ed.] (2003), *La botánica al servicio de la Corona. La expedición de Ruiz, Pavón y Dombey al Virreinato del Perú (1777-1831)*. Barcelona, Lunwerg/CSIC.
- Nelson, C.H.** (2008). *Catálogo de las Plantas Vasculares de Honduras i-xxix*, 31-1576. Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, Tegucigalpa.
- Osorio-Gómez, J.** (2006). *Pueblos itinerantes de Urabá La historia de las exclusiones. Retrato*. Tesis doct. Universidad Internacional de Andalucía (España). https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/63/0004_Osorio
- Pichi-Sermolli, R.** (1950). Le collezione cedute da J. Pavón a F. B. Webb e conservate nell Herbarium Webbianum. *Nuovo Giornale Botanico Italiano*, 56(4), 699-701.
- Pupulin, F.** (2012a). The Orchidaceae of Ruiz & Pavón's "Flora Peruviana et Chilensis". A taxonomic study. I. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 69(1), 21-79. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2295>
- Pupulin, F.** (2012b). The Orchidaceae of Ruiz & Pavón's "Flora Peruviana et Chilensis". A taxonomic study. I. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 69(2), 143-186. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2336>
- QCA-bd.** (2021). *Base de datos del Herbario QCA*. Versión 2021.0. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://bioweb.bio/portal/>
- Ramos-Pérez, J.E. & Silverstone-Sopkin, P.A.** (2018). Catálogo de la flora relictual del valle geográfico del río Cauca. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* 133. Missouri Botanical Garden Press.
- Rodríguez-Nozal, R.** (1994). Las colecciones americanas generadas por las expediciones botánicas de la España Ilustrada: un análisis de su dispersión. *Llull*, 17, 403-436.
- Rodríguez-Nozal, R.** (2004). La obra impresa del programa expedicionario español en América. *Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 3, 35-72.
- Ruiz, H.** (2007). *Relación del viaje hecho a los reinos de Perú y Chile por los botánicos y dibujantes enviados por el Rey para aquella expedición, extractada de los diarios por el orden que llevó en éstos su autor*. Introducción, transcripción y notas de Raúl Rodríguez Nozal y Antonio González Bueno. Madrid, Los Libros de la Catarata.
- Schultes, R.E.** (1957). The genus *Quararibea* in Mexico and the use of its flowers as a spice for Chocolate. *Botanical Museum Leaflets*, 17(9), 247-264.
- Tafalla-Navascués, J.J.** (1989). *Flora Huayaquilensis: sive descriptiones et icones plantarum huayaquilensium secundum systema linnaeanum digestae*. I. ICONA and Real Jardín Botánico, Madrid. <http://bibdigital.rjb.csic.es/ing/FichaLibro.php?Libro=3967>
- Tafalla-Navascués, J.J.** (1991). *Flora Huayaquilensis: sive descriptiones et icones plantarum huayaquilensium secundum systema linnaeanum digestae*. II, icones. ICONA and Real Jardín Botánico, Madrid. <http://bibdigital.rjb.csic.es/ing/FichaLibro.php?Libro=3968>
- Tepe, E.J.** (2018). A series of unfortunate events: the forgotten botanist and the misattribution of a type collection. *Phytokeys*, 109, 33-39. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.109.28144>
- Thiers, B.** (2023). *Index Herbariorum*: A global directory of public herbaria and associated staff. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/>
- Triana, J.J. & Planchon, J.E.** (1862). *Myrodia* Schreb. En: *Prodromus florae novogranatensis. Annales des Sciences Naturelles Botanique, ser. 4, 17*, 324-325.

-
- Tropicos.** (2023). *Tropicos.org*. Missouri Botanical Garden. Missouri, USA. <http://www.tropicos.org/Name/>
- Turland, N.J., Wiersema, J.H., Barrie, F.R., Greuter, W., Hawksworth, D.L., Herendeen, P.S., Knapp, S., Kusber, W.-H., Li, D.-Z., Marhold, K., May, T.W., McNeill, J., Monro, A.M., Prado, J., Price, M.J., Smith, G.F.** (2018). *International code of nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code)* adopted by the Nineteenth International Botanical Congress Shenzhen, China, July 2017. *Regnum Vegetabile* 159. Koeltz Botanical Books, Glashütten.
- Vergara, E.V., Echevarría, H., Serna, F.J.** (2007). Hormigas (Hymenoptera, Formicidae) asociadas al arboretum de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. *Boletín Sociedad Entomológica Aragonesa* 40(2007), 497-505.

Artículo original

Obtención y caracterización estructural de β -D-glucanos de la seta comestible *Pleurotus pulmonarius*

Obtention and structural characterization of β -D-glucan from the edible mushroom *Pleurotus pulmonarius*

Aracely del Carmen García-Cuan^{1*}, Ricardo Gutiérrez-De Aguas²,
Daniel R. Molina-Velasco³, Carlos Silvera-Redondo⁴

¹ Grupo de Investigación de Medicina y Biotecnología, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Libre, Barranquilla, Colombia

² Grupo de Investigación en Química y Biología, departamento de Química y Biología, División de Ciencias Básicas, Universidad del Norte de Barranquilla, Barranquilla, Colombia

³ Laboratorio de Resonancia Magnética Nuclear, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

⁴ Grupo de Investigación en Genética y Medicina Molecular, departamento de Medicina, División de Ciencias de la Salud, Universidad del Norte de Barranquilla

Citación: García-Cuan AdelC, Gutiérrez-De Aguas R, Molina-Velasco DR, *et al.* Obtención y caracterización estructural de β -D-glucanos de la seta comestible *Pleurotus pulmonarius*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):65-78, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefn.2075>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Aracely del Carmen García-Cuan;
aracely450@gmail.com

Recibido: 12 de octubre de 2023

Aceptado: 19 de enero de 2023

Publicado en línea: 7 de febrero de 2024



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

Resumen

Se describe aquí el proceso de extracción, aislamiento y purificación para obtener un extracto crudo de β -D-glucanos de la seta comestible *Pleurotus pulmonarius*. A partir de una mezcla de micelio y cuerpos fructíferos del hongo (basidiocarpóforo), se preparó el extracto crudo, del cual se extrajeron β -D-glucanos en fracción acuosa y alcalina. El extracto crudo en fracción alcalina se purificó por diálisis. En la muestra de la mezcla de micelio y cuerpos fructíferos de la seta se detectaron los β -D-glucanos mediante las técnicas de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y resonancia magnética nuclear de ^1H y ^{13}C . Se confirmó la triple hélice característica de su estructura con el método espectrofotométrico del rojo Congo. Los resultados mostraron que los β -D-glucanos representaban el 32,5 % (p/p) en la seta y el 17,10 % (p/p) en el micelio. Se concluyó que la metodología utilizada para la extracción fue eficaz, al confirmarse la presencia de β -D-glucano en un porcentaje elevado en el hongo *P. pulmonarius*.

Palabras clave: β -D-glucanos; *Pleurotus pulmonarius*; Métodos de extracción.

Abstract

Here, we describe the extraction, isolation, and purification process to obtain a crude extract of β -D-glucans from the edible mushroom *Pleurotus pulmonarius*. From a mixture of mycelium and fruiting bodies of the fungus (basidiocarp), we prepared the crude extract from which we extracted β -D-glucan in aqueous and alkaline fractions. The alkaline fraction in the crude extract was purified by dialysis; in the mycelium and fruiting bodies mixture, β -D-glucans were identified using Fourier-transform infrared spectroscopy and ^1H and ^{13}C nuclear magnetic resonance, confirming the presence of the characteristic triple helix structure by the congo red spectrophotometric method. The results showed that β -D-glucans in the mushroom represented 32.5% (w/w) and 17.10% (w/w) in the mycelium. Therefore, the methodology used for the extraction was effective in confirming the presence of high percentages of β -D-glucans in *P. pulmonarius*.

Keywords: β -D-glucans; *Pleurotus pulmonarius*; Extraction methods.

Introducción

La composición química de los hongos varía según las especies y las condiciones de crecimiento (Smiderle *et al.*, 2012). Las especies de *Pleurotus*, capaces de digerir una gran cantidad de materiales, generan un amplio espectro de enzimas, tienen buenas tasas de desarrollo en diferentes sustratos y producen varios compuestos fúngicos de interés como los polisacáridos β -D-glucanos (Das *et al.*, 2007).

Pleurotus pulmonarius es uno de los hongos con propiedades nutraceuticas con funciones nutricionales y medicinales. Al igual que otras especies del género *Pleurotus*, como *P. ostreatus*, *P. eringyii* y *P. Sajor Caju*, aporta beneficios de tipo metabólico al actuar como antioxidante, reducir las concentraciones plasmáticas de colesterol y glucosa y, además, por su actividad hematológica, antiviral, antibiótica, antitumoral e inmunomoduladora (Cohen *et al.*, 2002; Pizarro *et al.*, 2014). *P. pulmonarius* se consume como hortaliza, pero su producción y su comercialización son todavía limitadas localmente y no se conocen estudios nacionales ni regionales sobre sus propiedades nutricionales y su bioactividad. Dado su contenido de betaglucano, su desarrollo como herramienta terapéutica sería una alternativa económica asequible, efectiva y segura que contribuiría a la prevención de enfermedades.

Para obtener fracciones de mayor pureza del polisacárido, se requieren varios pasos. En general, los β -D-glucanos se extraen usando agua o soluciones acuosas alcalinas a diferentes temperaturas (Ruthes *et al.*, 2013). La purificación es necesaria para eliminar otras sustancias como proteínas, compuestos fenólicos, monosacáridos y disacáridos, aminoácidos y otras moléculas que no hayan sido separadas durante el proceso de extracción. Así, las proteínas pueden eliminarse por precipitación con ácido tricloroacético (20 % p/v) (Rajalingam *et al.*, 2012) mediante un tratamiento con proteasas y el método Sevag (Li X *et al.*, 2012) o utilizando reactivo fenólico (Synytsya *et al.*, 2009). La estructura general más común de los β -D-glucanos (polisacáridos) en vegetales como los cereales, y en algas y setas comestibles del tipo de los basidiomicetos (Pizarro *et al.*, 2014), consiste en una cadena principal formada por unidades de D-glucosa unidas mediante enlaces glicosídicos β (1 $\rightarrow$ 3), que pueden tener o no ramificaciones con enlaces β (1 $\rightarrow$ 6) (Ruthes *et al.*, 2015); se ha demostrado que esta estructura ramificada es más activa en el sistema inmune que los β -D-glucanos de cadena lineal (Smiderle *et al.*, 2008). Estos autores encontraron que la fracción soluble en agua a 100 °C del extracto de la seta comestible *P. pulmonarius* estaba compuesta de fucosa (2 %), xilosa (1 %), glucosa (8 %), manosa (27 %), 3-O-metilgalactosa (15 %) y galactosa (47 %), en tanto que el glucano extraído, un manogalactano con actividades analgésicas (antinociceptivas), analizado por resonancia magnética nuclear estaba constituido por una cadena principal de unidades de α -D-glucopiranosilos y 3-O-metil- α -D-galactopiranosilo unidas por enlaces (1 $\rightarrow$ 6), ambas sustituidas en O-2 por extremos no reductores de β -D-manopiranosilo.

Se describe a continuación el proceso de extracción, aislamiento y purificación mediante la adaptación de varios métodos para obtener un extracto crudo de β -D-glucanos de la seta comestible *P. pulmonarius*.

Materiales y métodos

Condiciones de cultivo del hongo

La cepa de *P. pulmonarius* fue suministrada por el Centro Nacional de Investigación de Café - Cenicafé. La semilla de *P. pulmonarius* se obtuvo a los cinco (5) días de incubación de la cepa en sustrato de maíz (granos) en una caja de Petri (Figura 1). El cultivo se hizo en medio líquido con infusión de papa y sacarosa (200 gramos de papa y 15 g por litro de azúcar de mesa), se ajustó el pH a $5,4 \pm 0,2$ y se esterilizó a 121 °C y 15 lb de presión durante 15 minutos. Se adicionaron 5 a 10 gramos del inóculo de “semilla” del hongo y se incubaron a 28 °C - 32°C sin iluminación y se controlaron la temperatura, el pH y el tiempo de crecimiento de la biomasa micelial. A los 18 días se observó una cantidad de



Figura 1. Etapas del cultivo del hongo *Pleurotus pulmonarius*. **A.** Micelio en medio líquido, infusión de papa liofilizada y sacarosa. **B.** Semilla del hongo *Pleurotus pulmonarius* a los cinco (5) días de incubación de la cepa en maíz (*Zea mays*) en granos. **C.** Bolsas de sustrato con residuos vegetales selladas e inoculadas con semilla del *Pleurotus pulmonarius* en fase micelial, incubación aislada de la luz a temperatura ambiente. **D.** seta comestible *Pleurotus pulmonarius*

biomasa húmeda de aproximadamente 9 g en cada ensayo. Este procedimiento de cosecha de biomasa se repitió hasta obtener 685 g de biomasa micelial húmeda, necesaria para la preparación del extracto crudo de micelio de *P. pulmonarius* (β -D-glucanos).

El cultivo en residuos vegetales se hizo en paquetes de 2 kg de mezcla de sustratos: 25 % de residuos vegetales de frutas y hortalizas más 40 % de maíz en tusa más 29,2 % de poda de hojas de árboles más 0,8-1 % de carbonato de calcio, en una proporción de carbono y nitrógeno de 25:1; estos se trituraron y pasteurizaron previamente a 80 °C durante 10 minutos y se inocularon con 100 gramos de semillas del hongo (un 5 % por paquete de sustrato). Posteriormente, la mezcla se empacó en bolsas de polietileno esterilizadas en autoclave a 121 °C y 15 libras de presión durante 15 minutos. Las bolsas inoculadas se aislaron de la luz para la incubación a 28 – 30 °C en la oscuridad y una humedad de 90 a 96 % hasta que el micelio invadió todo el sustrato; después, se pusieron cerca de la luz diurna (ventana, zona tropical) en un balance entre oscuridad y luminosidad de 60 a 500 unidades lux durante 8 a 12 horas diarias hasta el crecimiento máximo de la seta madura (carpóforos) (López, 2006). El tamaño de los cuerpos fructíferos cosechados 60 días después estuvo entre 5 y 10 cm de diámetro (promedio de 7 cm).

La biomasa micelial y los cuerpos fructíferos se desecaron a 60 °C y se molieron en una picadora Moulinex (tamaño de partícula 1 mm). Para la obtención de la muestra se mezclaron 29,4 y 137,6 g (peso seco) de estos, respectivamente, para un total de 167 g. El polvo de hongo molido resultante se guardó protegido de la luz a una temperatura de 80 °C.

Obtención y método de caracterización del extracto crudo de β -D-glucanos

La extracción de polisacáridos de la seta comestible *P. pulmonarius* se hizo a partir de la modificación de procedimientos de varios autores (Bao *et al.*, 2001; Li X *et al.*, 2012; Li K *et al.*, 2016; Choong *et al.*, 2019).

Extracción de polisacáridos. Se usó una muestra de 1,0 g de polvo molido (peso seco) de la mezcla de micelio y cuerpo fructífero en un proceso de cuatro etapas:

1) La extracción se hizo durante 24 horas con 20 mL de éter de petróleo a 70 °C (3 horas cada vez), baño de agua termostático (WNB45, Memmert GmbH) (Li K *et al.*, 2016). Se centrifugó a 4500 rpm por 15 minutos y se disolvió el residuo con agua Millipore (proporción 1:4). Las proteínas se eliminaron añadiendo el reactivo de Sevag

(cloroformo + n-butanol (5:1) en una proporción de 2:1) en cuatro ocasiones (**Li et al.**, 2012). Se centrifugó a 4500 rpm durante 15 minutos cada vez, se agregó etanol 95 % (proporción de 1:4) al sobrenadante y el residuo resultante se liofilizó y conservó a -80°C .

2) Se pesó 1,0 g del extracto crudo de polisacáridos obtenido en fracción alcalina (NaOH). Se agregaron 20 mL de agua Millipore y se calentó a $95-100^{\circ}\text{C}$ por 3 a 4 horas; el calentamiento se repitió seis veces en un lapso de 24 horas. Se centrifugó a 4500 rpm a 4°C por 15 minutos, se separó el sobrenadante y se almacenó como fracción soluble en agua caliente. El residuo obtenido (**Liu et al.**, 2014; **Palacios et al.**, 2016) se disolvió en 20 mL de NaOH 1M y se calentó a $95-100^{\circ}\text{C}$ durante 3 a 4 horas, repitiendo el calentamiento seis veces en un lapso 24 horas; así como se hizo con el agua caliente, se centrifugó a 4500 rpm a 4°C por 15 minutos y se recolectó el sobrenadante rotulándolo como fracción-NaOH. El residuo se desechó. Se precipitaron los polisacáridos disueltos en el sobrenadante añadiendo etanol 95 % en una proporción de 2:1 v/v. Se centrifugó a 4500 rpm a 4°C por 15 minutos y el precipitado volvió a disolverse con agua Millipore en una proporción de 1/4, rotulándolo como extracto crudo– fracción NaOH.

3) Para la desproteinización con proteinasa K (20 mg/mL, 100 μL por cada 5 mL de extracto) del extracto crudo de polisacáridos - fracción NaOH después del ajuste a pH 8,0, se incubó con proteinasa K (rango de pH: 4,0-12,5, pH óptimo: 8,0) a 37°C durante la noche (también se puede incubar a 56°C por 4 horas). La modificación del método de adición de esta enzima que degrada proteínas (proteasa), se hizo para optimizar la eliminación de proteínas remanentes al usar el reactivo de Sevag (**Li et al.**, 2012) y así aumentar la pureza del polisacárido. Se adicionó después ácido tricloroacético (TCA) al 20 % (p/v) en proporción v/v para precipitar las proteínas residuales (**Rajalingam et al.**, 2009).

4) Para la purificación se agregó NaOH 1 M al sobrenadante, con el fin de neutralizar el ácido tricloroacético (TCA) antes de la precipitación con NaCl 1 % (p/v) y etanol 95 % en proporción de 2:1 de los polisacáridos presentes en el sobrenadante. El precipitado se disolvió en 5 mL de agua Millipore de tipo I y se ajustó a pH neutro antes de ser dializado. En la diálisis se usó un tubo de membrana de diálisis (Spectra/Por™ 3 RC, MerckMillipore) de 0,45 mm y límite de peso molecular de 3500 daltons en agua Millipore de tipo I durante seis horas y hasta las 48 horas, cambiando el agua cada dos horas. El contenido retenido dentro del tubo de diálisis se liofilizó, se pesó y se guardó a -80°C . Para su uso, este extracto crudo – fracción NaOH de β -glucanos (denominado así de aquí en adelante) se reconstituyó con 5 mL de agua Millipore y se ajustó a pH neutro; los polisacáridos aislados, identificados y reconocidos provenían de este extracto.

En todas las etapas se hicieron pruebas de identificación y reconocimiento de los compuestos presentes como impurezas, tales como proteínas (usando la reacción cualitativa de Biuret y el método espectrofotométrico de rojo pirogalol con el kit de Byosistem S.A.) (**Watanabe et al.**, 1986). Asimismo, en la etapa 4 se hicieron pruebas después de la diálisis para identificar y reconocer carbohidratos, monosacáridos y disacáridos reductores (reacción cualitativa de Benedict, GODPAP- Byosistem S.A.) y polisacáridos (pruebas de Molish y Lugol) (**Iturbe & Sandoval.**, 2011). Las pruebas de detección de proteínas, glucosa oxidasa/peroxidasa y la de Benedict fueron negativas, en tanto que la de Molish fue positiva, indicando la presencia de polisacáridos complejos en el extracto crudo – fracción NaOH dializado.

Cuantificación de azúcares totales. Se utilizó el método de fenol-sulfúrico modificado (**Dubois et al.**, 2016) para la determinación de azúcares en el extracto crudo dializado, obtenido de 1,0 g de hongo molido de *P. pulmonarius* (mezcla de micelio y cuerpo fructífero). El producto final del liofilizado (peso = 7,1 mg) se disolvió en 5 mL de agua Millipore de tipo I.

La curva de calibración se hizo con D-glucosa (MercK) a distintas concentraciones: 3; 5; 8,5; 12,5; 25 y 50 $\mu\text{g/mL}$ (no se muestra aquí con $R^2=0,9869$). Las absorbancias se realizaron a una longitud de onda de 490 nm en un lector de microplaca (Thermo Scientific™

Multiskan™ Go) a los 25 min contra blanco de agua Millipore de tipo I. Todos los análisis se hicieron por duplicado. La muestra se preparó tomando 17,6 μ L del extracto crudo y completando el volumen con agua Millipore de tipo I hasta los 500 μ L. Se agregaron, además, 500 μ L de fenol al 5 % (p/v) y 2500 μ L de H_2SO_4 concentrado.

Medición de β -glucanos de la seta comestible *P. pulmonarius*. Para estimar la concentración del β -(1 $\rightarrow$ 3) (1 $\rightarrow$ 6)-D-glucano en la muestra molida de la mezcla de micelio y cuerpo fructífero, se usó el método enzimático (exo-1,3 β -glucanasa / β -glicosidasa / amiloglicosidasa / glucosa oxidasa / peroxidasa) (K-EBHLG®, Megazyme International) en un espectrofotómetro Thermo Fisher Scientific Multiskan™ GO Microplate (Satitmanwivat *et al.*, 2012). El β -glucano se determinó por la diferencia entre el β -glucano total y el α -glucano (AOAC Method 996.11). El control de β -glucano de levadura (*Aspergillus niger*, 49 % de pureza) fue suministrado por K-EBHLG®-Megazyme (Ireland). Todas las muestras y el control se analizaron por duplicado.

Demostración de la estructura de triple hélice. En el extracto crudo dializado de *P. pulmonarius* se evaluó con el método espectrofotométrico del rojo Congo el cambio en el máximo de absorción visible del color (λ : 488 – 516 nm), producto de la formación del complejo β -1,3-D-glucano-rojo Congo (Wood, 1980), para demostrar la conformación de la triple hélice de los β -1,3-D-glucanos en *P. pulmonarius* (Nitschke *et al.*, 2011).

Los β -glucanos del hongo se aislaron siguiendo la metodología de Sietsma *et al.* (1977), Nitschke *et al.* (2011) y Semedo *et al.* (2014), lo que se hizo por triplicado a partir de 10 mg de micelio o cuerpo fructífero del hongo molidos y desecados a 60 °C. Se prepararon las siguientes fracciones: fracción KOH, fracción HCl y fracción NaOH. Como patrón se utilizó el β -1,3-D-glucano de levadura con un 80 % de pureza (Megazyme, Ireland).

Determinación de la longitud de onda y la concentración de rojo Congo. En el espectro-fotómetro (Thermo Fisher Scientific Multiskan™ GO Microplate) se hizo un barrido espectral de las longitudes de onda de 300 a 700 nm con las fracciones - NaOH extraídas del micelio y los cuerpos fructíferos utilizando rojo Congo 0,08 %. El control positivo fueron 150 μ g/mL de β -1,3-D-glucano con 80 % de pureza (Megazyme, Ireland) y el control negativo, un blanco sin β -glucano. Con una concentración constante de estas soluciones, se determinó en cada una la longitud de onda en la que se presentó el pico máximo de absorbancia.

Ensayo del efecto de la concentración de NaOH en el máximo de absorción del complejo rojo Congo- β -1,3-D-glucano. En un ensayo por duplicado con las fracciones NaOH y KOH extraídas de la mezcla de micelio y cuerpo fructífero, se evaluó la formación del complejo β -1,3-D-glucano con rojo Congo a partir del cambio en el máximo de absorción visible del color en orden creciente de concentración de NaOH (rango: 0 a 2,0 M) (Semedo *et al.*, 2014). Las lecturas de la absorbancia se hicieron con un espectrofotómetro UV/VIS (Thermo Fisher Scientific Multiskan™ GO Microplate) en la longitud de onda en que presentaron el pico de máxima absorción.

Determinación de la concentración de β -1,3-D-glucano en el extracto-fracción NaOH de *P. pulmonarius*. Definidos los parámetros del método, la concentración del rojo Congo, el tiempo de reacción, la temperatura ambiente y la longitud de onda de máxima absorbancia (Semedo *et al.*, 2014), se determinó la curva de calibración (no se muestra aquí). Para ello, se pesaron 750 μ g (0,75 mg) de β -1,3-D-glucano (Megazyme) con 49 % de pureza y se disolvieron en 5,0 mL de NaOH 1,0 M para preparar el estándar de β -1,3-D-glucano de 150 μ g/mL. En tubos de ensayo se agregaron 35, 70, 140, 210, 280 y 350 μ L de la solución estándar para completar un volumen de 350 μ L con agua Millipore de tipo I después de ajustar a pH neutro con HCl y agregar 300 μ L de tampón (50 μ L de ácido cítrico/didróxido de sodio 0,2 M, pH 7.0, y 20 μ g/mL de rojo Congo preparado con el mismo tampón). Las absorbancias del complejo de color resultante se hicieron a 505 nm (Nitschke *et al.*, 2011). Todas las concentraciones de las soluciones estándar y las muestras se prepararon por triplicado.

Preparación de las muestras. Se agregó tampón (ácido cítrico/hidróxido de sodio 0,2 M, pH 7.0) a 22 mL del extracto-fracción NaOH de *P. pulmonarius* hasta completar un volumen de 525 µL. De esta dilución se extrajeron 350 µL para la reacción de color, empleando 300 µL de tampón (ácido cítrico/NaOH, 0,2 M, pH 7,0) y 50 µL de solución de rojo Congo. Se calculó el resultado según el dato registrado en la curva de calibración.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). La determinación de la configuración anomérica de los monosacáridos se analizó mediante espectroscopía infrarroja en un interferómetro IRAffinity-1S (Shimadzu). Se analizaron las moliendas de tres fuentes de β-glucanos; estas muestras se maceraron con polvo de KBr de grado espectrofotométrico y se prensaron en gránulos de 1 mm (rango de frecuencia de 4000-400 cm⁻¹).

Espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN) de ¹H y ¹³C. Se utilizó un espectrómetro Bruker Avance III (9.4 T) de 400 MHz y una sonda de 5 mm. Se analizaron muestras de hongo molido, mezcla de micelio y cuerpo fructífero y extracto crudo - fracción NaOH dializado de *P. pulmonarius*, y como control se empleó un β-1,3-D-glucano obtenido de levaduras con 80 % de pureza (Megazyme, Ireland). Se disolvieron aproximadamente 25 mg de cada muestra en 600 µL de DMSO-d₆ (99,8 %) y sulfóxido de dimetilo-D₆ con tetrametilsilano (TMS) 0,03% (Merck). Los análisis se realizaron a 45 °C. Para los espectros de protones se utilizó la secuencia de pulso zg30 y para los del carbono-13, la zgpg30. Con el TMS se ajustó la escala de desplazamiento químico (0,00 δ, ppm).

Resultados y discusión

Eficiencia biológica (EB) del cultivo del hongo P. pulmonarius

Esta se determinó expresando en porcentaje la relación entre el peso fresco de los hongos producidos y el peso del sustrato seco, utilizando la ecuación (1):

$$\%EB = \frac{\text{Peso de biomasa húmedo} \times 100}{\text{Gramos de sustrato}} = \quad (1)$$

La eficiencia biológica de la producción de biomasa de las setas húmedas fue del 60 %, lo que se considera un valor óptimo (Romero *et al.*, 2000; García, 2003; Fernández, 2004).

Caracterización estructural de los β-D-glucanos del extracto crudo obtenido

Contenido de polisacáridos totales. El contenido de azúcares totales del extracto crudo de polisacáridos dializado según la técnica de fenol sulfúrico fue de 1.198 mg en el liofilizado (peso=7,1 mg) y de 119,89 mg por cada 100 g de hongo molido (peso seco), expresado como glucosa.

Contenido de β-1,3:1,6-D-glucano en la muestra original. Cabe destacar el contenido de β-1,3-1,6-D-glucano analizado con el método enzimático (exo-1,3-β-glucanasa / β-glicosidasa / amiloglicosidasa / glucosaoxidasa / peroxidasa) de Megazyme, pues las muestras de polvo molido de micelio y cuerpo fructífero del hongo original dieron un porcentaje total del 32,5 % (p/p) en la seta y de 17,10 % (p/p) en el micelio. Estos datos son semejantes a los reportados por otros autores (Ruthes *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2017). McCleary & Draga (2016) encontraron que el peso seco del cuerpo fructífero de los hongos comestibles *Pleurotus ostreatus* y de *P. eringyii* fue de 32,3 % y 37,1 %, respectivamente. Satitmanwivat *et al.* (2012) registraron un 30,5 % de contenido de β-glucanos del polvo de *P. sajor-caju* y reportaron que en los hongos *Ganoderma lucidum*, *Lentinus edodes*, *Coriolus versicolor*, *Agaricus bisporus*, *Flammulina velutipes*, *Agaricus blazei* Murill, *P. ostreatus*, *Phellinus linteus*, *Gyrophora esculenta*, *Auricularia auricular*, *Inonotus obliquus* y *P. eryngii* el contenido de β-glucanos determinados con el kit de Megazyme (Ireland) fluctuó entre el 4,7 y el 46,2 % en peso seco. Por el contrario, Baeva *et al.* (2019) encontraron en fracciones extraídas de *P. eryngii* un contenido de β-glucanos entre 45 y 60 %.

Confirmación de la estructura de triple hélice

Espectro de absorción UV-vis del complejo 1,3- β -glucano en rojo Congo. La **figura 2** muestra la región de máxima absorción en los espectros de absorción de las mezclas de rojo Congo al 0,08 % con soluciones de β -1,3-1,6-D-glucano, las cuales revelaron un cambio batocrómico en las longitudes de onda de máxima absorción (480 a 505 nm), y un desplazamiento de 25 nm por la interacción específica del β -1,3-1,6-D-glucano de triple hélice ramificada de *P. pulmonarius*, datos similares a los publicados en otros estudios (Nitschke *et al.*, 2011; Semedo *et al.*, 2014).

Estudio de la estructura conformacional de triple hélice mediante la transición hélice-espiral en solución de NaOH. La **figura 3** muestra la evaluación del efecto de varias concentraciones de NaOH y KOH (rango de 0 a 2 M) en los espectros de absorción de los complejos formados con el rojo Congo y los polisacáridos presentes en el extracto crudo dializado de β -glucanos extraídos del micelio y el cuerpo fructífero de *P. pulmonarius*.

En las curvas espectrales del complejo rojo Congo- β -1,3-glucanos, se observaron los cambios en los máximos de absorción visibles debidos a las condiciones alcalinas en concentraciones crecientes, que rompieron los enlaces de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares y las interacciones hidrofóbicas estabilizadoras de la unión del polisacárido y la molécula del rojo Congo, lo que revela el cambio transicional de la triple hélice a una conformación en espiral.

Se encontró que la absorción máxima disminuyó después de la adición de NaOH 0,5 M y KOH 0,4 M a la reacción de rojo Congo y 1,3- β -glucanos. Estos resultados son comparables a los obtenidos por otros investigadores (Palacios *et al.*, 2012; Semedo *et al.*, 2014). Mediante este método de reacción con el rojo Congo se comprobó que los β -1,3-glucanos triple helicoidales son la forma dominante de los β -glucanos presentes en el micelio y el hongo *P. pulmonarius*.

Concentración de β -1,3-D-glucano del extracto crudo - fracción NaOH de *P. pulmonarius* según el método de rojo Congo. La cantidad de β -1,3-D-glucano con triple hélice presente en el extracto crudo - fracción NaOH lograda con este método

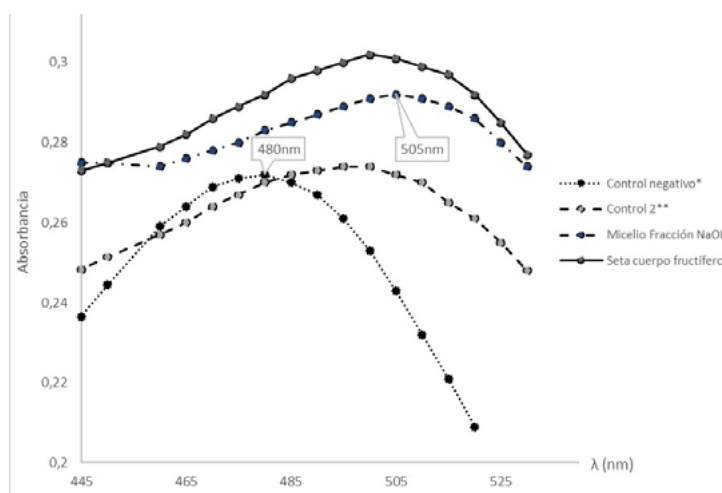


Figura 2. Región del espectro de absorción UV-vis del complejo rojo Congo- β -1,3-1,6-D-glucano del hongo *P. pulmonarius* a la longitud de onda de máxima absorción. Efecto batocrómico entre el rojo Congo y las soluciones neutralizadas de β -1,3-1,6-D-glucano de micelio-fracción-NaOH y de cuerpo fructífero - fracción NaOH de la seta comestible *Pleurotus pulmonarius* *Control negativo: sin β -Glucano; se reemplazó el volumen de la muestra-fracción NaOH por agua Millipore de tipo I más rojo Congo y se completó con NaOH 1M. **Control positivo: estándar de β -1,3-D-glucano, 80 % de pureza, 150 μ g/mL (Megazyme, Ireland) en solución de NaOH 1 M con pH neutro

Fuente: Datos propios

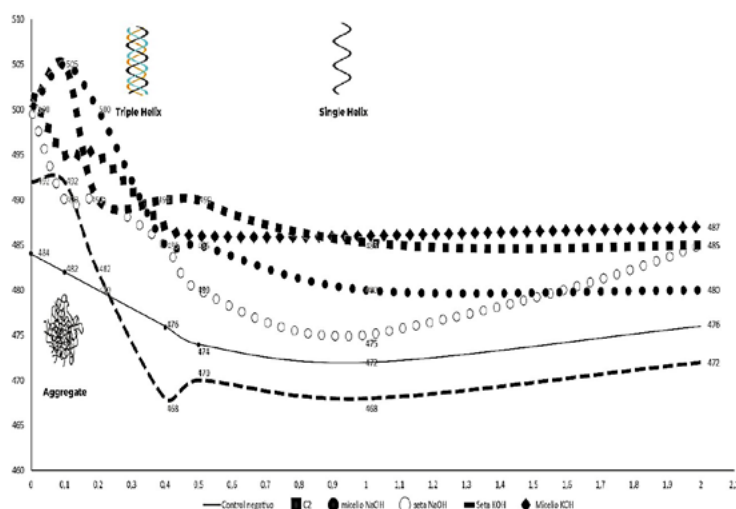


Figura 3. Demostración de la conformación de la triple hélice de los β -1,3-D-glucanos del hongo *Pleurotus pulmonarius* con rojo Congo. Acción de la concentración de NaOH y KOH sobre el máximo de absorción del complejo rojo Congo-1,3- β -glucanos. Control negativo: solución de NaOH más rojo Congo sin β -glucano. Control positivo: 1,3- β -glucano extraído de levaduras (Megazyme, Ireland: 80,0 % p/p de pureza; impurezas < 1 % de α -glucano).

de extracción y aplicando diálisis para el proceso de purificación, fue de 6,3 μ g en el liofilizado (peso=7100 μ g) y 6,3 mg/100 g de la mezcla de micelio y cuerpo fructífero (peso seco) del hongo molido. Con este método colorimétrico del rojo Congo, **Nitschke *et al.* (2011)** determinaron la cantidad de β -1,3-D-glucano en diferentes hongos comestibles y reportaron que variaba de 0,41 a 3,28 g/100 g en micelios y de 1,92 a 12,91 g/100 g en cuerpos fructíferos (peso seco); entre los hongos se hallaba *P. pulmonarius*, con 0,25 g en la fracción NaOH de un total de 0,41 g/100 g (peso seco). También **Semedo *et al.* (2015)** informaron en su estudio una biomasa de $7,44 \times 10^{-1} \pm 4,67 \times 10^{-2}$ mg/100 g del contenido de la fracción NaOH extraída de la seta *P. ostreatus*. No obstante, debe tenerse en cuenta que el contenido de β -1,3-D-glucano puede variar dependiendo del método de extracción utilizado, la forma y los nutrientes empleados en el cultivo y la etapa de crecimiento de la seta durante su recolección. Asimismo, estas propiedades químicas pueden influir en la biodisponibilidad y, por lo tanto, en la actividad biológica (**Palacios *et al.*, 2012**).

Confirmación de la estructura del β -glucano por transformada de Fourier. Los espectros infrarrojos por FTIR de las fracciones obtenidas se muestran en la **figura 4**. Se observan los picos 1.662; 1.409; 1.317; 1.246; 1.078; 1.043; 929 y 879 cm^{-1} , característicos de hongos estudiados por otros autores (**Synytsya *et al.*, 2014**). Además, se reconocen otros compuestos presentes en la muestra como los grupos amida de proteínas en la banda comprendida entre el pico 1.662,64 y 1.246 cm^{-1} y los α -D-glucanos en los picos 930; 879; 771 y 532,3 cm^{-1} (**Synytsya *et al.*, 2014**).

En la **figura 4A** se observa en el espectro de la muestra molida (micelio y cuerpo fructífero) de *P. pulmonarius* una banda entre los 2250 y los 2375 cm^{-1} , característica de la presencia de los enlaces amida (N-H) de las proteínas (**Yang *et al.*, 2012**), lo que contrasta con lo observado en la **figura 4B**, donde esta no aparece debido al proceso de purificación del extracto crudo - fracción NaOH. En la **figura 4A** también se observan varios picos en la región entre los 700 y los 1200 cm^{-1} en los tres espectrogramas de FTIR (hongo molido, avena y levadura): las bandas intensas superpuestas de las vibraciones de estiramiento de CO y CC, entre los 950 y los 1200 cm^{-1} , corresponden a enlaces betaglicosídicos y la configuración piranoide de los polisacáridos; además, entre los 500 y los 950 cm^{-1} se observan otros picos (no señalados aquí) de diferentes grupos funcionales, como el grupo

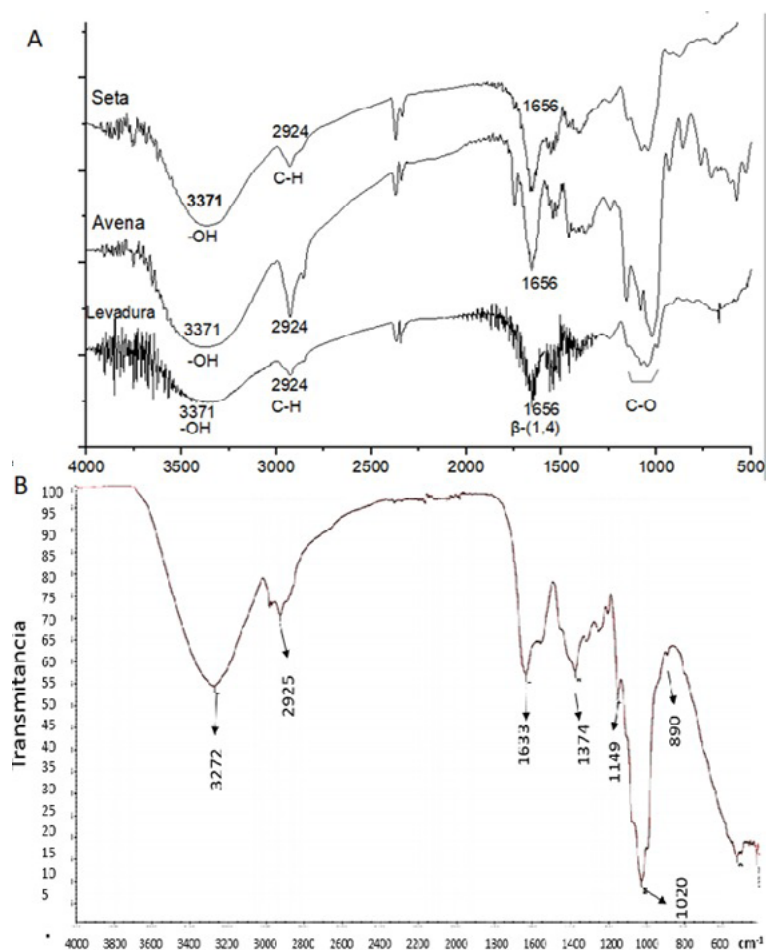


Figura 4. A. Espectro IR de tres fuentes de β -glucanos: seta molida (micelio más cuerpo fructífero) de *P. pulmonarius*, avena (*Avena sativa*) y levadura (*Saccharomyces cerevisiae*). B. Espectro IR del extracto crudo - fracción NaOH de la seta *P. pulmonarius* (micelio más cuerpo fructífero)

hidroxilo del carbono C1 anomérico de la glucosa (los diastereoisómeros α y β), que confirman la complejidad de la estructura química de los polisacáridos de la levadura, la avena y la seta (Gutiérrez *et al.*, 1996; Baeva *et al.*, 2019).

En la figura 4B, se observa en el extracto crudo - fracción NaOH de *P. pulmonarius* (micelio + cuerpo fructífero) un pico débil alrededor de los 890 cm^{-1} asignado a los enlaces anoméricos específicos para β -glucanos, característicos de la estructura de estos polisacáridos (Ramírez, 2016; Zhou *et al.*, 2019). Según Synytsya *et al.* (2009) y Gutiérrez *et al.* (1996), el espectro FTIR muestra varios picos en la región entre los 890 y los 1400 cm^{-1} , correspondientes a enlaces glicosídicos β (1 $\rightarrow$ 3), siendo los de 1020, 1149 y 1374 cm^{-1} producto de residuos de glucosa (1,3)-di-O- sustituida típicos de los β -glucanos.

En las figuras 4 A y B, se observa entre los 1630 y los 1660 cm^{-1} un pico fuerte, característico del enlace O-glicosídico β (1 $\rightarrow$ 4) (Amaya & Ardila, 2016). Los grupos hidroxilos (OH) de los carbohidratos se encuentran a los 3000 a 3500 cm^{-1} del enlace β -O-glicosídico (Wade, 2011; Ramírez, 2016; Du *et al.*, 2017).

Liu *et al.* (2011) consideraron que la amplia banda alrededor de los 3.401,32 cm^{-1} era un estiramiento debido al hidroxilo de los polisacáridos, y que la banda débil a los 2.921,86 cm^{-1} mostraba la vibración de estiramiento de C-H. La absorbancia a los 1.642,09 cm^{-1} indicaba presencia de H_2O unida. Asimismo, los autores asignaron a los α -glucanos la banda cercana a los 843,11 cm^{-1} .

Los datos obtenidos en el espectro FTIR de la muestra original de polvo molido de seta y micelio de *P. pulmonarius* (**Figura 4 A**) son semejantes a los publicados en otros estudios del β -1,3-1,6-D-glucano de hongos (Synytsya *et al.*, 2009); Liu *et al.*, 2011; Vetvicka *et al.*, 2013; Semedo *et al.*, 2014; López *et al.*, 2021).

Análisis de la resonancia magnética nuclear. En la **figura 5** se observan los dos espectros RMN ^1H del polisacárido, tanto del control como el del extracto crudo dializado – fracción alcalina de la seta *P. pulmonarius*, con picos de carbono anomérico a 5,1 y 4,51, característicos de los enlaces α y β , respectivamente.

Según Palacios *et al.* (2012), los picos representativos de carbohidratos correspondían a las señales de protones anoméricos (H1), entre 4,5 y 5,1 ppm de glucósidos, y las H2, H3, H4, H5 y H6 correspondían a 3,01 - 4,36 ppm del anillo glicosídico. Las señales de desplazamiento del carbono anomérico (C1) del glucósido se atribuyeron a las 100 – 104 ppm. Los carbonos C2, C4 y C5 del anillo glicosídico se expresaron entre las 70 y las 80 ppm. Por otro lado, se observa una máxima señal en el carbono C3 a 87 ppm, lo que puede atribuirse a la presencia de residuos con enlaces 1,3 (Chenghua *et al.*, 2000); el C6 se observó entre las 60 y 62 ppm. Así, las relaciones entre protones y carbonos respaldan las asignaciones propuestas de los átomos H1/C1 (4,51/103,1),

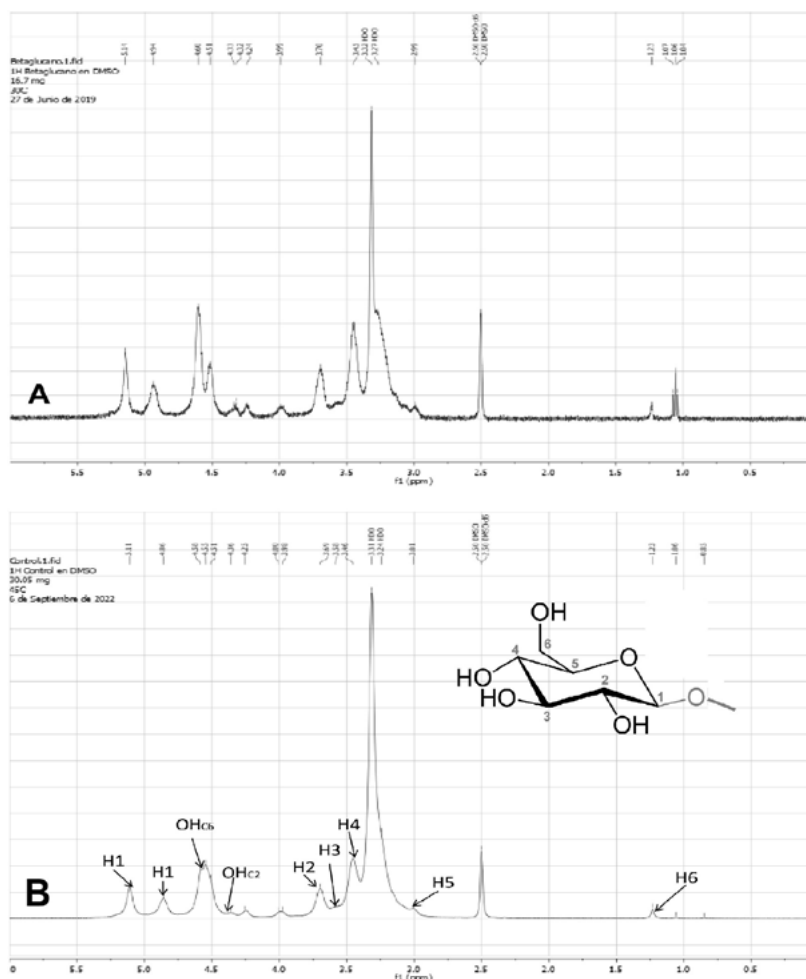


Figura 5. Resonancia Magnética-RMN ^1H (400MHz) del Extracto Crudo de polisacáridos del hongo *Pleurotus pulmonarius*. **A.** Extracto crudo de β glucano – fracción NaOH obtenido de *P. pulmonarius* purificado por diálisis. **B.** Control de 1,3- β -D- glucano, 80 % de pureza (Megazyme, Ireland). Los desplazamientos químicos se expresan en ppm.

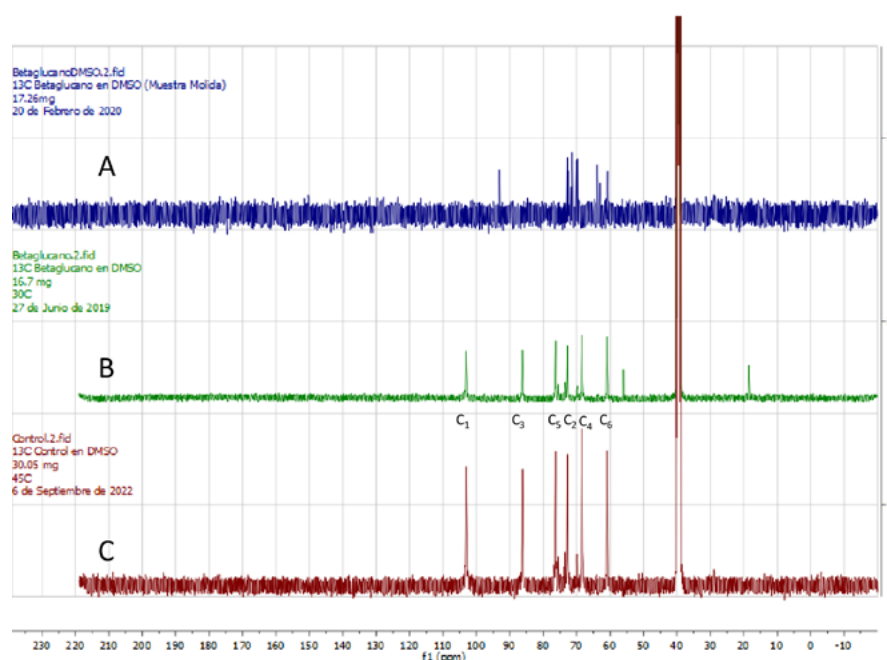


Figura 6. Espectro de RMN ^{13}C de polisacáridos disueltos en sulfóxido de dimetilo-D6 con TMS 0,03 % a 100 MHz y 45 °C de temperatura. **A.** Hongo *P. pulmonarius* molido (mezcla de micelio y cuerpo fructífero). **B.** Extracto crudo de β glucano – fracción alcalina obtenido de *P. pulmonarius*. **C.** Control de 1,3- β -D-glucano, 80 % de pureza (Megazyme, Ireland). Los desplazamientos químicos se expresan en ppm.

H2/C2 (3,46/73,03), H3/C3 (3,69/87), H4/C4 (3,01/69,8), H5/C5 (3,01/76,32), que confirman la presencia de la configuración de los residuos de β -D- glucopiranosilo en el polisacárido (Ojha *et al.*, 2010). La señal de desplazamiento de H6/C6 se observó a 3,58/60,87.

Según los resultados de la RMN del extracto crudo dializado – fracción alcalina, el espectro se correlacionó adecuadamente con los espectros conocidos para glucanos de estructura similar (Gorin, 1981; Ruthes *et al.*, 2013). La cadena $\beta(1\rightarrow3)$ glicosídica quedó evidenciada por la aparición de la señal correspondiente al C-anomérico a 103,8 ppm, característica de uniones β , y la señal a 87,9 y 87,2 ppm característica de C-3, O-sustituido (Figura 6). La señal alrededor de las 61 ppm corresponde al C-6 no sustituido tanto en la cadena central como en el extremo no reductor de las ramificaciones, y la señal a 72 ppm corresponde, en cambio, al C-6, O-sustituido, del punto de ramificación. En la muestra de hongo molido (mezcla de micelio y cuerpo fructífero) también se evidencian señales similares de desplazamiento H2/C2, H6/C6 de los residuos de β -D-gucopiranosilo y H6/C6 (3,01/69,8), correspondiente al enlace α (1 $\rightarrow$ 6).

Conclusiones

En el estudio se utilizaron métodos de extracción discontinua, aislamiento, purificación y caracterización de un extracto crudo de β -(1 $\rightarrow$ 3) (1 $\rightarrow$ 6)- D-glucano de *P. pulmonarius*. Entre los métodos se incluyó el tratamiento con proteinasa K para el mejoramiento de la pureza del polisacárido, evitando la presencia de proteínas y logrando un β -D-glucano con su conformación nativa de triple hélice, la cual es crucial para la actividad inmunomoduladora.

La metodología utilizada para la extracción no es novedosa, ya que los recursos tecnológicos fueron limitados, pero sí fue fundamental y eficaz porque permitió confirmar la presencia de β -D-glucano con un elevado porcentaje en el hongo *P. pulmonarius*.

La información obtenida sobre la implementación de métodos de cultivos artesanales con recursos propios de la región y las pruebas para la detección y cuantificación de betaglucanos pueden servir de base en líneas de investigación futuras con impacto en la salud, la nutrición y la economía.

Agradecimientos

A la Universidad Libre por el soporte financiero del proyecto, a las Universidades del Norte, Industrial de Santander y del Atlántico por su apoyo técnico y por facilitar la infraestructura.

Conflicto de intereses

Ninguno declarado.

Referencias

- Amaya, L. & Ardila, J.** (2016). Evaluación del proceso de obtención de polisacáridos tipo glucano presentes en la *Ganoderma lucidum* a nivel laboratorio para nutrisetas s.a.s. Tesis para optar al grado de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América Facultad, Bogotá, D.C.
- Baeva E., Bleha R., Lavrova E., Sushytskyi L., Copíková J., Jablonsky I., Kloucek P., Synytsya A.** (2019). Polysaccharides from Basidiocarps of Cultivating Mushroom *Pleurotus ostreatus*: Isolation and Structural Characterization. *Molecules*, 24, 2740. <https://doi.org/10.3390/molecules24152740>
- Bao XF, Liu CP, Fang JN, Li XY.** (2001). Structural and immunological studies of a major polysaccharide from spores of *Ganoderma lucidum* (Fr.) Karst. *Carbohydrate Research*, 332, 67-74.
- Chenghua, D, Xiangliang, Y, Xiaoman, G, Yan, W, Jingyan, Z, Huibi, X.** (2000). A β -D-glucan from the sclerotia of *Pleurotus tuber-regium* (Fr.) Sing. *Carbohydrate Research*, 328, 629-633.
- Choong, Y.-K, Ellan, K, Chen, X.-D., Azuar-Mohamad, S.** (2019). Extraction and Fractionation of Polysaccharides from a Selected Mushroom Species, *Ganoderma lucidum*: A Critical Review. *Fractionation*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78047>
- Cohen, R.L, Persky, L., Hadar, Y.** (2002). Biotechnological applications and potential of Wood-degrading mushroom of the genus *Pleurotus*. *Applied Microbiology Biotechnology*, 58, 582-594.
- Das, N. & Mukherjee, M.** (2007). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* on weed plants. *Bioresource Technology*, 98(14), 2723-2726.
- Du, B., Yang, Y., Bian, Z., Xu, B.** (2017). Characterization and Anti-Inflammatory Potential of an Exopolysaccharide from Submerged Mycelial Culture of *Schizophyllum commune*. *Frontiers in Pharmacology*, 8, 252. <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00252>
- Dubois, M., Gilles, K., Hamilton, J., Rebers, P., Smith, F.** (1956) Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356.
- Fernández, F.** (2004). *Guía de producción de setas (Pleurotus spp.)*. Fungitec Asesorías. México.
- García, M.** (2003). Cultivo de setas y trufas. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Gorin, P. A. J.** (1981). Carbon-13 Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of Polysaccharides. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*, 13, 104. [https://doi.org/10.1016/s0065-2318\(08\)60309-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2318(08)60309-1)
- Gutiérrez, A., Prieto, A., Martínez, A.T.** (1996). Structural characterization of extracellular polysaccharides produced by fungi from the genus *Pleurotus*. *Carbohydrate Research*, 281, 143-154.
- Iturbe, F. & Sandoval, J.** (2011). Análisis de Alimentos. Fundamentos y Técnicas. Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química, México. https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/14545/mod_resource
- Li, K., Yu, M., Hu, Y., Ren, G., Zang, T., Xu, X., Qu, J.** (2016). Three kinds of *Ganoderma lucidum* polysaccharides attenuate DDC-induced chronic pancreatitis in mice. *Chemico-Biological Interactions*, 247, 30-38.
- Li, X., Zhao, R., Zhou, H.L., Wu, D.H.** (2012). Deproteinization of polysaccharide from the stigma maydis by sevag method. *Advanced Materials Research*, 340, 416-420.
- Liu, Y., Zhang, J., Tang, Q., Yang, Y., Guo, Q., Wang, Q., Wu, D., Cui, S.W.** (2014) Physicochemical characterization of a high molecular weight bioactive- β -glucan from the fruiting bodies of *Ganoderma lucidum*. *Carbohydrate Polymers*, 101(30), 968-974.

- Liu, J., Zhang, Ch., Wang, Y., Yu, H., Liu, H., Wang, L., Yang, X., Liu, Z., Wen, X., Sun, Y., Yu, Ch., Liu, L. (2011) Structural elucidation of a heteroglycan from the fruiting bodies of *Agaricus blazei* Murill. *International Journal of Biological Macromolecules*, 49, 716-720.
- López, C. & Hernández, R. (2006). Evaluación de crecimiento y producción de *Pleurotus ostreatus* sobre diferentes residuos agroindustriales del departamento de Cundinamarca. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia.
- McCleary B.V. & Draga, A. (2016). Measurement of β -Glucan in Mushrooms and Mycelial Products. *Journal of AOAC International*, 99(2), 364-373.
- Megazyme International. (2014). Enzymatic yeast beta-glucan assay procedure (K-EBHLG), Ireland. https://secure.megazyme.com/files/Booklet/K-EBHLG_DATA.pdf
- Nitschke, J., Modick, H., Busch, E., Wantoch, X., von Rekowski, R., Altenbach, HJ, Mölleken H. (2011). A new colorimetric method to quantify β -1,3-1,6-glucans in comparison with total β -1,3-glucans in edible mushrooms. *Food Chemistry*, 127, 791-796.
- Ojha, A.K., Cnandra, K., Ghosh, K., Islam, S. (2010). Glucans from the alkaline extract of an edible mushroom, *Pleurotus florida*, cv *Assam Florida*: isolation, purification, and characterization. *Carbohydrate Research*, 345, 2157-2163. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2010.06.015>
- Palacios, I., García-Lafuente, A., Guillamón, E., Villares, A. (2012). Novel isolation of water-soluble polysaccharides from the fruiting bodies of *Pleurotus ostreatus* mushrooms. *Carbohydrate Research* 358, 72-77.
- Pizarro, C. S., Ronco M, A. M., Gotteland R, M. (2014). β -Glucanos: ¿Qué tipos existen y cuáles son sus beneficios en la Salud? *Revista Chilena de Nutrición*, 41 (4), 439-446. <http://doi.org/10.4067/S0717-75182014000400014>
- Rajalingam, D., Loftis, C., Jiashou, J.X., Kumar, T.K.S. (2009). Trichloroacetic acid-induced protein precipitation involves the reversible association of a stable partially structured intermediate. *Protein Science*, 18(5), 980-993.
- Ramirez-Jilly, M.A. (2016). Characterization and Safety Evaluation of Exopolysaccharide Produced by *Rhodotorula minuta* BIOTECH 2178. *International Journal of Food Engineering*, 2(1), 31-35. <https://doi.org/10.18178/ijfe.2.1.31-35>.
- Romero, J., Rodríguez, M., Pérez, R. (2000). *Pleurotus ostreatus*. Importancia y tecnología del cultivo. Grupo de Nutrición, Departamento de Física-Química, Facultad de Mecánica, Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez.
- Ruthes, A.C., Carbonero, E.R., Córdovac, M.M., Baggio, C.H., Soares-Santos, A.R., Sassaki, G.L., Cipriani, T.R., Gorina, P.A., Iacomini, M. (2013). *Lactarius rufus* (1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 6)- β -d-glucans: Structure, antinociceptive and anti-inflammatory effects. *Carbohydrate Polymers*, 94, 129-136.
- Ruthes, A. C, Rattamann, Y. D, Malquevicz-Paiva, S. M., Carbonero, E. R, Córdova, M. M, Baggio, C. H, Santos, A. R. S., Gorin, P. A. J., Iacomini, M. (2013). *Agaricus bisporus* fucogalactan: Structural characterization and pharmacological approaches. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 184-191.
- Ruthes, A., Fhernanda, R., Iacomini, M. (2015). D-Glucans from edible mushrooms: A review on the extraction, purification and chemical characterization approaches. *Carbohydrate Polymers*, 117, 753-761. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.051>
- Satitmanwivat, S., Ratanakhanokchai, K., Laohakunjit, N., Kuoping-Chao, L., Chen, S., Pason, P., Tachaapaikoon, Ch., Lay-Kyu, K. (2012). Improved purity and immunostimulatory activity of β -(1 $\rightarrow$ 3) (1 $\rightarrow$ 6)-Glucan from *Pleurotus sajor-caju* Using Cell Wall-Degrading Enzymes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 5423–5430. <https://doi.org/10.1021/jf300354x>
- Semedo, M.C., Karmali, A., Fonseca, L. (2014). A high throughput colorimetric assay of β -1,3-D-glucans by Congo red dye. *Journal Microbiological Methods*, 109, 104-108. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2014.12.020>.
- Sietsma, J. H. & Wessels, J. G. H. (1977). Chemical analysis of the hyphal wall of *Schizophyllum commune*. *Biochimica et Biophysica Acta*, 496, 225–239.
- Smiderle, F.R., Olsen, L.M., Ruthes, A.C., Czelusniak, P.A., Santana-Filho, A.P., Sassaki, G.L., Gorin, P.A.J., Iacomini, M. (2012). Exopolysaccharides, proteins and lipids in *Pleurotus pulmonarius* submerged culture using different carbon sources *Carbohydrate Polymers*, 87, 368-37.
- Smiderle, F. R., Olsen, L. M., Carbonero, E. R., Marcon, R., Baggio, C.H., Freitas, C. S., Santos, A. R. S., Torri, G., Gorin, P. A. J., Iacomini, M. (2008). A 3-O-methylated manno-galactan from *Pleurotus pulmonarius*: Structure and antinociceptive effect. *Phytochemistry*, 69, 2731-2736.

- Synytsya, A., Mícková, K., Synytsya A, Jablonsky, I., Speváček, J., Erban, V., Kováříková, E., Copíková, J. (2009). Glucans from fruit bodies of cultivated mushrooms *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus eryngii*: Structure and potential prebiotic activity. *Carbohydrate Polymers* 76, 548-556. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.11.021>
- Synytsya, A. & Novak, M. (2014). Structural analysis of glucans. *Annals of Translational Medicine*, 2(2) 17.
- Vetvicka, V. & Novak, M. (2013). Beta- Glucan, Biology and Chemistry of Beta Glucan and Specific Application. Benthan Books, Science Publishers.
- Wade, L. (2011). Química orgánica, Volumen I, séptima edición, *Espectroscopia infrarroja*. Pearson educación, México.
- Watanabe, N., Kamel, S., Ohkubo, A., Makino, K., Tokuda, K. (1986). Urinary proteins measured with a Pyrogallol Red-Molybdate Complex, Manually and in a Hitachi 726 Automated Analyzer. *Clinical Chemistry*, 32(8), 1551-1544.
- Wood, P.J. (1980). Specificity in the interaction of direct dyes with polysaccharides. *Carbohydrate Research*, 85, 271-287. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)84676-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)84676-5)
- Xu, S., Dou, Y., Ye, B., Wu, Q., Wang, Y., Hu, M., Ma, F., Rong, X., Guo, J. (2017). *Ganoderma lucidum* polysaccharides improve insulin sensitivity by regulating inflammatory cytokines and gut microbiota composition in mice. *Journal of Functional Foods*, 38, 545-552.
- Yang, W., Pei, F., Shi, Y., Zhao, L., Fang, Y., Hua, Q. (2012). Purification, characterization and anti-proliferation activity of polysaccharides from *Flammulina velutipes*. *Carbohydrates Polymers*, 88, 474-480.
- Zhou, F.F., Zhang, Y.D., Zhang, Q., Lu, J., Liu, Y., Wang, J.H. (2019). Structure characterization and immunological activity of a β -glucan from *White H. marmoreus* and its silver nanoparticle derivatives. *Carbohydrate Polymers*, 210, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.057>

Natural Sciences

Original article

First Record of *Parasphaerosyllis malimalii* (Polychaeta: Syllidae) from Gorgona Island (Colombian Pacific)

Primer registro de *Parasphaerosyllis malimalii* (Polychaeta: Syllidae) en la isla Gorgona (Pacífico colombiano)

Edgardo Londoño-Cruz^{1,2,*}, María Fernanda Cardona-Gutiérrez¹,
Mario H. Londoño-Mesa³

¹ Grupo de Investigación en Ecosistemas Rocosos Intermareales y Submareales Someros (LITHOS),
Universidad del Valle, Cali, Colombia

² Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (INCIMAR), Universidad del Valle, Cali, Colombia

³ Grupo de Investigación LimnoBasE y Biotamar, Instituto de Biología, Universidad de Antioquia, Medellín,
Colombia

Abstract

A new polychaetes species, *Parasphaerosyllis malimalii* (Syllidae), inhabiting coral colonies of *Pocillopora* spp., was described on Coiba Island (Pacific coast of Panama). For a more precise description and additional ecological remarks, we examined and measured 73 *P. malimalii* specimens found in dead fragments of *Pocillopora* spp. in the context of two research projects on bioerosion in Gorgona Island (Colombian Pacific coast) between March 1998 and December 1999, and June 2015 and August 2018. The average ($\pm$ SD) length (in mm) of the specimens from the first (n=38) and second (n=35) projects were 2.84 (0.42) and 8.86 (3.24), respectively. The largest specimen was collected in the second project and measured 15.4 mm. The pygidium of this species has a pair of cirri slightly thicker and longer than the parapodial cirrus. These polychaetes usually inhabit dead corals and nest in vacant galleries left by borers. This record extends *P. malimalii* distribution range southward to Gorgona Island. We are confident to find the species in other coral reefs in the area, and we propose to circumscribe its distribution to the Tropical Eastern Pacific.

Keywords: Taxonomic description; *Pocillopora* spp.; Coral reefs; Cryptofauna; Tropical Eastern Pacific.

Resumen

Una nueva especie de poliqueto, *Parasphaerosyllis malimalii* (Syllidae), fue descrita habitando colonias del coral *Pocillopora* spp. en la isla Coiba (costa pacífica de Panamá). Para mejorar su descripción y proporcionar características ecológicas adicionales, se examinaron y midieron 73 especímenes de *P. malimalii* encontrados en fragmentos muertos de *Pocillopora* spp en el marco de dos proyectos de investigación sobre bioerosión coralina en la isla Gorgona (costa pacífica colombiana) durante marzo de 1998 y diciembre de 1999 y junio de 2015 y agosto de 2018. La longitud (mm) promedio ($\pm$ DE) de los especímenes del primer (n=38) y segundo (n=35) proyectos fue de 2,84 (0,42) y 8,86 (3,24), respectivamente. El espécimen más grande se recolectó en el segundo proyecto y midió 15,4 mm. El pigidio de esta especie tiene un par de cirros ligeramente más gruesos y largos que los cirros parapodiales. Estos poliquetos habitan principalmente coral muerto y anidan en las galerías vacías dejadas por organismos perforadores. Con este registro, el rango de distribución de *P. malimalii* se extiende al sur hasta la isla Gorgona. Confiamos en que la especie habite en otros arrecifes coralinos del área, así que proponemos que su distribución se circunscriba al Pacífico Este Tropical.

Palabras clave: Descripción taxonómica; *Pocillopora* spp.; Arrecife de coral; Criptofauna; Pacífico Este Tropical.

Citation: Londoño-Cruz E, Cardona-Gutiérrez MF, Londoño-Mesa MH. First Record of *Parasphaerosyllis malimalii* (Polychaeta: Syllidae) from Gorgona Island (Colombian Pacific). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):79-85, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1982>

Editor: Hernando Campos

***Corresponding autor:**
Edgardo Londoño-Cruz;
edgardo.londono@correounivalle.edu.co

Received: August 31, 2023

Accepted: January 23, 2024

Published on line: February 7, 2024



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

Introduction

According to several authors (**Zapata & Robertson**, 2007), the inventory of marine species is far from being complete, and almost daily new species or records are reported for specific regions. Although all taxa listings are incomplete, the distribution of the “lack of knowledge” is biased towards certain groups that contribute more to the list of new species than others. These groups (*e.g.*, mollusks in marine ecosystems and insects in terrestrial ones) support more “pressure” on researchers and fans, and this, among others, may explain the imbalance between taxa in the report of new species (**Bouchet**, 2006).

It is believed that most groups of marine organisms have a huge potential to contribute to the lists of new species and the efforts to know the total number of species. Polychaetes are a highly diverse and ecologically important group with around 25000 species (**Dean et al.**, 2011, **WoRMS**, 2023). They can outnumber common groups like mollusks and crustaceans in some habitats (*e.g.*, sediments). Still, they are frequently overlooked due to the cryptic lifestyle of most species (**Londoño-Cruz et al.**, 2003). This allows for increasing the list of known species for the group. Although Colombia is recognized as a highly biodiverse country, the reporting of new species is not as common as would be expected. According to **Bouchet** (2006; see Fig 2.3), the scarcity of new findings in developing countries like Colombia might be due to low research funds for this kind of task.

At the beginning of the century, **Capa et al.** (2001a) described a new species of polychaete (*Parasphaerosyllis malimalii*) belonging to the Syllidae family inhabiting coral colonies of the genus *Pocillopora* on Coiba Island (Panama Bight region, Pacific coast). Regardless of recent efforts (**Cardona-Gutiérrez & Londoño-Cruz**, 2020a), the knowledge of the polychaete fauna in the Colombian Pacific coast is still poor, including relatively well-studied localities like Gorgona Island (in the same biogeographic region as Coiba Island). Here we report for the first time on the island the presence of this relatively common species of polychaete in coral reefs to complement *P. malimalii* description and provide some ecological remarks on the species (*e.g.*, habitat preferences). This record extends the distribution range for the species from Coiba to Gorgona Island and perhaps to the entire Tropical Eastern Pacific (TEP).

Materials and methods

During 1998-1999 and 2015-2018, two independent research projects on coral reef bioerosion were carried out on Gorgona Island, Pacific coast of Colombia. Due to the lack of knowledge of this group and the focus on boring organisms (including polychaetes), specimens of *P. malimalii* found during the first project were overlooked. During a visit of Guillermo San Martín (co-author of *P. malimalii* original description) to Universidad del Valle (Cali, Colombia), preserved samples from the first project were rechecked, and some specimens of the species previously described on the Panamanian island were found, a finding reconfirmed with fresh ones collected during the second research project.

The samples were collected from dead branches of corals (*Pocillopora* spp.) in Playa Blanca and La Azufrada fringing reefs in the southeast of Gorgona Island (2°58'10" N; 78°11'05" W, on the Colombian Pacific) (**Figure 1**) between March 1998 and December 1999 (P1) and between June 2015 and August 2018 (P2). The experimental units were deployed at depths between 1 and 4 meters during low tide (5 to 8 meters in high tide); after collection, they were examined, and the associated cryptofauna (including the worms) was sorted and identified (**Londoño-Cruz**, 2001; **Londoño-Cruz et al.**, 2003; **Cardona-Gutiérrez & Londoño-Cruz**, 2020a, b). In these projects, 38 (P1) and 35 (P2) *Parasphaerosyllis malimalii* Capa, San Martín & López, 2001 (Syllidae, Polychaeta) specimens were found.

The specimens were described, and photographs of the body and setae were taken (**Figure 2**). Then, they were hydrated with distilled water (approx. 4 hrs), cleared using chloral hydrate, and stained with acid fuchsin at the same time for approximately 40 min.



Figure 1. Sites (Playa Blanca and La Azufrada fringing reefs) in Gorgona Island (Colombian Tropical Eastern Pacific – TEP), where *P. malimalii* specimens were found and collected

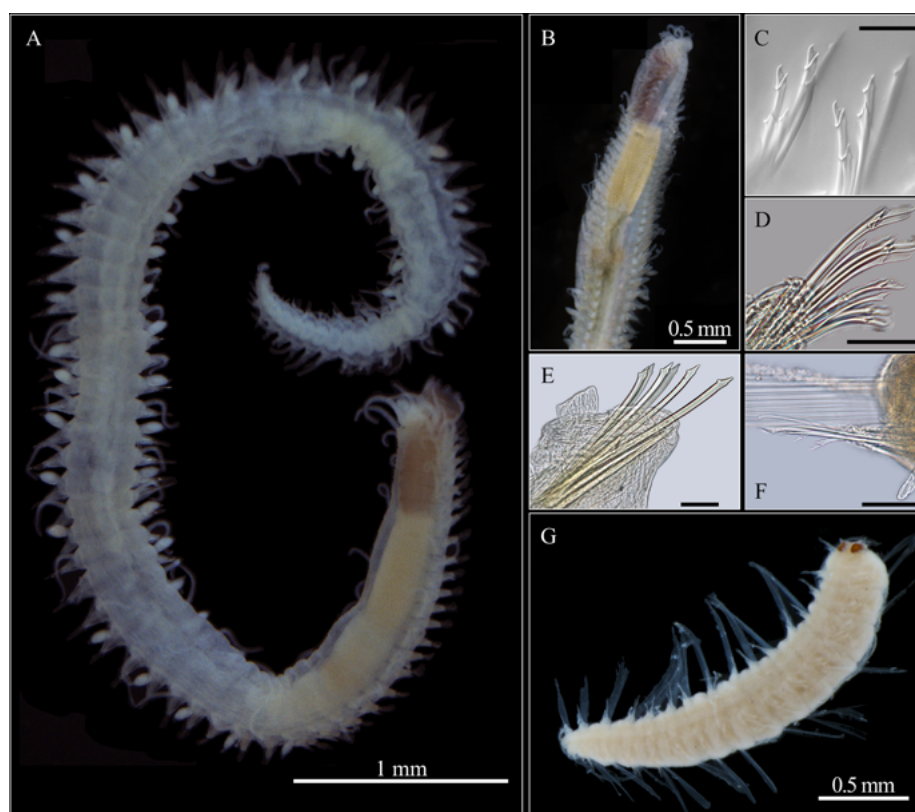


Figure 2. *Parasphaerosyllis malimalii*: **A.** Complete specimen. **B.** Anterior end and pharynx. **C.** Anterior most neuropodial falcigers. **D.** Anterior neuropodial falcigers. **E.** Posterior neuropodial hooks. **F.** Epitoke. **G.** Epitoke middle neuropodial falcigers

Finally, they were dehydrated with copal-phenol (approx. 30 min) and mounted on slides with Canadian balsam. The P1 project specimens were lost; however, their data (i.e., length) was saved in a database. The P2 project specimens were deposited in the Reference Collection of Marine Organisms at Universidad del Valle in Cali, Colombia (CRBMUV), under voucher numbers UNIVALLE: CRBMUV:2017-001 to UNIVALLE: CRBMUV:2017-018. Holotype and paratype (from Coiba Island, Panama) were deposited at the National Museum of Natural Science in Madrid, Spain (MNCN 16.01/6107).

Results

Taxonomy

Class Polychaeta Grube, 1850

Order Phyllodocida Dalles, 1962

Family Syllidae Grube, 1850

Genus *Parasphaerosyllis* Monro, 1937

Species *Parasphaerosyllis malimalii* Capa, San Martín & López, 2001

General description

Following **Capa et al.** (2001a), species belonging to *Parasphaerosyllis* are characterized by a prostomium wider than long with two pairs of eyes and three monoliform antennae; palps oval, slightly longer than prostomium, fused at their bases. They present bulbous, lemon-shaped dorsal cirri alternated with moniliform cirri on the middle posterior part of the body. Specifically, *P. malimalii* is characterized by anterior parapodia, each with 6-7 compound chaetae with bidentate, falcigerous blades, distal tooth acute and proximal one smaller, with short spines. The number of chaeta on each parapodium progressively decreases, having enlarged shafts in the dorsal ones and no blades. The midbody posterior region has long moniliform cirri alternating with other dorsal cirri, ovoid and bulbous, with an unarticulated terminal knob. **Capa et al.** (2001a) mention that the first bulbous cirri appear on chaetigers 20 (left side) and 24 (right side) and on paratype bulbous cirri on chaetigers 25 and 27, respectively. Our specimens match the paratype's description in the first bulbous cirri on chaetigers 25 (left side) and 27 (right side). Middle and posterior segments only have simple, very thick chaetae, with 3-5 on each parapodium, and two aciculae in each anterior parapodium. The pharynx extends through nine segments and the pharyngeal tooth is on the anterior end. While in **Capa et al.** (2001a) specimens, the proventriculus extends through six chaetigers, in ours, it extends through eight. They have thick, simple chaetae on the midbody and posterior parapodia and shorter blades of compound chaetae, with very small proximal tooth, as in **Capa et al.**'s specimens (2001a).

Although no statistical analyses were performed for this work, it is clear from our data that the average ($\pm$ SD) length (mm) of the P2 project specimens, 8.86 (3.24, n=35), was much larger than that of P1 specimens, 2.84 (0.42, n=38); the largest worm collected at Playa Blanca fringing reef measured 15.4 mm. The average size (6.6 mm), then, of the type material (two specimens: the holotype and one paratype) is within our specimens' size range.

All specimens showed clear segmentation, with segments as long as twice the notopodial length (**Figure 2A**); short palps and anterior antennae (**Figure 2A, B**); pharynx evident; alternating long notopodial cirri with short, bulb-like notopodial cirri in contiguous segments from middle (about segment 21) to posterior end. Notopodia with capillary chaetae, anterior most neuropodia with short-blade falcigers, and subsequent neuropodia with long-blade falcigers (**Figure 2C, D**); middle and posterior neuropodia with simple hooks without blade, a pair of aciculae below them (**Figure 2E**), and pygidium with a pair of cirri slightly thicker and longer than the parapodial cirri. Epitoke appears short, with two big amber eyes (**Figure 2F**), the first four segments with short capillary notochaetae and, after, capillary chaeta as long as four times the notopodial length, and neuropodial falcigers with short blade (**Figure 2G**).

Discussion

Genus *Parasphaerosyllis* Monro, 1937 comprises only five described species: *P. ezoensis* Imajima & Hartman, 1964; *P. indica* Monro, 1937; *P. malimalii* Capa, San Martín & López, 2001; *P. setoensis* Imajima, 1966, and *P. uschakovi* (Chlebovitsch, 1959) (Read & Fauchald, 2021). The genus' main characteristic is the presence of bulbous, lemon-shaped dorsal cirri alternating with moniliform cirri towards the middle-posterior body region (Capa *et al.*, 2001a; San Martín *et al.*, 2008). *Parasphaerosyllis malimalii* was first found and described from samples of *Pocillopora* corals collected at the Coiba National Park in Panama. The description was based only on two specimens with no posterior end.

From the records, we can say that *P. malimalii* inhabits coral reefs. All three specimens collected (Capa *et al.*, 2001b, and the two projects in this paper) were associated with *Pocillopora* spp. colonies or fragments of coral branches from species belonging to this genus. It is hard to state that *P. malimalii* inhabits exclusively corals of this genus, but pocilloporids are the most common and abundant TEP corals (Londoño-Cruz *et al.*, 2003), so there is a positive link. It is worth noting that the individuals found at Gorgona Island appeared in the experimental units exposed for one year or longer in all the zones in both reefs (Londoño-Cruz, 2001). It was also common at a reef patch (Gorgonilla Island patch reef), which may reflect *P. malimalii* selectivity for older (perhaps degraded) reef substrate and the fact that it is not an early colonizer, preferring experimental units highly bored and covered with coralline algae instead of green and brown fresh algae or live tissue. The galleries (tubes) where *P. malimalii* was found were broader than the specimens, and, therefore, the species can be classified as a nester, i.e., those using cavities made by borers (Cantera *et al.*, 2003; Hutchings, 2008). The Panama specimens were found in a similar habitat: dead coral covered with coralline algae (Capa *et al.*, 2001a). Another interesting fact is that the Playa Blanca and La Azufrada fringing reefs (Gorgona Island) and the Rosario reef (northern Coiba Island) are leeward reefs so we may assume that they prefer relatively calm environments.

Finally, polychaetes from the Colombian Pacific are poorly studied. Up to date, there are only seven Syllidae species reported, six occurring in Gorgona Island: *Branchiosyllis exilis* (Gravier, 1900); (as *Syllis fuscotuburata* in Monro, 1933); *Haplosyllis spongicola* (Grube, 1855); *Syllis cornuta* Rathke, 1843; *S. gracilis* Grube, 1840; *S. hyalina* Grube, 1863, and *Trypanosyllis taeniaeformis* (Haswell, 1886) (Herrera, 2011). This number is low compared to the records in the Galapagos (Ecuador) and Coiba (Panama) islands, with more than 40 species in each location (Blake, 1991; Westheide, 1991; Capa *et al.*, 2001b; Salazar-Vallejo & Londoño-Mesa, 2004; Capa & Hutchings, 2006) and Cocos Island (Costa Rica), with 20 recorded species (Dean *et al.*, 2011), most of them present in the three islands. Gorgona, Coiba, Galapagos, and Cocos islands belong to the same biogeographical region and are part of the TEP Biological Corridor, so they are expected to have similar marine fauna because of the seasonal geostrophic currents (Rodríguez-Rubio *et al.*, 2003) connecting the marine biota on this region. With this new record, the distribution range of *P. malimalii* is extended hundreds of nautical miles to the south; we are confident that it inhabits other coral reefs in the area for which we propose to circumscribe its distribution to the entire TEP, at least where coral reefs exist, and branched pocilloporid coral species are present and abundant. It is not strange for polychaetes to have large distribution ranges since they usually spend long periods as plankton and can be dispersed over large distances depending on ocean circulation (Caley *et al.*, 1996; Ekman, 1996). However, further research is required to unambiguously confirm the presence of this species at the locations we hypothesize it must exist since Dean *et al.* (2011) did not record it at Cocos Island.

Acknowledgments

We thank Guillermo San Martín (Universidad Autónoma de Madrid) for identifying the P1 project specimens and Dr. Ranulfo González for helping with the photographs.

Universidad del Valle provided logistical support to E. Londoño-Cruz and M.F. Cardona-Gutiérrez (contribution No. 25, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (INCIMAR), Universidad del Valle).

Author contributions

ELC conceived and executed the research projects in whose context the samples presented in this manuscript were collected. ELC and MFCG executed field activities, collection, and identification of specimens. MFCG and MHLM corroborated species identification and completed their description. ELC wrote the manuscript, and MFCG and MHLM proofread and reviewed it.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Blake, J. A.** (1991). The Polychaete Fauna of the Galápagos Islands. In James M.J. (Ed.), *Galápagos Marine Invertebrates* (pp. 75-96). Plenum Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0646-5_4
- Bouchet, P., Billet, D., Boxshall, G. A., Boyen, C., Charrier, B., Cock, J. M.** (2006). 2. The magnitude of Marine Biodiversity. In F. BBVA (Ed.), *The Exploration of Marine Biodiversity Scientific and Technological Challenges* (pp. 31-64). https://www.fbbva.es/TLFU/dat/02Bouchet_Exploration.pdf
- Caley, M. J., Carr, M. H., Hixon, M. A., Hughes, T. P., Jones, G. P., Menge, B. A.** (1996). Recruitment and the local dynamics of open marine populations. In *Annual Review Ecology, Evolution and Systematics*, 27, 477-500.
- Cantera K., J. R., Orozco, C., Londoño-Cruz, E., Toro-Farmer, G.** (2003). Abundance and distribution patterns of infaunal associates and macroborers of the branched coral (*Pocillopora damicornis*) in Gorgona Island (Eastern Tropical Pacific). *Bulletin of Marine Science*, 72(1), 207-219.
- Capa, M. & Hutchings, P. A.** (2006). Terebellidae (Polychaeta) from Coiba National Park, Panamanian Pacific, including description of four new species and synonymy of the genus *Paraeupolymnia* with *Lanicola*. *Zootaxa*, 1375, 1-29. www.mapress.com/zootaxa/
- Capa, M., San Martín, G., López, E.** (2001a). Description of a new species of *Parasphaerosyllis* (Polychaeta: Syllidae: Syllinae). *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 114 (1), 280-284.
- Capa, M., San Martín, G., López, E.** (2001b). Syllinae (Syllidae: Polychaeta) del Parque Nacional de Coiba, Panamá. In *Revista de Biología Tropical*, 49, 103-115. www.ucr.ac.cr/www.ots.ac.cr/www.ots.duke.edu
- Cardona-Gutiérrez, M. F. & Londoño-Cruz, E.** (2020). Boring worms (Sipuncula and Annelida: Polychaeta) from Tropical Eastern Pacific coral reefs (Gorgona Island, Colombia). *Bulletin of Marine and Coastal Research*, 49(2), 9-24. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2020.49.2.924>
- Cardona-Gutiérrez, M. F. & Londoño-Cruz, E.** (2020). Boring worms (Sipuncula and Annelida: Polychaeta): their early impact on Eastern Tropical Pacific coral reefs. *Marine Ecology Progress Series*, 641, 101-110. <https://doi.org/10.3354/meps13298>
- Dean, H. K., Sibaja-Cordero, J. A., Cortés, J.** (2012). Polychaetes (annelida: Polychaeta) of Cocos Island National Park, Pacific Costa Rica. *Pacific Science*, 66(3), 347-386. <https://doi.org/10.2984/66.3.8>
- Eckman, J. E.** (1996). Closing the larval loop: linking larval ecology to the population dynamics of marine benthic invertebrates. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 200, 207-237.
- Herrera, L.** (2011). Aspectos de la biodiversidad y ecología de los anélidos poliquetos del Pacífico colombiano [Tesis de Doctorado]. Universidad del Valle.
- Hutchings, P.** (2008). Role of polychaetes in bioerosion of coral substrates. In M. Wisshak & L. Tapanila (Eds.), *Current Developments in Bioerosion* (pp. 249-264). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77598-0_13
- Londoño-Cruz, E.** (2001). Proceso de bioerosión por organismos perforadores en un ecosistema arrecifal del Pacífico Oriental Tropical (Isla Gorgona, Colombia) [Tesis de Maestría]. Universidad del Valle.

- Londoño-Cruz, E., Cantera, J. R., Toro-Farmer, G., Orozco, C.** (2003). Internal bioerosion by macroborers in Pocillopora spp. in the tropical eastern Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 265, 289-295. <https://doi.org/10.3354/meps265289>
- Monro, C. C. A.** (1933). The Polychaeta Errantia collected by Dr. C. Crossland at Colón, in the Panama Region, and the Galapagos Islands during the Expedition of the S.Y. "St. George." *Proceedings of the General Meetings for Scientific Business of the Zoological Society of London*, 1-101.
- Read, G. & Fauchald, K.** (2021). World Polychaeta Database. *Parasphaerosyllis* Monro, 1937. World Register of Marine Species. <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=129666> on 2021-04-05
- Rodríguez-Rubio, E., Schneider, W., del Río, R. A.** (2003). On the seasonal circulation within the Panama Bight derived from satellite observations of wind, altimetry and sea surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 30(7), 631-634. <https://doi.org/10.1029/2002GL016794>
- Salazar-Vallejo, S. I. & Londoño-Mesa, M. H.** (2004). Lista de especies y bibliografía de poliquetos (Polychaeta) del Pacífico Oriental Tropical. *Anales Del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoología*, 75(1), 9-97.
- San Martín, G., Hutchings, P., Aguado, M. T.** (2008). Syllinae (Polychaeta, Syllidae) from Australia. Part. 2. Genera *Inermosyllis*, *Megasyllis* n. gen., *Opisthosyllis*, and *Trypanosyllis*. *Zootaxa*, 1840, 1-53. www.mapress.com/zootaxa/
- Westheide, W.** (1991). The Meiofauna of the Galápagos: A Review. In M. J. James (Ed.), *Galápagos Marine Invertebrates* (pp. 37-73). Springer Science+Business Media.
- WoRMS.** (2023). Polychaeta. <https://marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=883>
- Zapata, F. A. & Robertson, D. R.** (2007). How many species of shore fishes are there in the Tropical Eastern Pacific? *Journal of Biogeography*, 34(1), 38-51. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01586.x>

Artículo original

Epidendrum chloronanum (Orchidaceae): primer registro en la flora de Colombia

Epidendrum chloronanum (Orchidaceae): first record for the flora of Colombia

✉ Javier Cuellar¹, ✉ Nilmar Gómez¹, ✉ Edwin Trujillo-Trujillo², ✉ Oscar Perdomo^{3,*}

¹ Programa de Ingeniería Agroecológica, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia.

² Laboratorio de Malherbología Universidad de la Amazonia - LAMUA, Florencia, Caquetá, Colombia.

³ Grupo de Investigación NÚCLEO, Universidad de Boyacá, Tunja, Boyacá, Colombia.

Resumen

Orchidaceae es un grupo de plantas de gran diversidad. Una quinta parte de sus especies se encuentran registradas en Colombia, principalmente en la cordillera de los Andes. En el departamento de Caquetá se han reportado más de 400 especies, 70 de ellas del género *Epidendrum*. Reportamos por primera vez la especie *Epidendrum chloronanum* en los bosques de niebla de la vertiente oriental de la cordillera Oriental de los Andes, en el departamento de Caquetá. Categorizamos la especie como de “preocupación menor” en el país según los criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza – UICN. Por último, proponemos algunas estrategias de conservación *in situ*, *ex situ* y *circa situ* que pueden aplicarse para proteger esta especie.

Palabras clave: Andes; Bosque de niebla; Caquetá; Deforestación; Orquídeas.

Abstract

Orchidaceae is a group of plants with high diversity. About a fifth of its species are registered for Colombia, mainly in the Cordillera of the Andes. More than 400 species have been reported in the department of Caquetá, 70 of them belonging to the genus *Epidendrum*. Here, we report for the first time the species *Epidendrum chloronanum*, found in the cloud forests of the eastern slope of the Eastern Cordillera of the Andes, in the department of Caquetá. We categorized the species as of “Low Concern” for Colombia according to the criteria of the International Union for Conservation of Nature – IUCN. Finally, we propose some *in situ*, *ex situ* and *circa situ* conservation strategies to protect this species.

Keywords: Andes; Caquetá; Cloud forest; Deforestation; Orchids.

Introducción

Se estima que la diversidad global de Orchidaceae puede llegar a las 27.000 especies. Cerca del 18 % de ellas se encuentra en Colombia, país considerado un *hotspot* para su conservación (Chase *et al.*, 2015; MADS & UN, 2015; Pérez-Escobar *et al.*, 2022). La mayor riqueza de orquídeas del país se encuentra en la cordillera de los Andes (2.928 especies), seguida por la región del Pacífico (400 especies) y la Amazonia (263 especies) (Bernal *et al.*, 2016; MADS & UN, 2015). En el departamento de Caquetá, localizado entre los biomas de los Andes y la Amazonia, se han registrado más de 400 especies de orquídeas, principalmente en el área andina y de piedemonte (Arias *et al.*, 2023).

El género *Epidendrum* L. incluye orquídeas epífitas, terrestres y litófitas, siendo el más diverso de la familia Orchidaceae, con aproximadamente 2.400 especies que se distribuyen desde Carolina del Norte, en Estados Unidos, hasta el norte de Argentina (Hágsater *et al.*, 2016; Hágsater & Wrazildo, 2020). En Colombia se han reportado más de 500 especies de *Epidendrum*, 70 de ellas en Caquetá, lo que lo convierte en el género con mayor riqueza en el departamento (Bernal *et al.*, 2015; Arias *et al.*, 2023).

Citación: Cuellar J, Gómez N, Trujillo-Trujillo E, Perdomo O. *Epidendrum chloronanum* (Orchidaceae): primer registro en la flora de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):86-93, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefn.2193>

Editor: Carolina Romero

***Correspondencia:**

Oscar Perdomo;
oscarperdomobaez@gmail.com

Recibido: 19 de octubre de 2023

Aceptado: 17 de febrero de 2024

Publicado en línea: 6 de marzo de 2024



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

Los esfuerzos por identificar la orquideoflora del departamento de Caquetá han permitido que continuamente se describan nuevas especies y se reporten nuevos registros para Colombia desde esta región (**Perdomo et al., 2020a; Perdomo et al., 2020b; Rincón-González et al., 2020; Arias et al., 2023; Perdomo et al., 2023**). Desafortunadamente, los niveles de deforestación en este departamento están entre los más altos del país, debido, principalmente, a la extracción ilegal de madera, la expansión de la frontera agrícola, la ganadería y los cultivos ilícitos (**Armenteras et al., 2007; Malhi et al., 2008; Myers et al., 2000**). De ahí la importancia para la región de identificar, estudiar y conservar este grupo de plantas y su hábitat. En este contexto, reportamos aquí por primera vez en Colombia la presencia de *E. chloronanum* Hágsater & A. Cisneros y determinamos su categoría de riesgo de extinción siguiendo los lineamientos de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza - UICN.

Materiales y métodos

Localización

La población de *E. chloronanum* se registró durante exploraciones botánicas llevadas a cabo en la vertiente oriental de la cordillera Oriental de los Andes, en el municipio de Florencia (Caquetá), entre los 1.500 y 2.000 m s.n.m. (**Figura 1**). El área, conformada principalmente por bosques de niebla, hace parte de la cuenca hidrográfica del río Bodoquero, tributario del río Caquetá. Esta región hace parte de la Reserva Forestal de la Amazonia colombiana creada mediante la ley sobre Economía Forestal de la Nación y Conservación de Recursos Naturales Renovables (Ley 2ª de 1959). El paisaje está compuesto por montañas escarpadas donde hay pequeñas granjas, potreros y cultivos localizados sobre las vías carretables que atraviesan los bosques.

Recolección y determinación

En el lugar donde se encontró la especie se recolectó material para herborizar, se hizo el registro fotográfico, y se tomaron las coordenadas y la elevación. Para la identificación de la especie, se comparó con el dibujo del tipo y con fotografías publicadas en la web. Posteriormente, se verificó su distribución en las bases de datos de biodiversidad de la

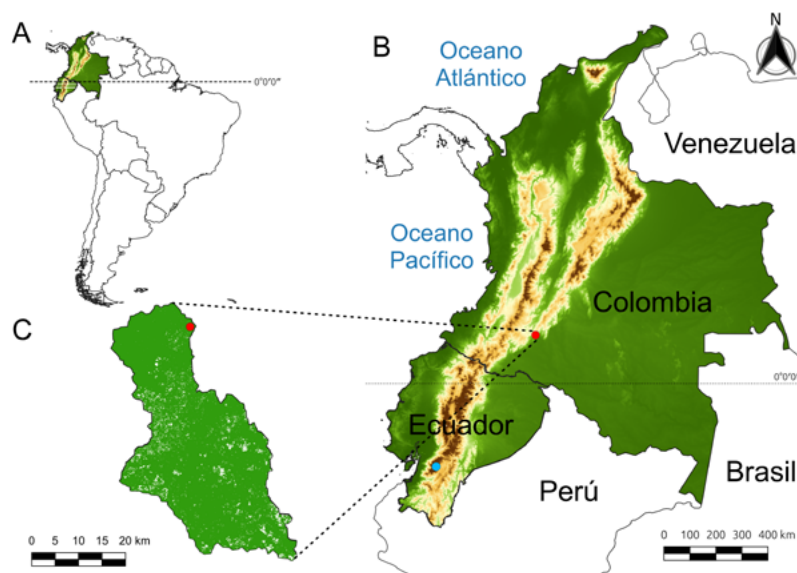


Figura 1. *Epidendrum chloronanum* Hágsater & A. Cisneros. **A.** Localización de Colombia y Ecuador en Suramérica. **B.** Localización de la población conocida en Ecuador (punto azul) y del nuevo registro en Colombia (punto rojo). **C.** Localización de la población en la cuenca hidrográfica del río Bodoquero, (punto rojo) y las áreas deforestadas entre 2001 y 2022

Global Biodiversity Information Facility - GBIF (<https://www.gbif.org/>), Tropicos del Missouri Botanical Garden (<https://tropicos.org/>), SpeciesLink del Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Herbário Virtual da Flora e dos Fungos - INCT-HVFF (<https://specieslink.net/search/>), Biovirtual del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN-UNAL, 2017), así como en el Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia (Bernal *et al.*, 2020), el Herbario Amazónico Colombiano - COAH del SINCHI (<https://www.sinchi.org.co/coah/>) y el *Plan para el estudio y la conservación de las orquídeas en Colombia* publicado conjuntamente por el **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible** y la **Universidad Nacional de Colombia** (2015). Se consultó, además, al especialista en este género, Eric Hágsater, con el fin de constatar que la especie no se encontrara ya reportada en Colombia. Las excicatas se depositaron en el herbario CUVC de la Universidad del Valle (Thiers, 2023).

Categorización del riesgo de extinción

El riesgo de extinción de *E. chloronanum* se categorizó siguiendo los criterios y categorías propuestos por la UICN (2019). Se usó el criterio B, el cual se basa en las poblaciones registradas de la especie y el estado de conservación del hábitat evaluados a partir de los niveles de deforestación en el área estimada de ocupación (*estimated area of occupancy*, AOO) calculados a partir de los datos dispuestos en la plataforma Global Forest Watch – GFW (Hansen *et al.*, 2013). Se usaron los paquetes raster, rgdal, tidyverse, rgeos, stringr, sf, tibble, dplyr y ggplot2 de R (R Core Team, 2021) para extraer los datos de deforestación en el AOO para Colombia. A partir de esta información se generó el código y la correspondiente categorización del riesgo de extinción de la especie.

Resultados

Nuevo registro para la orquideoflora de Colombia

Epidendrum chloronanum Hágsater & A. Cisneros, *Icones Orchidacearum* 17(1): [44], t. 1711. 2019.

Tipo: ECUADOR: Azuay: Cuenca: Parroquia San Joaquín: Soldados, Parque Nacional El Cajas, 2000 m, col. 8 septiembre 1999, pressed 18 octubre 2000, José Portilla, Eric Hágsater 12278. Holotype: AMO 23545 (illustration and photo voucher). A-3397(spirit).

Nuevo registro: COLOMBIA: Florencia, Caquetá, km 55 vía Florencia-Suaza, bosques de niebla alrededor de la vía, 1600 m, 30 junio 2022, O. Perdomo, J. Cuellar, N. Gómez & E. Trujillo OP537.

Hierba epífita, péndula, simpodial, sub-cespitosa, de 6,0 cm de largo incluida la inflorescencia. *Raíces* basales, simples, de 0,6 mm de diámetro. *Tallo* de 4 cm de largo, 0,5-0,8 cm de diámetro, comprimidos lateralmente, más gruesos hacia el ápice, cubiertos por vainas foliáceas imbricadas. *Hojas* 14, suculentas, anisófilas, progresivamente más grandes hacia el ápice, distribuidas uniformemente a lo largo del tallo. *Lámina* de 2,7-6,9 x 1,3-2,8 cm, ovado-lanceolada, aguda, retorcida para estar en el mismo plano del tallo. *Inflorescencia* de 6,5 mm de largo, apical, sésil, con dos flores simultáneas; pedúnculo reducido. *Flores* 2, resupinadas, marrón verdoso, labio y columna verde claro, antera púrpura. Brácteas florales de 2 mm de largo, ovadas triangulares, agudas. *Ovario* de 10,5 mm de largo, delgado, inflado desde cerca de la base, formando una vesícula ventral alargada. *Sépalos* de 9-10 x 3,5-4,0 mm, agudos, margen entero, extendidos; sépalo dorsal ovado-lanceolado con tres venas; sépalos laterales elípticos con cuatro venas y una quilla dorsal, comprimidos lateralmente. *Pétalos* de 8,2 x 0,8 mm, lineales-lanceolados, agudos, de una vena, parcialmente extendidos, margen entero. *Labelo* de 4,8 x 6,1 mm, unido a la columna, trilobulado, base cordada, margen entero; lóbulos laterales oblicuamente semiovalados, de 3,1 x 1,3 mm, obtusos; lóbulo medio de 3,1 x 2,3 mm, triangular, ápice redondeado, margen entero. *Columna* de 5,3 mm, casi recta. *Clinandrium* prominente, en forma de embudo, cubriendo la antera, margen entero, dentado. *Antera* semi-orbicular, espiculada, de cuatro celdas. *Polinios* cuatro, obovoides, comprimidos lateralmente. *Nectario* ancho, profundo, penetrando todo el pedicelo, sin ornamentos. *Cápsula* no observada.

Reconocimiento: *E. chloronanum* pertenece al grupo *Nanum*, caracterizado por tallos péndulos, inflorescencia terminal producida en pares de flores opuestas, sin brácteas espatáceas, pero sí con brácteas florales prominentes (Arista *et al.*, 2023). La especie más similar a *E. chloronanum* es *E. leuconanum* Hágsater & L.Valenz., de la cual difiere por su inflorescencia con dos a cuatro flores simultáneas (*Vs.* hasta 10 flores simultáneas), lóbulo medio del labelo rectangular, 3,0 mm de largo (*Vs.* estrechamente triangular, revoluta en el ápice y de 2,0 mm de largo) y lóbulos laterales del labelo de aprox. 3/4 de la longitud del lóbulo medio (*Vs.* aprox. 1/3 de la longitud del lóbulo medio). Otras especies similares son: *E. tingo-mariae* Hágsater, cuyo ovario no es inflado y el lóbulo medio del labelo es sub-triangular; *E. vesicinatum* Hágsater & L.Valenz., en la cual los lóbulos laterales del labelo son más pequeños y el lóbulo medio es lanceolado; además, el ovario inflado está justo detrás del perianto y forma una vesícula redondeada; *E. integrinatum* Hágsater, con plantas de hasta 60 cm de largo, lóbulo medio del labelo triangular (más largo que ancho) con lóbulos laterales muy reducidos, y *E. bonitense* Hágsater & Dodson, que tiene el ovario, sépalos y pétalos más largos (hasta 12 mm), con el lóbulo medio del labelo subrectangular y dos callos globosos prominentes. Ninguna de estas especies ha sido reportada en Colombia (Figura 2).

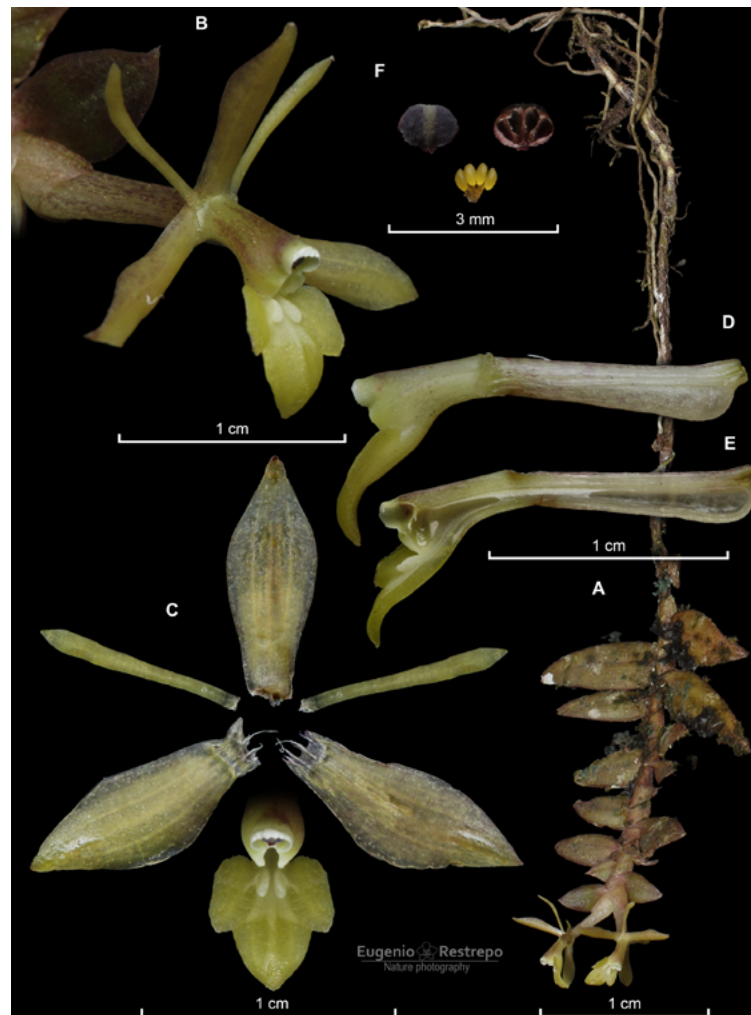


Figura 2. *Epidendrum chloronanum* Hágsater & A. Cisneros. **A.** Hábito. **B.** Flor. **C.** Disección del perianto. **D.** Columna y ovario en vista lateral. **E.** Corte longitudinal de la columna y el ovario. **F.** Capa de la antera (vista anterior y posterior) y polinario. Lamina diseñada por Eugenio Restrepo

Categoría de riesgo de extinción

Aunque *E. chloronanum* solo se conoce de una población en Colombia, cuya AOO es de 4 km², proponemos su categorización a nivel nacional como de “preocupación menor – LC”, debido a que esta especie también crece en Ecuador y, por lo tanto, se espera que existan más poblaciones en los bosques del piedemonte andino-amazónico en los dos países. Además, la población encontrada crece en una zona de reserva con indicadores bajos de deforestación, donde solo el 2 % de la cobertura vegetal del AOO se ha perdido en las últimas dos décadas. La principal amenaza para la población encontrada es el aumento en la deforestación y la instalación de nuevas construcciones, fincas y comercios incentivado por la vía carretable que atraviesa los bosques de niebla en la cuenca alta del río Bodoquero (1.065 km²), donde se encontró la población, aunque en esta área la deforestación sólo alcanzó un 5,86 % (62,25 km²) en las últimas dos décadas (**Figura 3**).

Discusión

El registro de *E. chloronanum* se suma a los de *Acianthera moronae* (Luer & Hirtz) Luer, *Brachionidium lehmannii* Luer, *Cattleya crispa* (Lindl.), *Dichaea amazónica* Pupulina, *D. trinitensis* Gleason, *Dressleria dodsoniana* H.G.Hills, *E. armeniacum* Lindl., *E. brachyrepens* Hágsater, *E. compressibulum* D.E.Benn. & Christenson, *E. porphyreonocturnum* Hágsater & R. Jiménez, *E. teuscherianum* AD Hawkes, *E. uleananodes* Hágsater, *E. vinosum* Schltr., *E. whittenii* Hágsater & Dodson, *Galeandra minax* Rchb.f., *Lepanthes delhierroi* Luer & Hirtz, *L. nontecta* Luer, *Lycaste fuscina* Oakeley, *Macroclinium manabinum* (Dodson) Dodson, *Maxillaria cuzcoensis* C.Schweinf., *Muscarella cryptophyta* (Barb.Rodr.) Bogarín & Karremans, *Myoxanthus xiphion* Luer, *Notylia barkeri* Lindl., *Ornithocephalus bryostachys* Schltr., *Platystele psix* Luer & Hirtz, *Pleurothallis fustifera* Luer, *P. sphaerantha* Luer, *Sievekingia hirtzii* Waldvogel y *Stelis embreei* Luer & Hirtz, especies reportadas por primera vez en Colombia en la vertiente oriental de la cordillera oriental de los Andes (Arias *et al.*, 2023; Perdomo *et al.*, 2020 a,b; Rincón-González *et al.*, 2020; Rodríguez-S *et al.*, 2023; Rojas-P *et al.*, 2023). Estos reportes indican la gran diversidad de orquídeas de esta región y resaltan la necesidad de ampliar el conocimiento sobre la orquideoflora como elemento indispensable para su conservación. Considerados *hotspots* de biodiversidad, los bosques de esta región se encuentran degradados por la caza furtiva, la deforestación, la instalación de cultivos lícitos e ilícitos y la expansión de la ganadería (Armenteras *et al.*, 2007; Malhi *et al.*, 2008; Myers *et al.*, 2000).

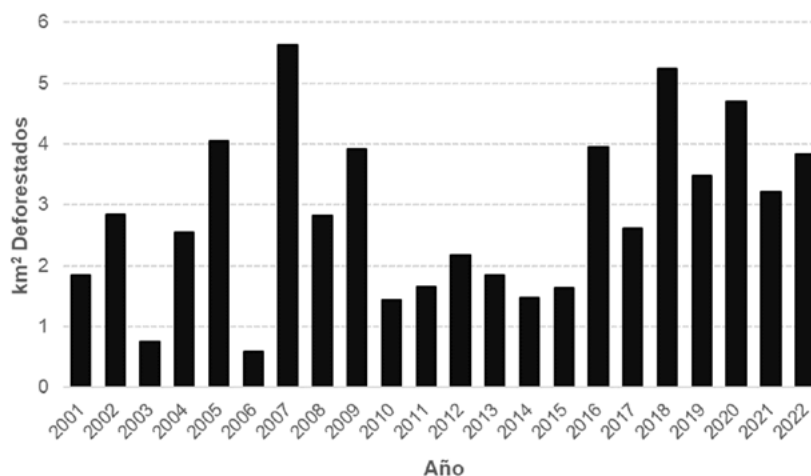


Figura 3. Deforestación anual en la cuenca hidrográfica del río Bodoquero, Caquetá, Colombia, de 2001 a 2022

Al ser una especie que en principio se categoriza como de “preocupación menor – LC”, pero con distribución restringida y poco conocida en el país, resulta relevante proteger la población encontrada y su hábitat, así como buscar nuevas poblaciones en la región. Se sugiere aplicar estrategias de conservación *in situ* como el establecimiento de espacios para conocer, sensibilizar y actuar en pro de su conservación, generando sentido de pertenencia y conciencia ambiental sobre su protección (Flórez-Espinosa *et al.*, 2023), así como el rescate y reubicación de orquídeas, la rehabilitación y restauración de ambientes degradados, la adopción de políticas regionales de protección de áreas de importancia para las orquídeas, y el establecimiento de áreas protegidas con enfoque socioeconómico, por ejemplo, el ecoturismo de orquídeas (Damon, 2017; Mirenda, 2011; Thomé-Ortiz *et al.*, 2017).

También se pueden implementar medidas de conservación *ex situ*, como el establecimiento de bancos de semillas, cultivos de tejidos para micropropagación, ceparios de hongos micorrícicos, propagación *in vitro*, y la inclusión de individuos en orquidearios, jardines botánicos y bancos de germoplasma (Flórez-Espinosa *et al.*, 2023; Mirenda, 2011), así como el desarrollo de estudios sobre la polinización y adaptación a condiciones de vivero de especies con potencial ornamental para su manejo sostenible (Menchaca-García *et al.*, 2018).

Además, se pueden explorar estrategias *circa situ*: talleres teóricos y salidas de campo con los habitantes del área para propiciar la conservación participativa de la biodiversidad dentro de paisajes agrícolas alterados, sistemas agroforestales o huertos caseros, y educación ambiental comunitaria orientada a la construcción colectiva del conocimiento y la identidad cultural en torno a la naturaleza (Dawson *et al.*, 2013; Flórez-Espinosa *et al.*, 2023).

Conclusiones

La vertiente oriental de la cordillera Oriental de los Andes en Caquetá alberga una orquideoflora diversa que no ha sido identificada en su totalidad. Aunque aquí categorizamos *E. chloronanum* como LC, esta es una especie de distribución restringida y poco conocida, por lo cual requiere medidas de conservación debido al incremento de factores antrópicos que pueden afectar su hábitat natural. Teniendo en cuenta los lineamientos de la UICN y la situación actual de la especie, es necesario explorar la región en busca de nuevas poblaciones una nueva categorización que integre información sobre su distribución, su estado poblacional y la incidencia de las amenazas. Para asegurar su protección y conservación, las estrategias *ex situ*, *in situ* y *circa situ* que se implementen deben estar asociadas a procesos de educación ambiental e involucrar a la comunidad que habita el área.

Agradecimientos

A la Universidad de la Amazonia por el apoyo logístico; a Eric Hágsater por su ayuda en la identificación de la especie y la confirmación de la novedad corológica; a Eugenio Restrepo por la elaboración de la lámina de la especie, y al revisor B por los comentarios, correcciones y sugerencias que enriquecieron el manuscrito.

Contribución de los autores

JC: recolección de datos, diseño, investigación y redacción del texto. NG y ET: recolección de datos e investigación; OP: concepción, diseño, investigación y redacción del texto. Todos los autores revisaron los resultados, y corrigieron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

Referencias

- Arias, T., Chaux-Varela, J., Camero, M. del P., Calderon-Álvarez, R. A., Trujillo, A. C., Correa-Munera, M. A., Zuluaga, A., Perdomo, O., Pérez-Escobar, O. A., Trujillo-Trujillo, E., Valencia-D. J. (2023). Checklist of Orchidaceae from Caquetá, Colombia. *PhytoKeys*, 229, 21-46. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.229.102737>
- Arista, J. P., Hágsater, E., Santiago, E., Edquén, J. D., Pariente, E., Oliva, M., Salazar, G. A. (2023). New and noteworthy species of the genus *Epidendrum* (Orchidaceae, Laeliinae) from the Área de Conservación Privada La Pampa del Burro, Amazonas, Peru. *PhytoKeys*, 227, 43-87. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.227.101907>
- Armenteras, D., Cadena-V, C., Moreno, R. (2007). *Evaluación del estado de los bosques de niebla y de la meta 2010 en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Bernal, R., Gradstein, S., Celis, M. (2016). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Panamericana Formas e Impresos S. A. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Chase, M. W., Cameron, K. M., Freudenstein, J. V., Pridgeon, A. M., Salazar, G., van den Berg, C., Schuitman, A. (2015). An updated classification of Orchidaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 177(2), 151-174. <https://doi.org/10.1111/boj.12234>
- Damon, A. (2017). Estrategia para el rescate, conservación y aprovechamiento sustentable de las orquídeas (Orchidaceae) del Sureste de México. *Agroproductividad*, 10(6), 25-30.
- Dawson, I. K., Guariguata, M. R., Loo, J., Weber, J. C., Lengkeek, A., Bush, D., Cornelius, J., Guarino, L., Kindt, R., Orwa, C., Russell, J., Jamnadass, R. (2013). What is the relevance of smallholders' agroforestry systems for conserving tropical tree species and genetic diversity in *circa situm*, *in situ* and *ex situ* settings? A review. *Biodiversity and Conservation*, 22(2), 301-324. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0429-5>
- Flórez-Espinosa, G. M., Loaiza-Campiño, I. D., Ruiz-Ortega, F. J. (2023). Aportes a la conservación de la biodiversidad: el caso de las orquídeas en zonas de posconflicto. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, 54, 321-338. <https://doi.org/10.17227/ted.num54-17618>
- Hágsater, E. & Wrazildo, M. (2020). *Epidendrum katarun-yariku* (Orchidaceae), a new species of the Schistochilum group from the tepuis of the Guiana Highlands in South America. *Phytotaxa*, 472(1), 33-40. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.472.1.4>
- Hágsater, E., Santiago-Ayala, E., Rodríguez-Martínez, L. (2016). *Epidendrum lasiostachyum* (Orchidaceae): a new Colombian species of the *Epidendrum macrostachyum* group. *Lankesteriana*, 16(1), 27-37. <https://doi.org/10.15517/lank.v16i1.23621>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Instituto de Ciencias Naturales - Universidad Nacional de Colombia - ICN-UNAL. (2017). *Biovirtual - Colecciones Científicas en Línea*. <http://www.biovirtual.unal.edu.co/>
- International Union for Conservation of Nature-IUCN. (2019). Directrices de uso de las Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN. Versión 14. *Comité de Estándares y Peticiones de La UICN*, 14(2014), 125. <http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Universidad Nacional de Colombia. (2015). *Plan para el estudio y la conservación de las orquídeas en Colombia*. www.minambiente.gov.co
- Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., Nobre, C. A. (2008). Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169-172. <https://doi.org/10.1126/science.1146961>
- Menchaca-García, R. A., Lozano-Rodríguez, M. A., Sánchez-Morales, L. (2018). Estrategias para el aprovechamiento sustentable de las Orquídeas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13), 9-16. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.485>
- Mirenda, T. (2011). Botanic gardens, education, and orchid conservation strategies: the need for a coordinated approach. *Lankesteriana*, 11(3), 301-305. <https://doi.org/10.15517/lank.v11i3.18285>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>

- Perdomo, O., Coca, L. F., Trujillo, E.** (2020). Nuevos registros de *Epidendrum* (Orchidaceae) para Colombia: *Epidendrum porphyreonocturnum* Hágsater & R. Jiménez y *Epidendrum whittenii* Hágsater & Dodson. *Revista Peruana de Biología*, 27(3), 411-416. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v27i3.17901>
- Perdomo, O., Lizcano, A., Trujillo, E. T.** (2020). First record of *Myoxanthus xiphion* (Orchidaceae, pleurothallidinae) from Colombia. *Darwiniana*, 8(1), 395-401. <https://doi.org/10.14522/darwiniana.2020.81.892>
- Perdomo, O., Trujillo-Trujillo, E., Karremans, A.** (2023). *Masdevallia leonor-baeziana* (Orchidaceae: Pleurothallidinae): new species from the Andean-Amazonian foothills of Caquetá, Colombia. *Lankesteriana*, 23(2), 139-144. <https://doi.org/10.15517/lank.v23i2.54019>
- Pérez-Escobar, O. A., Zizka, A., Bermúdez, M. A., Meseguer, A. S., Condamine, F. L., Hoorn, C., Hooghiemstra, H., Pu, Y., Bogarín, D., Boschman, L. M., Pennington, R. T., Antonelli, A., Chomicki, G.** (2022). The Andes through time: evolution and distribution of Andean floras. *Trends in Plant Science*, 27(4), 364-378. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.09.010>
- R Core Team.** (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. (4.1.1). R Foundation for Statistical Computing.
- Rincón-González, M., Barbosa, W., Moreno, J. S.** (2020). Nuevos registros de orquídeas para la flora Colombiana. *Revista Científica*, 1(July), 27-42.
- Rodríguez-S, N., Rojas-P, A., Lizcano, A., Trujillo, E. T., Perdomo, O.** (2023). On the distribution and conservation of *Sievekingia hirtzii* Waldvogel (Orchidaceae, Stanhopeinae): first records from Colombia. *Check List*, 19(6), 839-845. <https://doi.org/10.15560/19.6.839>
- Rojas-P, A., Trujillo-Trujillo, E., Perdomo, O.** (2023). Primeros registros documentados y categorización del estado de conservación de *Dressleria dodsoniana* y *Galeandra minax* (Orchidaceae; Catasetinae) de Colombia. *Revista Peruana de Biología*, 30(4), 1-7. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v30i4.25673>
- Thiers, B.** (2023). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff*. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium.
- Thomé-Ortiz, H., Tejeda-Sartorius, O., Téllez-Velasco, M., Torres-Rivera, J.** (2017). Las orquídeas (Orchidaceae) como recurso turístico: propuesta de senderos interpretativos como herramienta de gestión forestal sustentable. *Agroproductividad*, 10(6), 54-61.

Artículo original

¿Cómo ha evolucionado el tráfico ilegal de fauna en el Tolima? Análisis multitemporal de una amenaza para la biodiversidad

How has the illegal wildlife trade evolved in Tolima? Multi-temporal analysis of a threat to biodiversity

 Tatiana E. Lozano-Suárez^{1,*},  Edison D. Bonilla-Liberato¹,  Edwin O. López-Delgado^{2,**}

¹ Programa de Biología Ambiental, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de Ibagué, Tolima, Colombia

² Grupo de Investigación en Zoología, Universidad del Tolima, Tolima, Colombia

Resumen

El tráfico ilegal de especies es una actividad delictiva muy lucrativa que amenaza la supervivencia de numerosas especies. El departamento del Tolima, centro de Colombia, es considerado un *hotspot* para estas actividades debido a su rica biodiversidad y ubicación estratégica. Con el propósito de conocer el comportamiento del tráfico ilegal de fauna silvestre en este departamento, se analizó el número de reportes de incautación y entregas voluntarias entre el 2013 y el 2022 a partir de la información proporcionada por la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima). Se registraron 4.067 individuos pertenecientes a 218 especies, 150 géneros, 96 familias y 45 órdenes. Las aves fueron el grupo más traficado (56,2 %), seguido de los reptiles (34,25 %) y los mamíferos (6,68 %). Entre las especies más afectadas se encuentran la tortuga morrocoy (*Chelonoidis carbonarius*), el loro común (*Amazona ochrocephala*) y el periquito bronceado (*Brotogeris jugularis*). El 9,17 % de las especies registradas están amenazadas a nivel internacional y el 8,25 % a nivel nacional, en tanto que el 35,32 % se encuentra en los apéndices de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres - CITES. Los años 2021 (21,63 %) y 2016 (18,28 %) fueron los del mayor número de incautaciones, mientras que el 2013 (33,91 %), el 2014 (29,32 %) y el 2015 (24,54 %) registraron el mayor número de entregas voluntarias de especies a Cortolima. La zona central del departamento fue la más representativa a lo largo del periodo estudiado (66,24 %). Estos hallazgos brindan una visión detallada y actualizada del tráfico ilegal de especies en el Tolima, lo que es esencial para diseñar e implementar medidas de conservación y protección de especies amenazadas.

Palabras claves: Tráfico ilegal; Conservación; Fauna; Incautaciones; Biodiversidad.

Abstract

The illegal trade of species is a highly lucrative criminal activity that threatens the survival of numerous species. The department of Tolima, located in central Colombia, is considered a hotspot for these activities due to its rich biodiversity and strategic location. To understand the behavior of illegal wildlife trade in this department, we analyzed the number of seizure reports and voluntary deliveries between 2013 and 2022 using the information provided by the Regional Autonomous Corporation of Tolima (Cortolima): 4067 individuals were recorded belonging to 218 species, 150 genera, 96 families, and 45 orders. Birds were the most trafficked group (56.2%), followed by reptiles (34.25%) and mammals (6.68%). The most affected species included the Morrocoy tortoise (*Chelonoidis carbonarius*), the common parrot (*A. ochrocephala*), and the tan parakeet (*B. jugularis*); 9.17% of these species are threatened at the international level and 8.25% at the national level, while 35.32% are listed in the CITES appendices. The years 2021 (21.63%) and 2016 (18.28%) stood out for significant seizures, while 2013 (33.91%), 2014 (29.32%), and 2015 (24.54%) recorded the highest number of species deliveries to Cortolima. The central zone of the department was the most

Citación: Lozano-Suárez TE, Bonilla-Liberato ED, López-Delgado EO. ¿Cómo ha evolucionado el tráfico ilegal de fauna en el Tolima? Análisis multitemporal de una amenaza para la biodiversidad. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):94-108, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2223>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Tatiana E. Lozano-Suárez;
tatianalozanosuarez0405@gmail.com

****Afiliación actual.** Grupo de Estudios en Biodiversidad (GEBIO), Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia.

Recibido: 8 de noviembre de 2023

Aceptado: 7 de marzo de 2024

Publicado en línea: 22 de marzo de 2024



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

representative throughout the period studied (66.24%). These findings provide a detailed and updated view of illegal species trafficking in Tolima, essential in designing and implementing conservation and protection measures for endangered species.

Keywords: Illegal trafficking; Conservation; Wildlife; Confiscations; Biodiversity.

Introducción

La fauna es un componente de los ecosistemas de indiscutible relevancia para los seres humanos (**Hernández et al.**, 2018), pero a pesar de ello, es objeto de formas de explotación que pueden comprometer su bienestar y disminuir sus poblaciones silvestres. Entre estas se destacan la alimentación, la decoración, y el uso medicinal, cultural y comercial (**Mellor et al.**, 2009). La comercialización de especies, en particular, constituye una de las actividades más lucrativas a nivel mundial, superando los 200 mil millones de dólares en ganancias (**Hughes**, 2021).

El comercio ilegal de especies silvestres es uno de los negocios delictivos más rentables del mundo (**Nellemann et al.**, 2016). Afecta una gran variedad de especies que son criadas y comercializadas para satisfacer la demanda del mercado (**Phelps et al.**, 2016) y ha puesto a muchas especies en riesgo de extinción (**Tournan et al.**, 2012; **Hughes et al.**, 2023), impactando negativamente la dinámica y el estado de diversos ecosistemas (**Sumaila et al.**, 2020; **Rush et al.**, 2021; **Hughes et al.**, 2023).

Este es un grave problema en diferentes regiones del mundo, especialmente aquellas con gran biodiversidad como Latinoamérica (**Ribeiro et al.**, 2019; **Gluszek et al.**, 2020; **Esmail et al.**, 2020), donde se registra aproximadamente el 15 % de las incautaciones a nivel mundial, cifra que, sin embargo, puede ser mucho mayor (**United Nations Office on Drugs and Crime, UNODC**, 2016). Además, se sabe que diversos factores socioeconómicos y culturales incrementan el tráfico de especies, como los niveles de pobreza, la falta de oportunidades laborales y las percepciones locales sobre la biodiversidad (**Duffy et al.**, 2016; **Van Uhm**, 2016). Por ejemplo, en Colombia se ha observado que la motivación detrás del tráfico ilegal depende del papel de la persona en la cadena: consumidora, intermediaria, recolectora o captora (**Sollund**, 2017).

Colombia es considerado un *hotspot* mundial de biodiversidad por su ubicación en dos regiones que se caracterizan por sus altos índices de endemismo, pero también por el grado de amenaza de las especies (**Myers et al.**, 2000). Además su biodiversidad es representativa en todo el mundo debido a su inmensa riqueza en fauna y flora (**Arbeláez-Cortés**, 2013). Dicha representatividad se debe a varios factores clave, entre ellos, el tener sistemas montañosos con diferentes zonas de vida, dos océanos y cinco regiones biogeográficas muy diversas en ecosistemas, siendo la región andina la más destacada en términos de riqueza (**Rangel - Ch.**, 2015).

Esta región se caracteriza, asimismo, por los altos niveles de deforestación y de impacto antrópico (**Etter et al.**, 2006, **Correa-Ayram et al.**, 2020). A ello se suma el escaso control del tráfico de fauna y tenencia de animales silvestres, lo que la convierte en una de las zonas más afectadas del país (**Sollund**, 2017). En el 2013 se decomisaron en promedio 160 individuos por día a nivel nacional, lo que equivale a más de 58 mil individuos incautados por año, especialmente en las regiones del Caribe, el Pacífico y los Andes (**Southwick**, 2013), lo que, según estimaciones, sólo representa entre el 1 y el 10 % de los individuos traficados (**Mancera-Rodríguez & Reyes-García**, 2008).

Los psitácidos y testudínidos son los más traficados en el país (**Izquierdo-Páez**, 2021). A nivel regional, no obstante, el tráfico ilegal afecta de forma diferente a los grupos taxonómicos (**Mancera-Rodríguez & Reyes-García**, 2008) y también varía el papel de las regiones, ya que en algunas hay una tendencia mayor a la extracción de animales para suplir la demanda en algunas áreas de la región andina, por ejemplo (**Bermúdez et al.**, 2014).

Se sabe que algunos departamentos como el Tolima se ven más afectados por el tráfico ilegal de especies debido a su ubicación estratégica en el centro del país (**Rojas-Briñez et al.**, 2013). Este departamento forma parte de la región andina, en el valle del

Magdalena entre las cordilleras Central y Oriental. Presenta una riqueza representativa, con el 11 % de las especies reportadas a nivel nacional (SiB Colombia, 2022), entre las cuales las aves son las más afectadas por el tráfico ilegal (Rojas-Bríñez *et al.*, 2013), aunque, en realidad, hoy se desconoce el estado y el comportamiento del tráfico ilegal de especies en el departamento, ya que el estudio más reciente recogió información anterior al 2010.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue analizar el tráfico ilegal de especies en el departamento del Tolima durante los últimos 10 años, a partir de los reportes de Cortolima, y así establecer los grupos taxonómicos más afectados y la variación espaciotemporal de los reportes de este fenómeno en el departamento. Esta aproximación detallada y actualizada sobre el tráfico ilegal de especies en el departamento es crucial para que los organismos de control y las entidades municipales y departamentales diseñen e implementen medidas de conservación y protección de las especies amenazadas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El departamento del Tolima se encuentra ubicado en la región andina del país, entre las cordilleras Central y Oriental. Limita al sur con los departamentos de Cauca y Huila, al occidente con Quindío, Risaralda y Valle de Cauca, al norte con Caldas, y al oriente con Cundinamarca. Está conformado por 47 municipios, los cuales abarcan una extensión total de 23,562 km², correspondientes al 2,1 % del territorio nacional (Cortolima, 2007). A nivel regional, la autoridad ambiental es la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima), la cual está dividida en cinco áreas territoriales (Figura 1).

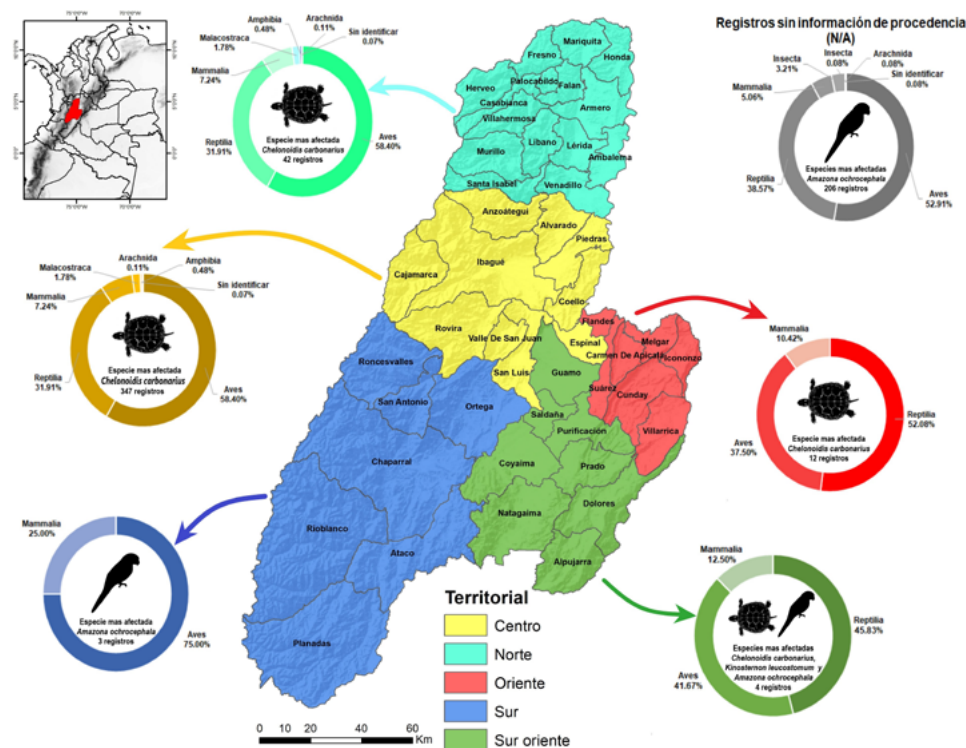


Figura 1. Localización del departamento del Tolima. Se ven la división administrativa de las áreas territoriales de la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima) y los municipios que las componen.

Obtención y verificación de datos

Los datos del tráfico ilegal de especies fueron solicitados directamente a Cortolima, entidad que suministró información detallada que abarcaba un lapso de 10 años (2013 - 2022). Los datos incluían la cantidad de individuos incautados y entregados voluntariamente por especie y la ubicación territorial de origen del suceso, así como unos pocos reportes que especificaban el municipio del registro, los cuales se sumaron al área territorial correspondiente.

Esta información se organizó para su posterior análisis. Con el fin de evitar posibles confusiones o errores en la identificación de las especies reportadas, se verificó y actualizó su estatus taxonómico. La precisión de los datos se confirmó mediante la herramienta Name Parser de GBIF (<https://www.gbif.org/tools/name-parser>), con la cual se validó la nomenclatura científica de cada especie, garantizando que los registros correspondieran correctamente a su clasificación taxonómica.

Usando la plataforma de la red nacional de datos abiertos sobre biodiversidad (SiB Colombia), la cual brinda información actualizada sobre la biodiversidad nacional (SiB Colombia, 2022), se verificó si las especies reportadas eran endémicas de Colombia. Asimismo, se consultaron los taxones del listado categorizados como exóticos o invasores, con el fin de determinar las especies que podrían presentar un riesgo para la biodiversidad del departamento.

Posteriormente, se consultó para todas las especies la categoría de amenaza de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza - UICN (<https://www.iucnredlist.org/>). Pese a las imprecisiones y limitaciones del listado nacional de especies amenazadas (Cruz-Rodríguez *et al.*, 2017), se consultó la resolución 1912 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con el fin de determinar las especies amenazadas a nivel nacional. Adicionalmente, se estableció si las distintas especies se encontraban en alguno de los apéndices de la CITES, cuyo objetivo principal es regular y controlar el comercio de especies silvestres.

La información relacionada con las entregas voluntarias puede mostrar errores que no fue posible corregir por la naturaleza misma de las bases de datos. Ello pudo generar un sesgo en los resultados y no mostrar el panorama real de la problemática del tráfico ilegal de especies (Izquierdo-Páez, 2021), debido, por ejemplo, a la imprecisión y la incertidumbre en torno a la fecha del reporte, la cual no necesariamente coincide con el año en que la persona realmente adquirió el animal. Esto también se aplica a nivel espacial, pues, dada la dinámica de las migraciones sociales en Colombia (Silva-Arias & González-Román, 2009), la persona que tenía el individuo y lo entregó pudo haber cambiado su municipio o departamento de residencia desde el momento de la adquisición.

Análisis de la información

Se evaluó la representatividad de los taxones y la cantidad de individuos en cada uno. Posteriormente, utilizando el programa estadístico R (R Core Team, 2021), se hizo la prueba de Kruskal-Wallis para establecer si había diferencias significativas en la cantidad de reportes por año y entre los datos de las distintas áreas territoriales. La elección de esta prueba se basó en los resultados obtenidos con la prueba de Shapiro-Wilk, la cual demostró que ninguna de las variables analizadas cumplía con el principio de normalidad. Además, se hizo un análisis *post hoc* utilizando la prueba de Dunn para determinar las diferencias específicas entre los grupos. Es importante destacar que se estableció un valor de $p < 0,05$ como criterio de significación.

Para analizar la distribución de los taxones en relación con las distintas áreas territoriales, se implementó un escalamiento multidimensional no paramétrico (*non-metric MultiDimensional Scaling*, nMDS) mediante el análisis de Jaccard, el cual tiene en cuenta solamente la presencia o ausencia de las especies.

Para los análisis se utilizaron los siguientes paquetes: FSA (Ogle *et al.*, 2017), ggplot2 (Wickham *et al.*, 2016), ggpubr (Kassambara & Kassambara, 2020), patchwork (Pedersen, 2022), scales (Wickham & Seidel, 2022) y vegan (Oksanen *et al.*, 2022).

Resultados

Durante el período comprendido entre 2013 y 2022 se lograron incautar o recibir voluntariamente un total de 4.067 individuos pertenecientes a 218 taxones, de los cuales 195 se identificaron hasta el nivel de especie, 13 hasta el de género y 10 hasta el de familia. Se registraron 150 géneros, 96 familias y 45 órdenes (**Figura 2 A-B**). Las aves fueron la clase más representativa, con el 56,2 % del total de registros distribuidos en 96 especies (46,15 %), seguida de los reptiles, con el 34,25 % de los reportes y 34 especies (16,34 %). Los mamíferos se ubicaron en el tercer puesto, con el 6,68 % de los registros, correspondiente a 49 especies (23,55 %) (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2223/3979>).

La tortuga morrocoy (*C. carbonarius*) fue la especie más representativa, con el 14,06 % de los registros, seguida por el loro común (*A. ochrocephala*) y el periquito bronceado (*B. jugularis*), con el 14,06 % y el 12,02 % de los individuos reportados, respectivamente. Las diez especies más representativas correspondieron al 60,06 % de los individuos incautados y entregados voluntariamente a Cortolima (**Tabla 1**).

Por otro lado, un 9,17 % de los taxones registrados están incluidos en categorías de amenaza a nivel internacional y un 8,25 % a nivel nacional. Según la evaluación de la IUCN, hay cinco especies en la categoría de “peligro crítico” (CR), seis en la de “en

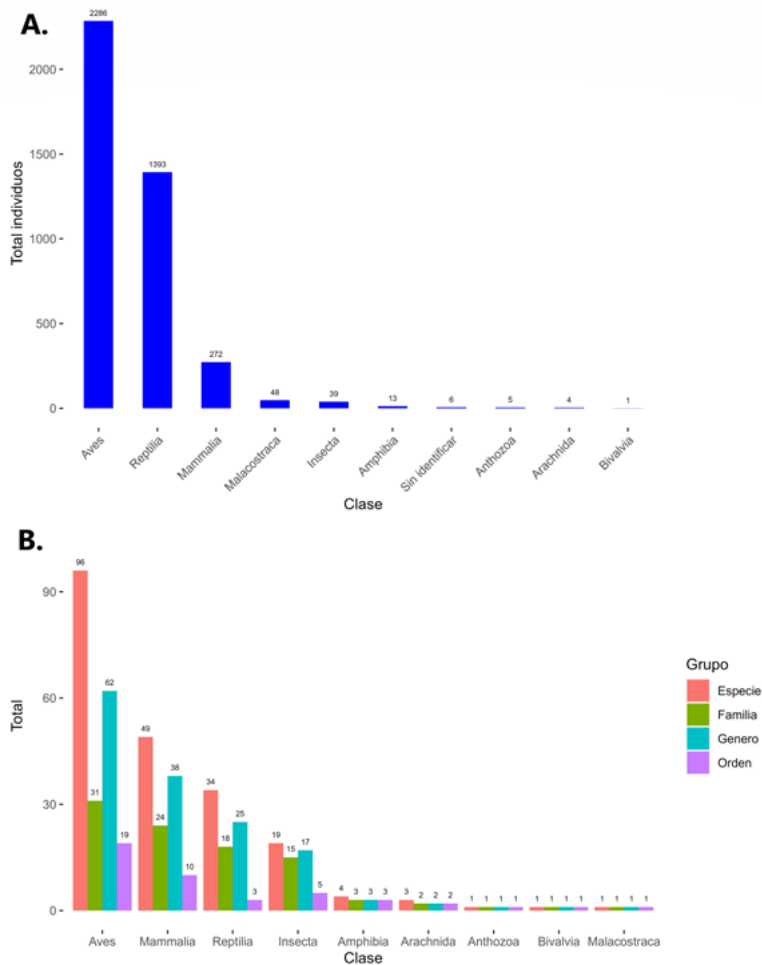


Figura 2. A) Total de individuos reportados en entregas voluntarias e incautaciones y sus distintas clases taxonómicas entre 2013 y 2022 en el departamento del Tolima. **B)** Riqueza de especies, número de géneros, familias y órdenes en cada clase

Tabla 1. Las diez especies más representativas en las incautaciones y entregas voluntarias entre 2013 al 2022, departamento del Tolima

Especie	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total
<i>Chelonoidis carbonarius</i>	81	50	192	48	36	7	29	80	39	10	572
<i>Amazona ochrocephala</i>	60	40	96	59	27	52	79	53	71	33	570
<i>Brotogeris jugularis</i>	100	39	28	93	12	60	67	40	39	11	489
<i>Sicalis flaveola</i>	1	22	9	71	25	16	5	9	13	6	177
<i>Trachemys scripta</i>	48	37	35	19	7	3	0	0	0	0	149
<i>Amazona amazonica</i>	10	16	18	6	4	4	19	8	19	9	113
<i>Trachemys venusta</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	105	0	105
<i>Crotalus durissus</i>	2	2	0	0	0	46	1	0	47	0	98
<i>Dendrocygna autumnalis</i>	15	53	3	12	0	0	0	0	0	2	85
<i>Phimosus infuscatus</i>	26	55	1	2	0	0	0	0	0	1	85

peligro” (EN) y nueve en la de “vulnerables” (VU), y según la resolución 1912 de 2017, cuatro especies se encuentran en CR, cinco EN y nueve son VU. Asimismo, un 35,32 % se halla catalogado en uno de los apéndices de la CITES, siendo la clasificación II la más prevalente, con el 27,06 % del total de especies reportadas por Cortolima. Además, cinco especies se consideran endémicas (*Caecilia thompsoni*, *Penelope perspicax*, *Saguinus leucopus*, *Saguinus oedipus* y *Ortalis columbiana*) y tres son migratorias (*Buteo swainsoni*, *Cathartes aura* y *Falco peregrinus*) (**Figura 3**).

Los individuos incautados representaron el 49,1 % de los reportados, siendo el 2021 (21,63 %) y el 2016 (18,28 %) los años con mayor representatividad (**Figura 4A**). A nivel temporal, se observaron diferencias estadísticamente significativas en la cantidad de individuos por año (**Figura 4B**), destacándose el 2013, el 2014 y el 2021 como años significativamente diferentes del resto ($p<0,05$). En cuanto a las entregas voluntarias, estas representaron el 50,89 % de los registros y los años 2013 (33,91%), 2014 (29,32%) y 2015 (24,54%) fueron en los que más entregas hubo, diferenciándose significativamente de los demás (**Figura 4 C-D**). En los años 2013, 2014, 2015 y 2016 se registró la mayor cantidad de individuos reportados (**Figura 4E**). Como en los casos anteriores, se observaron diferencias estadísticamente significativas (**Figura 4F**), siendo los cuatro primeros años y el 2017 los que difirieron más del resto de los años ($p<0,05$).

A nivel espacial, se observó que el área territorial del centro fue la que presentó la mayor cantidad de individuos, con 66,24 % del total de registros, en tanto que el área territorial del sur fue la menos representativa en este sentido, con apenas 0,01 % de la información disponible. Por otro lado, el 29,14 % de los registros no incluían información correspondiente al área territorial del suceso (n/a) (**Figura 5A**). Asimismo, se encontraron diferencias significativas en la cantidad de reportes entre las distintas territoriales (**Figura 5B**). El análisis reveló que los reportes en las áreas territoriales del centro y el sur y aquellos correspondientes a n/a, fueron significativamente diferentes en comparación con las otras áreas territoriales ($p<0,05$).

Por último, el análisis de nMDS reveló una interesante agrupación que sugiere que las áreas territoriales del norte, sur, oriente y sur oriente comparten un gran número de especies traficadas (**Figura 6**). La del centro se diferenció de las demás, ya que el 51,04 % de las especies de aves y el 61,76 % de los reptiles se reportaron exclusivamente allí.

Discusión

El tráfico ilegal de especies ha ocasionado una serie de impactos negativos sobre la conservación de la biodiversidad a nivel nacional e internacional (**Crespo et al., 2022**), siendo una de las principales problemáticas medioambientales (**Márquez et al., 2020**)

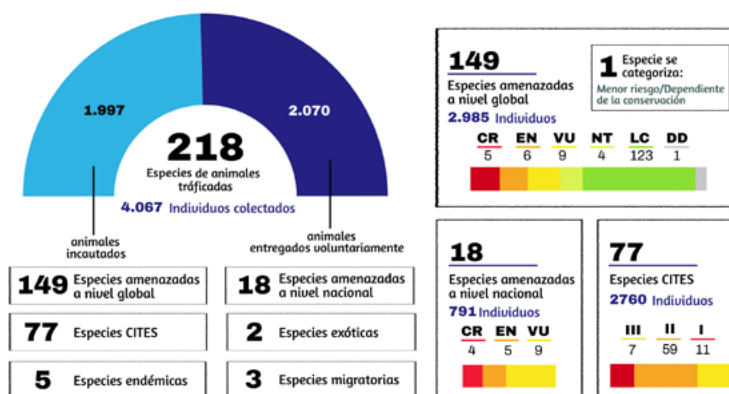


Figura 3. Diagrama resumen de la abundancia y riqueza de especies traficadas ilegalmente; categoría de amenaza a nivel nacional e internacional y especies de interés comercial incluidas en alguno de los apéndices de la CITES. Se incluye el total de especies endémicas, exóticas y migratorias reportadas en el departamento del Tolima entre 2013 y 2022.

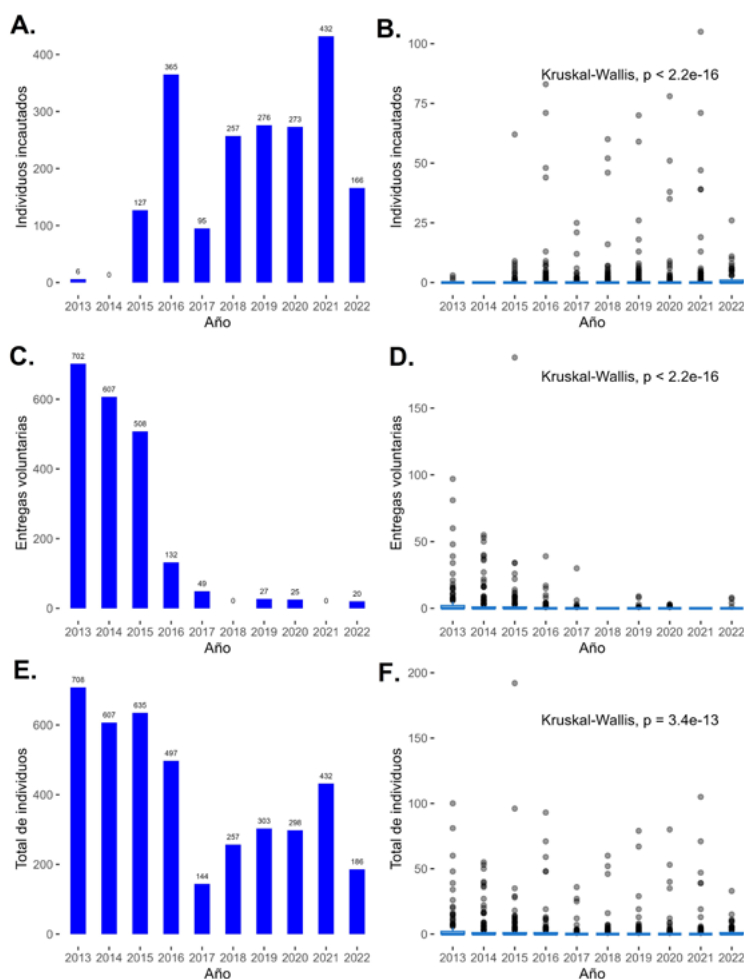


Figura 4. Diagramas de barras (A, C, E) de la cantidad de reportes de incautaciones, entregas voluntarias y total de individuos en los años estudiados. Diagramas de cajas (B, D, F) con los resultados de la prueba Kruskal-Wallis que compara la cantidad de individuos en los diferentes años para cada categoría

por la alta tasa de mortalidad faunística, que oscila entre el 60 y el 80 %, debida a las condiciones precarias de manipulación y transporte de los especímenes (**Ortiz-Calderón & Acero-Plazas, 2022**). **Pino-Varón & Piedrahita-Hincapié (2023)** señalan que Colombia es uno de los países que más contribuye en la cadena del tráfico de especies a causa de su rica biodiversidad combinada con la acción ineficaz de las entidades encargadas (**Romero-Cortés, 2019**), lo que lo convierte en un blanco de interés (**Morales-David & Mancera-Rodríguez, 2021**).

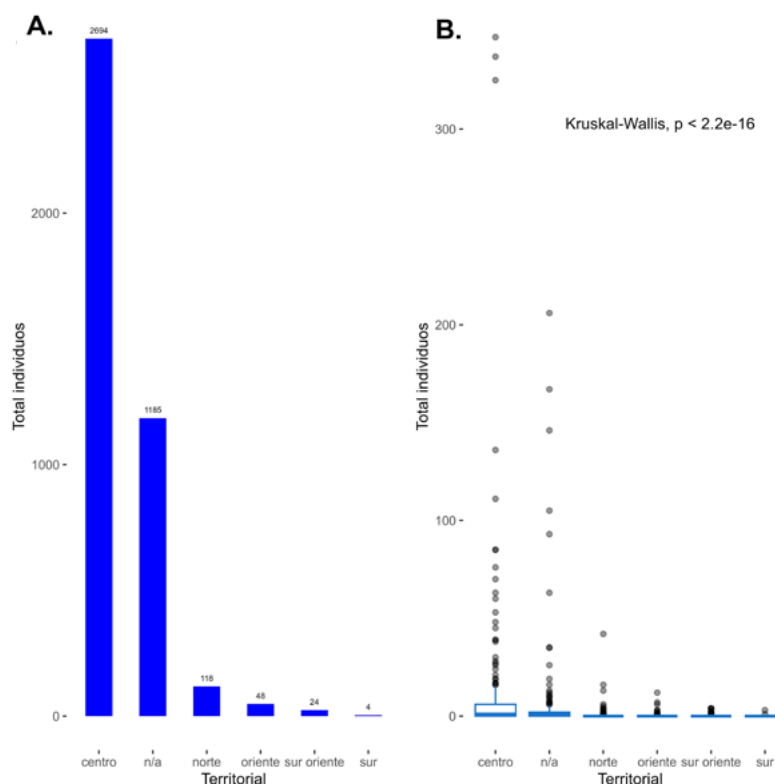


Figura 5. (A) Diagrama de barras de la cantidad de datos reportados por cada territorial. (B) Diagrama de caja con el resultado obtenido del análisis de Kruskal-Wallis

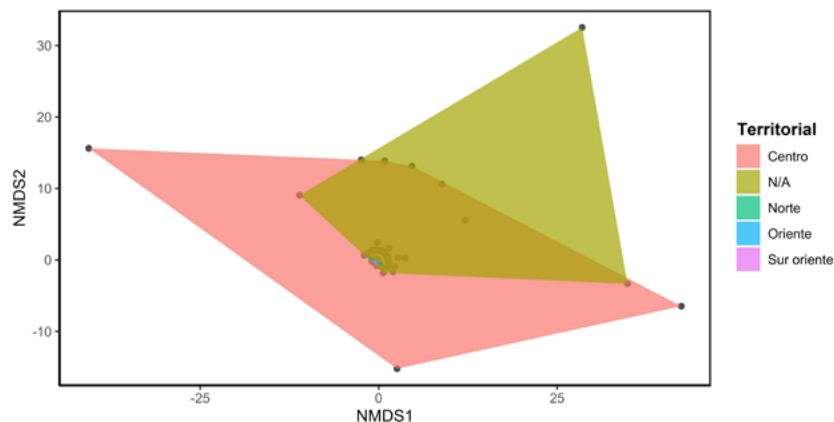


Figura 6. Análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) de las clases reportadas por las distintas territoriales de Cortolima

Los resultados de la revisión realizada evidenciaron que en el Tolima el grupo más traficado durante la última década fueron las aves (56,2 % registros totales, 96 especies), lo cual concuerda con lo reportado por **Rojas** (2011) para este mismo departamento en una revisión del 2010 realizada en los principales centros de acopio de 23 municipios del departamento. Asimismo, **Morales & Mancera** (2021) registraron el ingreso, mantenimiento y liberación de especímenes en el Valle del Cauca entre el 2011 y el 2016; allí registraron 3.171 individuos entregados voluntariamente y decomisados, en su mayoría aves (41,6 % y 56,7 %, respectivamente).

Las aves representan uno de los taxones que más se incautan en el mundo (**Restrepo-Rodas & Pulgarín-Restrepo**, 2017), ya que son el grupo más demandado y ofertado en el mercado internacional (**Rosen & Smith**, 2010) debido a factores como sus exóticos colores (**Romero-Cortés**, 2019), la calidad de su canto, su rareza y su sexo (**Chamat**, 2022). Por ello, la caza furtiva para su comercialización y la pérdida de su hábitat ponen este grupo taxonómico en riesgo de extinción (**Cruz & Gómez**, 2010).

A nivel de especies, *A. ochrocephala*, conocida como lora real amazónica, fue la especie con el mayor número de registros durante la última década (570 individuos), seguida de *B. jugularis* (periquito bronceado), con 489 registros, lo que coincide con lo reportado por **Baptiste et al.** (2014) en Colombia. A nivel nacional, el orden Psittaciformes es uno de los más traficados (**Restrepo & Pulgarín**, 2017) como consecuencia de su tenencia ilegal como mascotas (**Rodríguez-Chavarro**, 2022).

Pese a que las aves son el grupo taxonómico más afectado, los reptiles y los mamíferos también son objeto del tráfico de millones de individuos alrededor del mundo (**Morales & Mancera**, 2021). Con relación a los reptiles, se encontró que las especies *C. carbonarius* (572), *Trachemys scripta* (149) y *Trachemys venusta* (105) fueron las más representativas en cuanto a las incautaciones y entregas voluntarias. El tráfico de reptiles, principalmente del género *Trachemys*, ha ocasionado un declive en sus poblaciones dada las connotaciones culturales y comerciales que representan, pues se consumen erróneamente como carne blanca (**Castro-Cortés et al.** 2022). Este y el género *Chelonoidis* constituyen los reptiles más traficados en el país (**Arroyave et al.**, 2014; **Bonilla et al.**, 2012).

Las especies *Cebus albifrons* (mono capuchino), *Didelphis marsupialis* (chucha), *Sciurus granatensis* (ardilla colorada), *Sciurus vulgaris* (ardilla roja), *Dasyprocta punctata* (ñequé), *Dasyurus novemcinctus* (armadillo), *Cerdocyon thous* (zorro perro), *Aotus lemurinus* (marteja o mono nocturno), *Odocoileus virginianus* (venado cola blanca) y *Potos flavus* (perro de monte) encabezan la lista de los mamíferos más traficados en el departamento, donde, pese a su gran importancia por la gran variedad de roles ecológicos que desempeñan en los ecosistemas, han sido objeto del tráfico ilegal, ocasionando la pérdida de poblaciones y provocando extinciones locales (**González et al.**, 2022). A esto se suma la gran demanda de otros especímenes apetecidos por su carne, como *Hydrochoerus hydrochaeris* (chigüiro) (**Rojas & Vargas**, 2007), y el uso de primates, roedores y armadillos (**Mosquera et al.**, 2019).

En el estudio se encontró que el 9,48 % del total de los taxones reportados están en alguna categoría de amenaza de la lista roja de especies amenazadas a nivel internacional (IUCN), en tanto que en los estados de amenaza a nivel nacional, dicho porcentaje equivale al 8,26 %, lo cual resalta la necesidad de desarrollar estrategias eficaces orientadas a atenuar el fuerte impacto que el comercio ilícito ejerce sobre las distintas poblaciones de fauna.

En cuanto a las especies listadas en CITES, se encontraron 77 especies, 11 (5,04 %) en el apéndice I, 59 (27,06 %) en el apéndice II y siete (3,21 %) en el apéndice III (UNEP-WCMC, 2023). En el marco regulatorio de la CITES se hace énfasis en la existencia de un mercado de fauna sostenible, lo que lo convertiría en una actividad legal mientras no amenace la supervivencia de la especie (**Valencia**, 2018). **Rojas** (2011) encontró que en el Tolima 76 de las especies traficadas están listadas en alguno de los apéndice de CITES (11 especies en el apéndice I, 55 en el apéndice II y diez en el apéndice III), lo que demuestra que la presión sobre las especies aumenta si no se controla su comercio y las aboca a una eventual extinción.

Cabe resaltar que se registraron cinco especies endémicas, tres migratorias y dos exóticas, cifras que destacan la necesidad de promover acciones para la conservación y disminución de las condiciones de vulnerabilidad a las que están expuestas (**Cruz et al.**, 2017; **Roncancio et al.**, 2020). Algunos taxones presentan vacíos de información ecológica y poblacional, lo que impide conocer sobre el impacto real al que puedan estar sometidos (**Baptiste et al.**, 2014) y beneficia la cadena del tráfico de especies (**Baptiste et al.**, 2002). Aunque en Colombia hay una abundante normatividad en torno al tráfico de especies, esta no se está aplicando de manera eficaz (**Pino & Piedrahita**, 2023), por lo que se hace necesario la evaluación de diversas estrategias de control, preservación, conservación y uso sustentable de las especies (**Arroyave et al.**, 2014).

En lo que respecta al departamento del Tolima, **Rojas et al.** (2013) plantean que uno de los municipios donde más se evidencia el comercio de especies es Chaparral, lo que contradice los hallazgos de presente estudio, ya que el área territorial a la que este municipio pertenece tuvo el menor número de registros de tráfico ilegal de especies. Debe recalarse, sin embargo, que los municipios que componen el área territorial del sur cuentan con una gran biodiversidad (**SiB Colombia**, 2022), lo que sería indicativo de fallas en el proceso de registro o procesamiento de la información de Cortolima en dichos reportes. Ello explicaría la ausencia notable de información sobre el municipio o el área territorial de procedencia, lo que genera un sesgo a nivel espacial.

Se encontró, además, que el área territorial de oriente tuvo pocos registros comparada con las demás, a pesar de su ubicación y proximidad al corredor Girardot-Bogotá, que, como lo indican **González et al.** (2022), es una de las principales vías y epicentros del tráfico ilegal de especies, pues facilita el transporte de la fauna hacia otras partes del país, o su posterior salida hacia el exterior. Dada la cantidad de reportes, se podría deducir que hay diferentes variables que afectarían la gestión de la información y, por ende, la eficacia de las medidas de control del tráfico ilegal de especies. Se ha observado que la inversión presupuestal y la capacidad de las corporaciones en sus territorios condiciona las acciones de control del tráfico de especies (**Izquierdo-Páez**, 2021). En el caso de Cortolima, la inversión para la gestión de fauna silvestre en el periodo 2008-2013 no estaba siquiera entre las 20 más altas a nivel nacional (**Contraloría General de la República**, 2014), sin embargo, son necesarios estudios más detallados para determinar qué factores pueden influir en la cantidad de registros a nivel territorial y municipal.

Por otra parte, la mayor concentración de los datos se dio en el área territorial del centro, lo que podría deberse a que esta abarca municipios como Ibagué, capital del departamento, con la mayor densidad poblacional y una alta biodiversidad (**SiB Colombia**, 2022). Sin embargo, esto también podría indicar errores en el sistema de notificación de las áreas territoriales por las diferencias proporcionales en la cantidad de registros entre unas y otras, lo que ya señaló **Rojas-Bríñez** (2011) en relación con las posibles incongruencias en la información espacial de los distintos registros por parte de Cortolima.

En el análisis temporal se encontró que diez especies fueron claves en el tráfico ilegal a lo largo del período estudiado (2013-2022) en el Tolima; dichas especies, como lo mencionan **Baptiste et al.** (2014), también se ven fuertemente afectadas por el tráfico ilegal en toda Colombia. Ocho de ellas están categorizadas en la IUCN como de “preocupación menor” (LC) y en la CITES en el apéndice II, en tanto que a nivel nacional sólo *C. carbonarius*, una de las especies más traficadas en el Tolima, está reportada con algún nivel de amenaza.

A nivel temporal no fue posible detectar un patrón claro en general, pero sí específicamente para las entregas voluntarias, con una tendencia decreciente, lo que probablemente se deba a la correcta caracterización del reporte por parte de la Corporación para evitar el sesgo e incertidumbre que genera esta categoría (**Izquierdo-Páez**, 2021). También se pudo observar un aumento en la cantidad de reportes en comparación con lo reportado entre el 2005 y el 2009 (**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**, 2012), situación que se debería a diversos factores como el aumento y el fortalecimiento de la vigilancia por parte de las autoridades de control, la correcta notificación de cada hecho o, incluso, a la educación ambiental.

Los estudios que analizan el comportamiento del tráfico ilegal a nivel departamental y regional en Colombia son limitados, lo que impide una visión más precisa del panorama nacional. No obstante, a partir de las investigaciones realizadas hasta la fecha, puede observarse que el número de reportes en el Tolima no se diferencia mucho de lo reportado en el Valle de Cauca (**Morales-David & Mancera-Rodríguez, 2021**), aunque sí es mayor que el de otros departamentos como Boyacá (**Bello, 2010**) y Norte de Santander (**Cáceres-Martínez et al., 2017**). Esta situación puede deberse al flujo de especies traficadas que provienen del sur del país (**Arroyave et al., 2014; Arroyave-Bermúdez, 2015**).

Por otro lado, detrás del tráfico ilegal de especies se encuentran organizaciones con estructuras complejas, cuya comprensión se hace necesaria con el fin de generar soluciones efectivas para la protección de las especies (**Wyatt et al., 2020**). En el caso del Tolima, se desconoce qué grupo o grupos están detrás de este negocio ilícito. Además, se sabe que en Colombia hay diferentes variables socioeconómicas que aumentarían el número de personas detrás de estas redes criminales (**Sollund, 2017**). Así, para disminuir la tasa de especies objeto del tráfico ilegal en el departamento, es necesario implementar estrategias con enfoques interdisciplinarios que permitan comprender el panorama social, económico, político y ambiental del problema.

Por último, se sabe que la estimación del tráfico ilegal de especies a nivel nacional y regional presenta dificultades en cuanto a la veracidad de los datos sobre las incautaciones de especímenes. Esto se debe a que puede haber sesgos en la detección y notificación de dichas incautaciones, lo que resulta en estimaciones imprecisas de la cantidad de especies afectadas (**Sas-Rolfes et al., 2019**). Es posible que algunas especies que no han sido reportadas también estén siendo afectadas por estas actividades ilícitas en el departamento. Asimismo, es probable que la dinámica espacial real no corresponda a lo observado en el presente estudio, pues los reportes de la Corporación no mostrarían el panorama real del tráfico ilegal de especies. No obstante, los resultados obtenidos ofrecen una visión actualizada sobre el impacto del tráfico ilegal de especies en el departamento, lo cual es fundamental para generar estrategias en favor de la conservación de la fauna silvestre, y reflejan la necesidad de adoptar enfoques más sólidos y confiables para cuantificar el registro del comercio ilegal de especies en las distintas áreas territoriales.

Conclusiones

El departamento del Tolima ocupa un lugar relevante en el tráfico ilegal de especies a nivel nacional debido a su ubicación estratégica, lo que lo convierte en un blanco de interés para este tipo de actividades ilícitas. Entre los años 2013 y 2022 se evidenció un aumento en el número de reportes de especies incautadas y entregas voluntarias de individuos pertenecientes a una amplia variedad de grupos taxonómicos, siendo las aves y los reptiles los más afectados. Aproximadamente el 9,17 % de las especies están amenazadas a nivel internacional, y el 8,25 % a nivel nacional. Así mismo, se evidencian falencias en la forma de reportar los datos, lo cual genera sesgos e incertidumbres en torno al panorama real a nivel espacial y temporal del tráfico de especies en las distintas áreas territoriales. Por ello es esencial implementar medidas de control y prevención en el Tolima para proteger la biodiversidad y promover su conservación.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2223/397>

Agradecimientos

A la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima) por facilitar la información para poder llevar a cabo el presente estudio.

Contribución de los autores

T.E.L.Z y E.D.B.L.: solicitud de información, análisis y discusión de los resultados, y redacción del documento. E.O.L.D.: análisis y discusión de los resultados, coordinación de la redacción del documento, y revisión final del documento.

Conflicto de intereses

Manifestamos que no existe ningún conflicto de intereses con relación a los resultados y objetivos de la investigación. No tenemos afiliaciones financieras, intereses comerciales o cualquier otro tipo de relación que pueda influir en la objetividad de los hallazgos presentados en este trabajo.

Referencias

- Arbeláez-Cortés, E. (2013). Knowledge of Colombian biodiversity: published and indexed. *Biodiversity and conservation*, 22, 2875-2906.
- Arroyave-Bermúdez, F. J., Romero-Goyeneche, O. Y., Bonilla-Gómez, M. A., Hurtado-Heredia, R.G. (fecha). Tráfico ilegal de tortugas continentales (Testudinata) en Colombia: una aproximación desde el análisis de redes. *Acta Biológica Colombiana*, 19(3), 381-392.
- Arroyave-Bermúdez, F. (2015). El tráfico ilegal de reptiles en Colombia: una aplicación del análisis de redes a las relaciones ambientales. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia.
- Baptiste M.P., Vargas-Tovar, N., Osorno, M., Cárdenas-López, D., González, M. (2014). Tráfico ilegal de especies. En: Bello *et al.* (Eds.). *Biodiversidad 2014. Estado y tendencias de la biodiversidad continental en Colombia*. Instituto Alexander von Humboldt.
- Bello, A. C. (2010). Tráfico y tenencia ilegal de fauna silvestre en el departamento de Boyacá. *Cultura Científica*, Volumen (8), 16-23.
- Bonilla, M. A., Luque, N., Cuervo, M. A., Pinzón, M., Vásquez, E. A. (2014). Ecología de tortugas terrestres y de agua dulce de Colombia y manejo de decomisos. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Cáceres-Martínez, C. H., Villamizar, M. P., Arias-Alzate, A. (2017). Diagnóstico sobre el tráfico de fauna silvestre en el departamento de Norte de Santander, Colombia. *Revista Biodiversidad Neotropical*, 7(3), 189-199. <https://doi.org/10.18636/bioneotropical.v7i3.652>
- Castro-Cortés, A. A., Brieve, C., Witte, C. (2022). Implications of wildlife trafficking on the health and conservation efforts of an endangered turtle species in Colombia. *Conservation Science and Practice*, 4(3), e595.
- Chamat, A. G. (2022). Tráfico ilegal de aves silvestres: Propuesta de nuevas acciones para Colombia a partir de la revisión de experiencias internacionales. Tesis de maestría. Pontificia Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/62038>
- Contraloría General de la República. (2014). *Análisis de la política de gestión ambiental de fauna silvestre y de la estrategia para la prevención y el control del tráfico ilegal de especies silvestres 2008-2013*, pp. 304-407. Contraloría General de la República.
- Correa-Ayram, C. A., Etter, A., Díaz-Timoté, J., Rodríguez-Buriticá, S., Ramírez, W., Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117, 106630. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA) (2009). *Plan de acción trienal 2007-2009*. Corporación Autónoma del Tolima.
- Crespo, S., Solórzano, C., Guerrero, J. (2022). Tráfico nacional de fauna silvestre y especies amenazadas: un estudio descriptivo en Manabí (Ecuador). *Revista de Ciencias de la Vida*, 35(1), 33-44. <https://doi.org/10.17163/lgr.n35.2022.03>
- Cruz, D. & Gómez, J. R. (2011). Aproximación al uso y tráfico de fauna silvestre en Puerto Carreño, Vichada. *Colombia Ambiente y Desarrollo*, 14(26), 63.
- Cruz-Rodríguez, C. A., Pérez-Torres, J., González-Maya, J. F. (2017). Resolución nacional de especies amenazadas de Colombia. *Mammalogy Notes*, 4(2), 1-5. <https://doi.org/10.47603/manovol4n2.1-5>
- Doherty, T. S., Glen, A. S., Nimmo, D. G., Ritchie, E. G., Dickman, C. R. (2016). Invasive predators and global biodiversity loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(40), 11261-11265. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602480113>

- Duffy, R., St John, F. A., Büscher, B., Brockington, D. (2016). Toward a new understanding of the links between poverty and illegal wildlife hunting. *Conservation Biology*, 30(1), 14-22.
- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 369-386. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.013>
- Esmail, N., Wintle, B. C., t Sas-Rolfes, M., Athanas, A., Beale, C. M., Bending, Z., Dai, R., Fabinyi, M., Gluszek, S., Haenlein, C., Harrington, L. A., Hinsley, A., Kariuki, K., Lam, J., Markus, M., Paudel, K., Shukhova, S., Sutherland, W. J., Verissimo, D., Wang, Y., Waugh, J., Wetton, J. H., Workman, C., Wright, J., Milner-Gulland, E. J. (2020). Emerging illegal wildlife trade issues: A global horizon scan. *Conservation Letters*, 13(4), [e12715]. <https://doi.org/10.1111/conl.12715>
- Gluszek, S., Ariano-Sánchez, D., Cremona, P.J., Goyenechea, A., Luque-Vergara, D.A., Mcloughlin, L., Morales, A., Reuter-Cortés, A., Rodríguez-Fonseca, J., Radachowsky, J., Knight, A.T. (2020). Emerging trends of the illegal wildlife trade in Mesoamerica. *Oryx*, 55, 708 - 716.
- González-Maya, J.F., Lemus-Mejía, L., Morales-Perdomo, J., Moreno-Díaz, C., Zárrate-Charry, D.A. (Eds.) (2022). *Mamíferos de Cundinamarca: diversidad, conservación y cambio climático*. Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Hughes, A. C. (2021). Wildlife trade. *Current Biology*, 31(19), R1218-R1224.
- Hernández, D., Pulido, M., Zuria, I., Gallina, S., Sánchez, G. (2018). El manejo como herramienta para la conservación y aprovechamiento de la fauna silvestre: acceso a la sustentabilidad en México. *Acta Universitaria*, 28 (4), 31-41. <https://doi.org/10.15174/au.2018.2171>
- Hughes, L. J., Morton, O., Scheffers, B. R., Edwards, D. P. (2023). The ecological drivers and consequences of wildlife trade. *Biological Reviews*, 98(3), 775-791. <https://doi.org/10.1111/brv.12929>
- Izquierdo-Páez, J. P. (2021). Caracterización de la dinámica del tráfico ilegal de fauna silvestre en Colombia y en el Distrito Capital entre los años 2005 y 2019. Tesis de maestría. Pontificia Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/59462>
- Kassambara, A. & Kassambara, M. A. (2020). Package ‘ggpubr’. *R package version 0.1*, 6 (0).
- Mancera-Rodríguez, N. J. & Reyes-García, O. (2008). Comercio de fauna silvestre en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(2), 4618-4645.
- Márquez, G., Bojórquez, A., Hernández, G. (2020). El tráfico ilegal de especies silvestres. Una pérdida del patrimonio natural. Grupo eumed, XIV Congreso Virtual Internacional Turismo y Desarrollo.
- Mellor, D., Patterson-Kane, E., Stafford, K. J. (2009). *The sciences of animal welfare*. John Wiley & Sons.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). Estrategia Nacional para la prevención y control al Tráfico Ilegal de Especies Silvestres: Diagnóstico y Plan de Acción ajustado; Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Morales-David, C. & Mancera-Rodríguez, N. J. (2021). Manejo, valoración y atención de la fauna silvestre en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Revista Luna Azul*, Volumen (52), 105-125.
- Mosquera, F., Trujillo, F., Aya, C., Bolívar, L., Valencia, K., Arboleda, A.F., Mantilla, H. (2019). Mamíferos. En: F. Trujillo & F. Anzola (eds). *Biodiversidad en el departamento de Arauca*. Gobernación de Arauca, Fundación Omacha y Fundación Ecollano.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858.
- Nellemann, C., Henriksen, R., Kreilhuber, A., Stewart, D., Kotsovou, M., Raxter, P., Mrema, E., Barrat, S. (2016). The rise of environmental crime: a growing threat to natural resources, peace, development and security. United Nations Environment Programme.
- Ogle, D., Wheeler, P., Dinno, A. (2017). Package ‘FSA’. *Cran Repos*, 1-206.
- Oksanen, J., Simpson, G., Blanchet, F., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P., O’Hara, R., Solymos, P., Stevens, M., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., Durand, S., ... Weedon, J. (2022). Vegan: Community Ecology Package. *R package version 2.6-4*. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Ortiz-Calderón, M. I. & Acero-Plazas, V. M. (2022). Riesgos del tráfico ilegal de aves silvestres en Bogotá (Colombia) según la perspectiva Una Salud. *Boletín Epidemiológico Distrital - Bed*, 19(8-12), 71-72. <https://doi.org/10.56085/01238590.526>

- Pedersen, T.** (2022). Patchwork: The Composer of Plots. *R package* version 1.1.2, <https://CRAN.R-project.org/package=patchwork>
- Phelps, J., Biggs, D., Webb, E. L.** (2016). Tools and terms for understanding illegal wildlife trade. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(9), 479-489.
- Pino-Varón, J. A., & Piedrahita-Hincapié, L. C.** (2023). Tráfico ilegal de especies silvestres en Colombia: problemáticas emergentes y nuevas tendencias. Universidad Libre. <https://hdl.handle.net/10901/25724>
- R Core Team** (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rangel - Ch., J. O.** (2015). La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(151), 176-200. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.136>
- Restrepo-Rodas, D. C. & Pulgarín-Restrepo, P. C.** (2021). Dinámicas de los loros en cautiverio en Colombia: tráfico, mortalidad y liberación: Captivity parrots in Colombia: traffic, mortality and liberation. *Ornitología Colombiana*, Volumen (16), 1-23.
- Ribeiro, J., Reino, L., Schindler, S., Strubbe, D., Vall-Llosera, M., Araújo, M.B., Capinha, C., Carrete, M., Mazzoni, S., Monteiro, M., Moreira, F., Rocha, R., Tella, J.L., Vaz, A.S., Vicente, J.R., Nuno, A.** (2019). Trends in legal and illegal trade of wild birds: a global assessment based on expert knowledge. *Biodiversity and Conservation*, 28, 3343 - 3369.
- Rodríguez-Chavarro, A. M.** (2022). Diseño de un sitio Web para el reconocimiento de psitácidos de Colombia sensibles al tráfico ilegal como propuesta para el desarrollo de actitudes de conservación a partir del análisis ecológico. Trabajo de grado. Universidad Pedagógica Nacional.
- Rojas-Briñez, D. K.** (2011). Comercio de fauna Silvestre en el departamento del Tolima-Colombia bajo el contexto de la demanda internacional de especies. Tesis de maestría. Universidad Internacional de Andalucía.
- Rojas-Briñez, D.K., Regis-Silva, M., García-Melo, J.E.** (2013). Estado actual y perspectivas de conservación frente al comercio ilegal de fauna silvestre en el departamento del Tolima (Colombia). *Revista Tumbaga*, 1 (8), 97-111.
- Romero-Cortés, C. A.** (2019). El tráfico de especies: un punto ciego de la seguridad en las cadenas de suministro. Tesis, Relaciones Internacionales y Estudios Políticos, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. <http://hdl.handle.net/10654/21140>
- Roncancio, N., Branch, J., Moreno-Mancilla, O. F., Ospina, O., Guzmán, L. M.** (2020). Reducción en la densidad poblacional del tití gris (*Saguinus leucopus*) en el oriente de Caldas, Colombia. *Neotropical primates*, 26(1), 56-63.
- Rosen, G. E. & Smith, K. F.** (2010). Summarizing the evidence on the international trade in illegal wildlife. *EcoHealth*, 7, 24-32.
- Rush, E. R., Dale, E., Aguirre, A. A.** (2021). Illegal wildlife trade and emerging infectious diseases: pervasive impacts to species, ecosystems and human health. *Animals*, 11(6), 1821.
- Sas-Rolfes, M.t., Challender, D. W., Hinsley, A., Veríssimo, D., Milner-Gulland, E. J.** (2019). Illegal wildlife trade: Scale, processes, and governance. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 201-228.
- SiB Colombia** (2022). Biodiversidad en Cifras, Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia. <https://biodiversidad.co/consultar/biodiversidad-cifras-colombia/>
- Silva-Arias, A. C. & González-Román, P.** (2009). Un análisis espacial de las migraciones internas en Colombia (2000-2005). *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 17(1), 123-144.
- Sollund, R.** (2017). The use and abuse of animals in wildlife trafficking in Colombia: Practices and injustice. *Environmental crime in Latin America: The theft of nature and the poisoning of the land*. Springer.
- Southwick, N.** (2013). 58000 animales confiscados anualmente en Colombia. Centro de Investigación de Crimen Organizado. <https://es.insightcrime.org/noticias/noticias-del-dia/58000-animales-trafficados-son-confiscados-anualmente-en-colombia/>
- Sumaila, U. R., Zeller, D., Hood, L., Palomares, M. L. D., Li, Y., Pauly, D.** (2020). Illicit trade in marine fish catch and its effects on ecosystems and people worldwide. *Science advances*, 6 (9), eaaz3801.
- Tournant, P., Joseph, L., Goka, K., Courchamp, F.** (2012). The rarity and overexploitation paradox: stag beetle collections in Japan. *Biodiversity and Conservation*, 21, 1425-1440.
- UNEP-WCMC** (2023). The Checklist of CITES Species Website. CITES Secretariat, Geneva, Switzerland. Compiled by UNEP-WCMC, Cambridge, UK. <http://checklist.cites.org>

-
- United Nations Office on Drugs and Crime-UNODC** (2016). *World Wildlife Crime Report: Trafficking in Protected species*. UNODC, New York, USA.
- Valencia-González, C.** (2018). Fauna silvestre en Colombia: entre la ilegalidad y las oportunidades del comercio internacional en la CITES. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, Volumen (55), 128 - 145.
- Van Uhm, D. P.** (2016). *The illegal wildlife trade: Inside the world of poachers, smugglers and traders* (Vol. 15). Springer.
- Wickham, H., Chang, W., Henry, I., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H. Dunnington, D., van den Brand, T.** (2016). *Package ggplot2. Create elegant data visualisations using the grammar of graphics*.
- Wickham, H. & Seidel, D.** (2022). Scales: Scale Functions for visualization. *R package version 1.2.1*. <https://CRAN.R-project.org/package=scales>
- Wyatt, T., van Uhm, D., Nurse, A.** (2020). Differentiating criminal networks in the illegal wildlife trade: organized, corporate and disorganized crime. *Trends in Organized Crime*, 23, 350–366. <https://doi.org/10.1007/s12117-020-09385-9>

Artículo original

El efecto del complejo mayor de histocompatibilidad sobre el olfato y la selección sexual en aves

The effect of the major histocompatibility complex on olfaction and sexual selection in birds

● Luis F. García^{1,*}, Gabriel Merizalde²

¹ Grupo de Inmunología Celular e Inmunogenética, Sede de Investigación Universitaria y Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

² Biólogo independiente, Envigado, Colombia

Resumen

La selección sexual desempeña un papel evolutivo fundamental en muchas especies. En las aves la selección intersexual la realizan principalmente las hembras durante el periodo reproductivo al escoger a los machos para aparearse y transmitir sus genes a la descendencia. Los ornamentos, más notorios en este periodo, se han propuesto como señal de calidad, pero no es claro cómo se asocian con otros caracteres más directamente relacionados con la supervivencia, que permiten reaccionar contra los patógenos, por ejemplo, la respuesta inmune, específicamente el complejo mayor de histocompatibilidad (CMH). Hay evidencia de que el olor del aceite de acicalamiento está asociado al CMH y permite determinar similitudes y diferencias entre parejas. Esta revisión presenta un panorama de las investigaciones de las últimas décadas sobre el papel del olor y el CMH en la selección intersexual en aves. Revisamos el estado del conocimiento sobre el CMH y sus productos en aves no paseriformes, que tienen una estructura genética del CMH muy simple, y paseriformes, que presentan múltiples duplicaciones de los genes de este complejo. Asimismo, revisamos los reportes que sustentan la asociación entre el CMH y la selección de parejas, particularmente en hembras que buscan parejas sexuales diferentes que aumentan la heterocigocidad y la variedad del CMH en la descendencia y disminuyen la homocigocidad y la endogamia. Aún existen grandes lagunas en el conocimiento de la selección sexual en muchas aves, que requieren una aproximación interdisciplinaria para comprender plenamente los mecanismos y el significado de este fascinante proceso evolutivo.

Palabras claves: aves; selección sexual; complejo mayor de histocompatibilidad; aceite de acicalamiento; olor; adaptación.

Abstract

Sexual selection plays a fundamental role in the evolution of many species. In birds, intersexual selection is a function of females during the reproductive period, when they choose males to mate and transmit their genes to their offspring. Ornaments, more noticeable during this period, have been seen as signs of quality. However, it is unclear how they associate with other characteristics more directly related to the survival of offspring, such as the immune response against pathogens, including the major histocompatibility complex (MHC). There is evidence of an association between the scent of preen oil and MHC that would allow to identify similarities and differences between mates. Here we review the studies conducted in recent decades on the role of smell and MHC in the intersexual selection of birds. We also overviewed what is known about MHC and its products in non-passerine birds whose MHC genetic structure is very simple, and in passerine birds with multiple duplications of the MHC genes. We reviewed reports supporting the association between MHC and selection, particularly in females seeking additional sexual partners to increase heterozygosity and the variety of MHC in offspring and decrease homozygosity and endogamy. There are still gaps in our knowledge of many birds' sexual selection that should be addressed from an interdisciplinary approach to fully understand the mechanisms and meaning of this fascinating evolutionary process.

Key words: Birds; Sexual selection; Major histocompatibility complex; Preen oil; Odor; Fitness.

Citación: García LF, Merizalde G. El efecto del complejo mayor de histocompatibilidad sobre el olfato y la selección sexual en aves. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):109-130, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2418>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Luis Fernando García;
lfernando.garciam@gmail.com

Recibido: 11 de diciembre de 2023

Aceptado: 17 de marzo de 2024

Publicado en línea: 22 de marzo de 2024



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

Introducción

"Nuestro mundo desborda de formas y comportamientos peculiares, y por lo demás, insensatos, que funcionan exclusivamente en favor de obtener una victoria en el gran juego del apareamiento y la reproducción" (Gould, 1985)

Unos de los espectáculos más fascinantes de la naturaleza son los cortejos o galanteos de muchas especies de aves durante la época de reproducción. En dichos cortejos, los machos compiten con un despliegue de bellos plumajes, danzas, o capacidades acrobáticas o cantoras, para que finalmente las hembras seleccionen el macho con quien van a copular para así transmitir sus genes a la descendencia. Estos sofisticados comportamientos están presentes en muchos grupos de aves en todos los niveles filogenéticos. La selección sexual fue descrita por Darwin como un mecanismo adicional a la selección natural en *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex* (1871), que “depende de la ventaja de ciertos individuos sobre otros individuos del mismo sexo y especie, en relación exclusiva con la reproducción” (citado por **Futuyma**, 2021); allí definió, además, las dos formas en que esta selección se presenta: la selección intrasexual, o sea la competencia directa entre miembros del mismo sexo, usualmente los machos, para acceder a las parejas y, la selección intersexual, o sea la preferencia de un sexo —en las aves usualmente las hembras— por una pareja del sexo opuesto (**Futuyma**, 2021; **Jones & Ratterman**, 2009). La selección sexual se puede dar antes o después de la cópula y perseguir beneficios directos o indirectos (**Lindsay et al.**, 2019). La supervivencia de los individuos depende de su capacidad para adquirir alimentos, enfrentar los depredadores, adaptarse a cambios ambientales (beneficios directos) y resistir a infecciones por patógenos de diferentes órdenes (beneficio indirecto). Sin embargo, la mayoría de los ornamentos o rasgos fenotípicos exhibidos en los cortejos no parece tener relación directa con las habilidades requeridas para la supervivencia de los individuos ni con su éxito reproductivo. Algunos de estos rasgos, como los plumajes vistosos de los machos de algunas especies, incluso podrían hacerlos más visibles frente a sus depredadores (**Futuyma**, 2021).

En esta revisión analizaremos las hipótesis que postulan que la selección sexual involucra la selección de genes de la respuesta inmune, específicamente los del complejo mayor de histocompatibilidad (CMH), que le darían a la descendencia la capacidad de reconocer y enfrentar los microorganismos patógenos que puedan afectarlos (**Hamilton & Zuk**, 1982; **Folstad & Karter**, 1992; **Peen & Potts**, 1999; **Hasselquist**, 2007; **Rovet et al.**, 2017). Indudablemente son fenómenos complejos que involucran sistemas genéticos altamente polimórficos y diferentes entre especies, y que varían según los ecosistemas donde ocurre el proceso reproductivo y las condiciones en las que se presenten las interacciones hospedero-patógeno (**Lindsay et al.**, 2019; **Penn**, 2002; **Penn & Potts**, 1999; **Ziegler et al.**, 2005). Para ello repasaremos brevemente algunas de las características del sistema inmune de las aves, detallando luego la estructura y las variantes de los genes del CMH en diferentes grupos de aves, así como las hipótesis postuladas para explicar la relación entre la respuesta inmune y la reproducción, el papel de las respuestas olfativas en la biología aviar, sobre todo en la selección de parejas, y la evidencia de la relación entre las señales olfativas y la respuesta inmune, específicamente la del CMH; por último, presentaremos nuestra visión integral de la relación entre la actividad reproductiva y el sistema inmune de las aves.

Un eje fundamental de nuestra revisión es que los caracteres sexuales secundarios detectables por los sentidos (visuales, auditivos, olfativos), tanto físicos (morfológicos) como de comportamiento, pueden ser señales de la calidad genética (**Ridley**, 2000). Proponemos denominar los sentidos como “fenotipos evidentes” y como “fenotipos escondidos” a los caracteres no detectables sensorialmente (por lo menos para el observador humano), los cuales se transmiten a la descendencia por vía de la selección de la pareja y tienen un efecto adaptativo importante, entre ellos, los productos del CMH. Estas características pueden ser producto de “genes buenos”, que condicionan la capacidad de ayudar en la cría de los polluelos, acceder a los alimentos o defenderse de los depredadores (beneficios directos),

y permiten tener un sistema inmune vigoroso que brinde resistencia contra los patógenos a los que serían propensos (beneficios indirectos) por su modo de vida y las condiciones ecológicas de su hábitat, además de garantizar la supervivencia de la descendencia (**Penn & Potts**, 1999). La selección de estos “genes buenos” podría resultar en el aumento de la homocigocidad y la disminución de la variabilidad genética (**Penn & Potts**, 1999), pero también incluirían aquellos altamente polimórficos, como el CMH, que promueven la diversidad genética y la adaptación por su efecto en la respuesta inmune. Como propone **Ridley** (2000), cuando las hembras evolucionaron para adquirir la capacidad de detectar la calidad genética, se estableció una especie de control de calidad que funciona en cada nueva generación purgando los “genes malos” y favoreciendo la diversidad genética. Estos fenómenos ocurren en las aves con sistemas poligámicos de selección intersexual, en que la hembra selecciona al macho con que se va a aparear, y no en sistemas de selección intrasexual, en que los machos se eliminan entre sí, ni en los sistemas monogámicos (**Hasselquist & Sherman**, 2011), con la excepción de los apareamientos por fuera de la pareja (como se describirá más abajo).

El sistema inmune de las aves

El estudio del sistema inmune de las aves le ha hecho grandes aportes a la inmunología. En 1956 **Glick et al.** demostraron que las células productoras de anticuerpos en el pollo se diferencian en la bolsa de Fabricio, un pequeño apéndice localizado cerca de la cloaca, a partir de células progenitoras hematopoyéticas provenientes de los islotes del saco vitelino y el hígado. El hallazgo de estas células en dicha bolsa explica su nombre, linfocitos B, los cuales constituyen uno de los dos grandes compartimentos de la respuesta inmune adaptativa (**Ribatti et al.**, 2006). Posteriormente, los estudios de **Cooper et al.** (1965) definieron el papel de las células derivadas del timo (linfocitos T) y de la bolsa de Fabricio en la respuesta inmune adaptativa de los pollos, con funciones homólogas a las de otros vertebrados, aunque con algunas particularidades anatómicas y funcionales (**Schat**, 1994; **Sharma & Tizard**, 1984). Mediante la respuesta adaptativa, el sistema inmune reconoce secuencias (epítopes) de moléculas (antígenos) presentadas por las moléculas del CMH mediante receptores expresados clonalmente en la membrana de los linfocitos T (TCR) y B (BCR) (**Abbas et al.**, 2018). Otro aspecto importante en el sistema inmune de las aves es la inmunidad pasiva, pues las hembras pueden transferir anticuerpos a los huevos, un fenómeno análogo a la transferencia de anticuerpos a través de la placenta en los mamíferos (**Hamal et al.**, 2006).

El complejo mayor de histocompatibilidad (CMH) de las aves y sus productos

El CMH existe en todos los vertebrados y es el sistema genético más polimórfico conocido; lógicamente, los más estudiados son los HLA humanos y el H-2 murino (**Klein**, 1986; **Mehra**, 2010). El CMH es un complejo poligénico, con múltiples alelos en muchos de sus loci, que comprende fundamentalmente genes relacionados con la respuesta inmune (**Zinkernagel & Doherty**, 1997). Los genes del CMH se han clasificado en clases I, II y III, los denominados clásicos, además de una serie de genes conocidos como no clásicos. Los genes de clases I y II codifican glicoproteínas de membrana que unen péptidos pequeños para presentarlos a los linfocitos T (**Zinkernagel & Doherty**, 1997). Los péptidos presentados por las moléculas de clase I, presentes virtualmente en todas las células del organismo, son reconocidos por los linfocitos T CD8⁺, en tanto que los péptidos presentados por las moléculas CMH de clase II, localizados en la membrana de células dendríticas, macrófagos, monocitos y linfocitos B, son reconocidos por los linfocitos T CD4⁺ (**Abbas**, 2018). El CMH se caracteriza por el gran polimorfismo de los genes de clases I y II clásicos (**Sommer**, 2005). Estos polimorfismos se deben a variaciones en los aminoácidos de los dominios $\alpha 1$ y $\alpha 2$ de las moléculas de clase I y $\alpha 1$ y, principalmente, el $\beta 1$ de las moléculas de clase II, que forman un surco donde se localizan los péptidos

derivados del procesamiento antigénico (Bjorkman, 2006) (Figura 1), lo que permite a los linfocitos T reconocer el universo de péptidos antigénicos derivados tanto de las moléculas propias como de las moléculas de los múltiples microorganismos con los que podemos encontrarnos a lo largo de la vida, así como de otros antígenos presentes en el ambiente, no necesariamente asociados a microorganismos. Por su parte, los CMH no clásicos son poco polimórficos y reconocen péptidos, lípidos y glicolípidos con pocas variaciones en su estructura (Painter & Stern, 2012). Los genes de clase III incluyen genes diversos, entre ellos los del sistema del complemento y los de algunas citocinas (Yu *et al.*, 2000).

Como es lógico, las más de 10.000 especies de aves distribuidas en 249 familias (Lovette & Fitzpatrick, 2016) tienen similitudes derivadas de genes ancestrales debido a sus relaciones filogenéticas, pero la historia evolutiva de cada especie ha resultado en diferencias significativas entre ellas. Por su importancia económica y el gran número de linajes con características genéticas y fenotípicas sujetas a la selección durante miles de años de domesticación, *Gallus gallus* (Phasianidae) es el prototipo para el estudio de la biología aviar. El CMH de *G. gallus* fue descrito por Briles *et al.* en 1950 y se le denominó locus B. En 1961 Schierman & Nordskog demostraron que el locus B controla el rechazo de injertos y establecieron que corresponde al CMH en esta especie. En 1977, Briles *et al.* demostraron la asociación entre el locus B y la resistencia o la propensión a la enfermedad de Marek. En el mismo año, Pink *et al.* (1977) demostraron la similitud bioquímica de los polipéptidos codificados por los genes de clases I y II del CMH - B de *G. gallus* con sus homólogos del H-2 murino. El locus B fue mapeado en el brazo q del cromosoma 16 (GGA 16) (Delany *et al.*, 2009); según Fulton *et al.* (2016) contiene cerca de 46 genes y ocupa 209 kb, pero, a pesar de su tamaño reducido, contiene los homólogos esenciales existentes en el CMH de los mamíferos. En el CMH de *G. gallus* los genes CMH I y II clásicos, denominados BF y BL, respectivamente, están estrechamente ligados y son altamente polimórficos, al igual que en otros vertebrados. Kaufman *et al.* (1999) propusieron que el locus B corresponde al CMH mínimo esencial de las aves. Miller *et al.* (1994) demostraron en *G. gallus* la existencia de una región, denominada Rfp-Y, localizada por fuera del complejo B, que contiene dos genes de clase I y dos de clase II. El brazo q completo del microcromosoma 16 del *G. gallus* fue mapeado en el 2013 (Miller *et al.*, 2013) y, además de las regiones ya conocidas de NOR, CMH -B, CMH -Y y CD1, se mapearon los genes de los receptores barredores (ScR) y de los receptores olfatorios (OR), los cuales se localizan cerca a los centrómeros y están ligados con los genes de la región CMH-Y y con los genes de receptores del tipo inmunoglobulinas (Figura 2). En los telómeros se encuentra la región CMH-B, que contiene los genes CMH clásicos, luego se localizan los genes de clase III (Kaufman, 2013) y en una pequeña región están dos genes CD1, importantes en la presentación de lípidos a algunas poblaciones de linfocitos T. En los pollos, los genes de TAP y tapasina, moléculas que participan en el procesamiento antigénico, están localizados en el CMH-B (Kaufman, 2013). Es interesante que casi

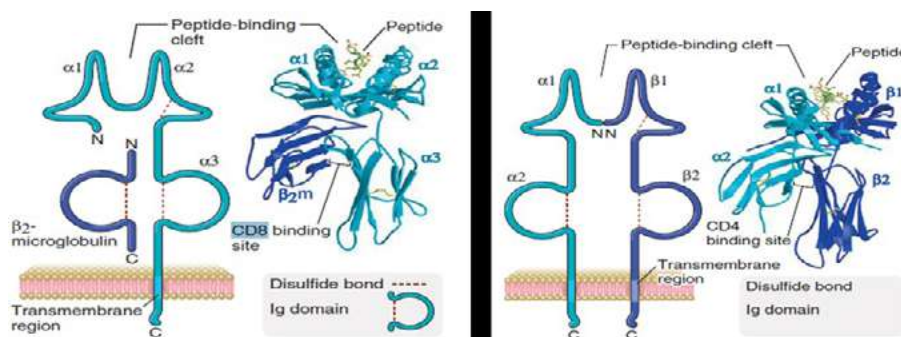


Figura 1. Estructura de las moléculas de glicoproteínas clase I y clase II del CMH. <https://co.pinterest.com/pin/113293746866654418/>

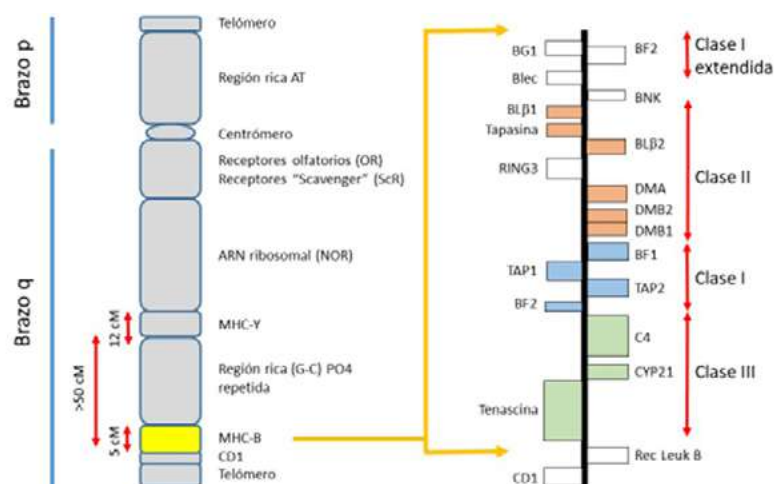


Figura 2. Estructura del cromosoma 16 (GGA 16) y la región del CMH en *Gallus gallus*. Modificado de (Kaufman, 2014; Miller & Taylor, 2016; Warren *et al.*, 2017). Los genes a la izquierda indican transcripción en dirección al centrómero y los genes a la derecha transcripción en dirección al telómero.

todos los genes del cromosoma 16 del gallo tienen algún papel en la respuesta inmune o tienen homólogos con funciones inmunes demostradas en otras especies, incluso, el BF1 puede ser el equivalente a los HLA-C, cuyas moléculas sirven como ligando para los KIR en células NK (Miller & Taylor, 2016). Es importante resaltar que los genes CMH-IIA, al igual que en los mamíferos, son menos polimórficos que los genes IIB (Ren *et al.*, 2011; Salomonsen *et al.*, 2003).

En otras aves el CMH tiene grandes diferencias; en general, en las Galliformes es más pequeño (O'Connor *et al.*, 2019); en las passeriformes, la estructura del CMH es más compleja, pues tienen un mayor número de genes y no todos están en la misma región cromosómica, incluso pueden estar dispersos en el genoma, lo que sugiere que en la historia evolutiva de estas especies han ocurrido fusiones de cromosomas, duplicación y translocación de genes (Minias *et al.*, 2018b; He *et al.*, 2022; Bonneaud *et al.*, 2004; Drews *et al.*, 2017; Balakrishnan *et al.*, 2010; Bollmer *et al.*, 2010; Drews & Westerdahl, 2019); además, los intrones son más largos y hay muchos pseudogenes (Westerdahl, 2007).

Una dificultad importante para estimar la variabilidad del CMH en las aves utilizando el secuenciamiento de amplicones de alta eficiencia es la imposibilidad de asignar alelos a genes específicos en especies con un gran número de duplicaciones (parálogos) en los genes del CMH; asimismo, la falta de información sobre la expresión de estos alelos dificulta comprender la función de dichas moléculas; sin embargo, las nuevas tecnologías de secuenciamiento de fragmentos largos y de ensamblaje de las secuencias cortas han resuelto muchos de los problemas, especialmente en las passeriformes (O'Connor *et al.*, 2019). Minias *et al.* (2018a) estimaron el número de copias de loci CMH I y IIβ en 250 especies de 68 familias de aves; sus resultados muestran que en el árbol evolutivo de las aves hay evidencia de una evolución acelerada y una selección estabilizadora de los genes de clase I, mientras que el número de genes de clase IIβ depende de una selección fluctuante y de la deriva. Uno de sus hallazgos importantes es que las aves con mayor masa corporal tienen un menor número de copias de genes de clase I y IIβ; asimismo, el número de copias de CMH-I se correlacionó con el tiempo de vida y se encontró que las aves migratorias y las que viven en colonias poseen un mayor número de copias de CMH-IIβ que las residentes (Minias *et al.*, 2018a). También analizaron (Minias *et al.*, 2018b) cerca de 11.000 secuencias de CMH-I y IIβ en más de 250 especies disponibles en el GenBank (Figura 3) y encontraron que en las aves no passeriformes había $2,6 \pm 0,29$ copias de genes de clase I y $2,04 \pm 0,08$ de clase II, un número menor al de las passeriformes,

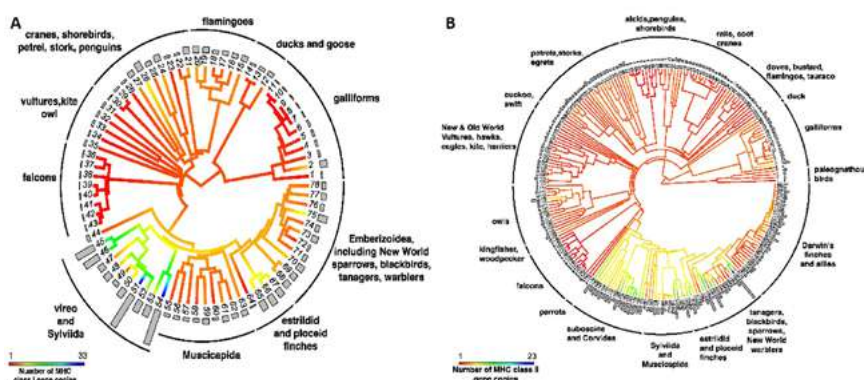


Figura 3. Duplicaciones de los loci (A) CMH-I y (B) CMH-II en no Paseriformes y Paseriformes. (Tomado de (Minias *et al.*, 2018a; O'Connor *et al.*, 2019))

que presentaron $7,66 \pm 1,23$ copias de clase I y $4,97 \pm 0,41$ de clase II β . La variación en los patrones de selección entre los dos grandes grupos de aves estaría relacionada con la forma de vida y los nichos ecológicos en que viven, lo que condiciona el tipo de parásitos a que están expuestos, de tal manera que en las no passeriformes hay mayor selección en los genes CMH-II (relacionados con las infecciones extracelulares), en tanto que en las passeriformes la selección es mayor en los genes CMH-I (relacionados con las infecciones intracelulares), particularmente en los dominios $\alpha 1$ y $\alpha 2$ que conforman el sitio de unión a los epítopes (Minias *et al.*, 2021). Estos autores (Minias *et al.*, 2017) han sugerido que la evolución de los sitios de unión de CMH-II dependiente de patógenos fue más rápida y fuerte en las aves migratorias y las especies que viven en colonias, que en las sedentarias y solitarias. He *et al.*, (2020) lograron ensamblar secuencias largas de los loci CMH en 34 especies, passeriformes y no passeriformes, y también encontraron una gran variación en el número de loci CMH-I y CMH-II, siendo mayor en las passeriformes, específicamente los CMH-II en la familia Pipridae, en la que encontraron hasta 193 loci de clase II. He *et al.* (2022) también exploraron los patrones macroevolutivos del CMH aviar utilizando secuenciación de tercera generación, y confirmaron que en el CMH ancestral, detectado solo en Paleognathae y Galliformes, ya existía ligamiento entre el CMH-I y el CMH-II (tanto II α como II β) en una región de <100 kb, con ausencia de genes CMH-III; asimismo, confirmaron que las múltiples duplicaciones génicas de II β en las passeriformes están dispersas en varios cromosomas.

Sistema inmune y reproducción

El efecto de las hormonas sexuales sobre la respuesta inmune en las aves ha sido revisado en un extenso metaanálisis por Foo *et al.* (2016) y por Roved *et al.* (2017). Estos efectos son particularmente importantes durante el cortejo, la selección de pareja, el apareamiento y el cuidado de los polluelos. Se han propuesto varias hipótesis, no excluyentes, para explicar la interacción entre las hormonas sexuales y el sistema inmune y sus efectos en el cortejo, el apareamiento y el éxito reproductivo en las aves (Hasselquist, 2007).

Según la hipótesis de la Reina Roja, en los apareamientos de individuos con CMH diferentes se producen crías con CMH heterocigotos y, por lo tanto, con mayor diversidad en el CMH, lo que les permite detectar patógenos que, a su vez, evolucionan rápidamente para escapar de la respuesta inmune al ser reconocidos por alelos raros, lo cual promueve la diversidad del CMH; asimismo, las preferencias de apareamiento basadas en el CMH contribuyen a evitar la homocigocidad (Penn & Potts, 1999). En este sentido, Sepil *et al.* (2013) demostraron en *Parus major* (Paridae) que tres supertipos de CMH-I están asociados con la supervivencia, el reclutamiento anual y el éxito reproductivo, caracteres de gran valor adaptativo. La gran pregunta es: ¿cómo por medio de los “fenotipos evidentes” en el

cortejo se puede seleccionar la pareja con el mejor “fenotipo escondido” asociado con la calidad genética que permita transmitir genes buenos altamente polimórficos y aumentar la variabilidad genética en la descendencia?

La hipótesis de la desventaja inmunitaria propone que sólo los machos en las mejores condiciones son capaces de exhibir los costosos ornamentos sexuales (Folstad & Karter, 1992; Hamilton & Zuk, 1982; Lovette & Fitzpatrick, 2016); esto implica que si la energía es limitada, la respuesta inmune, que es muy costosa en términos energéticos, nutricionales y patológicos (Roved *et al.*, 2017), debe “negociarse” cuando hay otras actividades prioritarias que demandan mucha energía, como es el proceso reproductivo (Ardia, 2005; Bonneaud *et al.*, 2003; Hanssen *et al.*, 2003; Wedekind & Folstad, 1994). Hay evidencia amplia y sólida de que la testosterona es responsable del desarrollo de los caracteres sexuales secundarios tanto físicos como de comportamiento en los machos, pero también tiene un efecto inmunosupresor, por lo que la infección afecta la expresión de estos caracteres porque disminuye la producción de testosterona (Foo *et al.*, 2016; Roved *et al.*, 2017); sin embargo, estas relaciones se ven equilibradas por factores como la resistencia o la propensión genética, el tiempo de la infección y el estado nutricional (Folstad & Karter, 1992). Según Folstad & Karter (1992), los caracteres sexuales secundarios dependientes de andrógenos se ajustan de acuerdo a los riesgos de infección propiciados por la disminución de la respuesta inmune y el éxito reproductivo, de tal manera que solo aquellos machos que tienen una efectiva resistencia genética a las infecciones pueden exhibir plenamente sus caracteres sexuales secundarios, es decir, los “fenotipos evidentes”, tener éxito reproductivo y transmitir los genes de resistencia inmunitaria a su descendencia (Folstad & Karter, 1992). Mougeot *et al.* (2004) probaron la hipótesis de la desventaja inmunitaria en *Lagopus lagopus scoticus* (Fasianidae) tanto en condiciones silvestres como experimentales; en el primer caso encontraron que el tamaño de la cresta de los machos, un ornamento dependiente de la testosterona, se correlacionó positivamente con la respuesta mediada por linfocitos T medida por la reacción a la inyección intradérmica de fitohemaglutinina (FHA). Los investigadores colocaron en el grupo experimental implantes de testosterona y un mes después los machos tratados habían aumentado el tamaño de la cresta, pero perdieron condiciones físicas y tenían una menor respuesta a la FHA. Concluyeron, entonces, que los machos en mejores condiciones y con una buena respuesta inmune fueron los que tenían crestas más grandes, lo que reflejaba una mejor calidad fenotípica y genética, por lo que eran los preferidos de las hembras. Es necesario tener precaución sobre el significado de la respuesta a la FHA utilizada en este estudio y en otros que se describirán posteriormente. La FHA es una lectina mitogénica muy utilizada para estudiar la respuesta policlonal de los linfocitos T; sin embargo, el significado de estas respuestas es difícil de asociar con las monoclonales u oligoclonales de linfocitos T inducidas por el reconocimiento de epítopes específicos presentados por moléculas del CMH a los TCR, que tienen una expresión clonal (Bonforte *et al.*, 1972).

En su hipótesis de la selección sexual antagonista, Roved *et al.* (2017) proponen las siguientes tendencias en los comportamientos relacionados con el apareamiento y la potencia de la respuesta inmune: 1) grandes diferencias según el sexo en la respuesta inmune de especies con sistemas de apareamiento de poligamia social; 2) grandes diferencias según el sexo en la respuesta inmune de especies en las que la selección intrasexual es muy fuerte (p. ej., especies en que los machos se involucran frecuentemente en peleas y tienen altos niveles de testosterona), 3) grandes diferencias según el sexo en la respuesta inmune de especies con un alto grado de selección intersexual, y 4) ausencia de diferencias, o diferencias muy pequeñas entre los sexos en la respuesta inmune de especies con sistemas de apareamiento monogámicos y bajo nivel de selección sexual.

En resumen, la hipótesis de selección sexual antagonista (Roved *et al.*, 2017) propone que las diferencias en la potencia de la respuesta inmune entre los sexos puede llevar a la selección sexual antagonista debido a los efectos diferenciales de los andrógenos y los estrógenos durante el periodo reproductivo. La testosterona disminuye, particularmente, las respuestas de inmunidad innata y las respuestas de tipo Th2 y Th17, pero tiene un efecto

variable sobre las respuestas Th1; por el contrario, los estrógenos y la progesterona tienen efecto estimulador de la actividad de los macrófagos y de la respuesta de tipo Th2, pero inhibe las Th1 y Th17 (Roved *et al.*, 2017).

CMH y caracteres sexuales secundarios

Algunos ornamentos o caracteres sexuales secundarios dependientes de testosterona, que cambian durante la estación de cortejo y apareamiento, están asociados con el CMH en diferentes especies (Peters *et al.*, 2000). En el faisán común, *Phasianus colchicus* (Phasianidae), los haplotipos CMH se asocian con el tamaño de las espuelas, lo que incrementa su supervivencia y los hace más atractivos para el apareamiento (Von Schantz *et al.*, 1996; 1997). Verhulst *et al.* (1999) correlacionaron en tres líneas de gallos el tamaño de la cresta con los niveles de anticuerpos contra eritrocitos de carnero y encontraron que los gallos con cresta grande tenían títulos de anticuerpos más bajos y altos niveles de testosterona y viceversa, lo que sugiere que esta hormona media la negociación entre los ornamentos como caracteres sexuales secundarios y la respuesta inmune. Sin embargo, existen evidencias de que el efecto inmunosupresor de la testosterona puede ser indirecto por la inducción de corticoesteroides (Hasselquist, 2007). Recientemente, Pikus *et al.* (2022) presentaron evidencia de que en *Fulica atra* (Rallidae) la diversidad alélica de los genes CMH-I y CMH-II se asoció con un mal estado físico, menos calidad en los ornamentos y un mal desempeño reproductivo. Para los autores, el mantener una alta diversidad en el CMH tiene un costo tan alto que supera los posibles beneficios de un amplio repertorio en él.

Papel de las señales olfativas en la selección sexual de las aves

En el reino animal las señales olfativas están entre las más reconocidas en la selección de pareja (Boyse, 1986; Yamazaki *et al.*, 2000; Ziegler *et al.*, 2005). La relación entre las señales químicas olfativas y la respuesta inmunitaria, particularmente en el CMH, también se ha planteado en diferentes filos animales (Penn, 2002; Penn & Potts, 1998; 1999; Schubert *et al.*, 2021; C. Wedekind & Penn, 2000), de tal manera que la detección de olores puede ser una señal para evitar la relación entre parientes y seleccionar parejas con capacidad de responder inmunológicamente de forma eficiente a los patógenos y, por ende, de transmitir a la descendencia los genes relacionados con la defensa contra las infecciones. Es importante mencionar que se han identificado ligamientos entre loci CMH y los genes de los receptores olfativos (Miller *et al.*, 2013). Recientemente, el papel de los olores en la biología de las aves ha sido compendiado por Whittaker en su libro *The secret perfume of the birds: uncovering the science of avian scent* (Whittaker, 2022). Durante mucho tiempo se negó que en las aves estas señales desempeñaran un papel biológico importante; posteriormente, se reconoció que en algunas especies el olfato permite la localización de alimento, particularmente en las aves carroñeras (Whittaker, 2022). Más recientemente, en múltiples estudios anatómicos y fisiológicos se ha demostrado que en todas las especies de aves existen estructuras olfativas para la detección de diferentes tipos de olores con capacidad de inducir respuestas importantes como el reconocimiento de parientes y la escogencia de parejas (Whittaker & Hagelin, 2021). Una demostración destacada de la importancia de la capacidad olfativa es que algunas aves, como *Platycercus elegans* (Psittacidae), son capaces de diferenciar el olor de las plumas de su misma especie, de las subespecies y de especies diferentes (Mihailova *et al.*, 2014).

Las aves no tienen glándulas sudoríparas como los mamíferos y el olor proviene del aceite de acicalamiento producido por la glándula uropigial localizada en la base de la cola, compuesto principalmente por alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y ácidos grasos con cadenas de diferente tamaño, entre otros (Whittaker, 2022), el cual es llamado volatilo por Alves Soares *et al.* (2024). Este aceite se utiliza para el acicalamiento y como impermeabilizante en algunas aves zambullidoras; su olor es una señal importante en las relaciones sociales para el reconocimiento de la especie y de los parientes y, lo que es más relevante en esta revisión, en las relaciones sexuales como atractivo o disuasor sexual (Whittaker & Hagelin, 2021). La glándula uropigial expresa receptores tanto

para andrógenos como para estrógenos (Daniel *et al.*, 1977; Whittaker *et al.*, 2018) y, en consecuencia, la composición del aceite varía por efecto de estas hormonas en época de reproducción, haciéndose más volátil debido a una mayor concentración de ácidos grasos de cadenas medias y cortas (Whittaker *et al.*, 2011). Además, hay una respuesta diferencial en los sexos; tradicionalmente se ha considerado que el olor de los machos es responsable de las señales hacia otros machos o hacia las hembras; sin embargo, durante las temporadas reproductivas las hembras de muchas especies tienen glándulas uropigiales más grandes, mayor abundancia relativa o absoluta de compuestos volátiles y semivolátiles y mayor diversidad química en los compuestos del aceite de acicalamiento que los machos (Whittaker & Hagelin, 2021). Las hembras también tienen en sus glándulas uropigiales una mayor abundancia y diversidad de microorganismos simbioses con capacidad de degradar las moléculas y hacerlas más volátiles (Whittaker *et al.*, 2019). Según estas autoras, la mayor diversidad microbiana lleva a una mayor diversidad química en los perfiles de las hembras. Las investigadoras (Whittaker & Hagelin, 2021) hipotetizan que el aceite de acicalamiento protege el plumaje de las hembras, expuesto a bacterias y parásitos durante la incubación y el anidamiento y, además, puede servir como una señal química, social y adaptativa para los machos y los congéneres. Las funciones del olor del aceite de acicalamiento relacionadas con el proceso reproductivo serían:

1) la atracción sexual, que incluye cambios en la fisiología de los machos, la señal de receptividad reproductiva y las señales de identidad individual para evitar la endogamia; 2) la competencia intrasexual, que incluye la demarcación del territorio, las señales de dominancia, la supresión reproductiva y la sincronización, y 3) los comportamientos maternos, incluido el reconocimiento entre madre e hijo y el cuidado de los polluelos (Whittaker & Hagelin, 2021). En la figura 4 se resume el papel de las hormonas sexuales, el microbioma y el CMH en las señales reproductivas asociadas al olor.

Se ha demostrado que en la mucosa nasal de las aves existen diferentes receptores olfativos capaces de transmitir señales a áreas definidas del cerebro (Whittaker, 2022). Sin *et al.* (2022) secuenciaron y ensamblaron con alta calidad los genes de los receptores olfativos (OR) en *Oceanodroma leucorhoa* (Hydrobatidae), una especie marina que utiliza el olfato para la búsqueda de alimento, el reconocimiento de los nidos, la comunicación social y el reconocimiento individual. Los patrones de expresión de los OR mostraron dos genes altamente expresados en adultos y cuatro expresados diferencialmente según la edad, lo que sugiere que pueden tener especializaciones ontogenéticas; además, encontraron que los genes expresados diferencialmente tienen un alto número de copias. Gilles *et al.* (2024) estudiaron los fenotipos olfativos mediante la caracterización química del aceite de acicalamiento en parejas de machos y hembras de *Ficedula hypoleuca* (Muscicapidae)

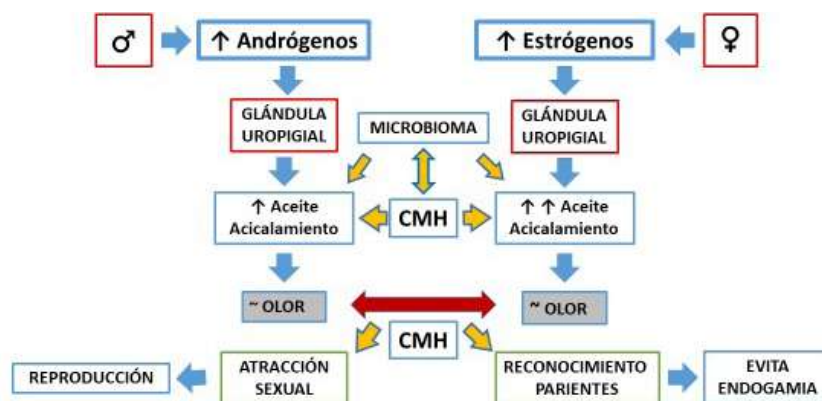


Figura 4. Efecto de las hormonas sexuales, producidas durante el periodo reproductivo, en la producción y composición del aceite de acicalamiento en aves machos y hembras, su modificación por el microbioma, su relación con el CMH y el efecto en la atracción sexual o el rechazo de la endogamia.

durante la anidación, y encontraron que las parejas tenían perfiles químicos similares, pero el aceite era más variado y más volátil en las hembras que en los machos, particularmente durante la incubación.

En la revisión de **Schubert et al.** (2021) se incluyeron muchos estudios que sustentan la relación entre el olor y el CMH en la selección de parejas. **Slade et al.** (2016) estudiaron la composición del aceite de acicalamiento en parejas reproductoras de gorrones *Melospiza melodia* (Emberizidae) durante la crianza de los polluelos y en las hembras durante la incubación. El análisis por diadas mostró que la distancia química de las ceras se correlacionó con la distancia en los aminoácidos del CMH-II β en las diadas macho-hembra, pero no en las del mismo sexo; sin embargo, la diversidad química no reflejó la diversidad de alelos del CMH-II β , aunque cuatro ésteres de ceras reflejaron mejor la diversidad en el CMH-II β . **Leclaire et al.** (2014) demostraron que la gaviota *Rissa tridactyla* (Laridae) se aparea preferencialmente con parejas genéticamente diferentes, y la similitud en la composición del aceite de acicalamiento se correlacionó positivamente con la relación del CMH en diadas macho-macho y macho-hembra. Este mismo grupo de investigadores (**Leclaire et al.**, 2017) estudió el petrel azul *Halobaena caerulea* (Procelleriidae), una especie marina monógama con un conocido buen sentido del olfato que se aparea preferencialmente con parejas que tienen el CMH-II β diferente y en la que machos y hembras comparten las labores parentales (**Strandh et al.**, 2012). Sus hallazgos evidenciaron que durante la incubación los machos prefirieron el olor de las hembras con el CMH-II β diferente, mientras que, contrario a lo esperado, las hembras prefirieron los más similares. Recientemente, **Pineaux et al.** (2023) demostraron que las hembras de la gaviota *R. tridactyla* (Laridae) eran capaces de detectar la similitud y la diversidad del CMH-II en los machos.

También hay reportes que no confirman la asociación del CMH con las señales olfativas y la selección de parejas. Utilizando una cámara olfatométrica, **Amo et al.** (2022) estudiaron si machos y hembras de *Passer domesticus* (Passeridae), una especie gregaria en que se ha reportado la influencia del CMH en la selección de pareja (**Bonneaud et al.**, 2004), respondían preferencialmente a parejas potenciales según las diferencias en el CMH-I o en su diversidad; sus resultados no demostraron ninguna preferencia, lo que sugiere que en esta especie los CMH-I no se detectan por el olfato. **Amo & López-Rull** (2023) también utilizaron recientemente la cámara olfatométrica para estudiar si las hembras de *Taeniopygia guttata* (Estrildidae) en época reproductiva podían detectar por el olor las condiciones físicas y el peso corporal de los machos. Efectivamente, las hembras fueron capaces de hacer la diferenciación, pero, sorprendentemente, seleccionaron los machos en más malas condiciones y evitaron aquellos con las mejores. Los autores sugieren que en las hembras de esta especie la preferencia social predomina sobre las preferencias de apareamiento.

Los olores también participan en el reconocimiento de los parientes como un mecanismo para evitar la endogamia. Las hembras de *T. guttata* (Estrildidae) disminuyen sus comportamientos reproductivos en presencia de hermanos, en tanto que las hembras anósmicas se aparean al azar con machos relacionados o no (**Caspers et al.**, 2015). El petrel *Hydrobates pelagicus* (Hydrobatidae) prefiere el olor de individuos no relacionados que el de los parientes (**Bonadonna & Sanz-Aguilar**, 2012).

Respuesta inmune, CMH y reproducción

El posible papel del CMH en la reproducción aviar ha sido bellamente parafraseado por **Whittaker** (2022) como “**Magic Happiness Controler**” (cuyas iniciales coinciden con las de **Major Histocompatibility Complex**, MHC). Los estudios sobre la relación entre la selección de parejas y el CMH en diferentes especies han permitido proponer que la selección de parejas con CMH diferente a los propios sería una estrategia adaptativa para evitar la endogamia y producir una descendencia con una diversidad en el CMH óptima o elevada, que aumente el reconocimiento de un universo antigénico más amplio y, en consecuencia, una mayor resistencia a los patógenos (**Bethanne & Scott**, 2002; **Dandine-Roulland et al.**, 2019; **Landry et al.**, 2001; **Potts & Wakeland**, 1993; **Ziegler et al.**,

2005). **Lakshmanan et al.** (1997) encontraron que los polimorfismos del CMH-II en el gallo no sólo se asocian con la resistencia o propensión a la enfermedad de Marek y otras infecciones, sino también a la producción de huevos. **Abplanalp et al.** (1992) estudiaron durante siete generaciones la asociación entre el locus B (CMH) y varios parámetros reproductivos en una línea singénica y 12 líneas congénicas de gallinas con diferentes haplotipos, y encontraron una asociación significativa entre sublíneas con respecto al empollamiento, producción de huevos durante 40 semanas, peso de los huevos, peso corporal y mortalidad. El mismo grupo de investigadores (**Sato et al.**, 1992) encontró que los heterocigotos tienen un mejor desempeño con relación a estos parámetros. **Gillingham et al.** (2009) estudiaron en *G. gallus* si los machos tienen preferencias de pareja asociadas al CMH; con este propósito, presentaron a los machos hembras con CMH similares y diferentes y no encontraron preferencia por unas u otras; sin embargo, hallaron un mecanismo críptico posterior a la cópula por el cual los machos eyacularon más esperma cuando la hembra tenía un CMH diferente. Este mismo grupo (**Lovlie et al.**, 2013) estudió como las hembras poliándricas evitan la endogamia y demostraron que, en condiciones de apareamiento experimentalmente controladas, la selección en contra del esperma relacionado ocurre en el tracto reproductor de las hembras y está dirigida a las similitudes en el CMH, lo que sugiere que los mecanismos posteriores al apareamiento reducen la endogamia y promueven la variabilidad del CMH de la descendencia.

Bonneaud et al. (2004a) probaron la hipótesis de la inversión terminal en una población silvestre de *P. domesticus* (Passeridae) mediante la inoculación de hembras en estación reproductiva con una vacuna para virus Newcastle, o solución salina como control; inmediatamente después de la primera nidada todos los huevos fueron removidos. Los resultados mostraron que las hembras vacunadas reemplazaron más frecuentemente la nidada con un número mayor de huevos que las hembras de control, y el tamaño de los polluelos fue mayor en el caso de las hembras vacunadas. Aunque el genotipo del CMH no tuvo efecto significativo, la diversidad alélica se correlacionó positivamente con la sobrevivencia de los polluelos. Los autores proponen que la activación del sistema inmune puede ser la señal de una probable reducción en la sobrevivencia que lleva a una costosa inversión en el comportamiento. Este mismo grupo (**Bonneaud et al.**, 2006) estudió la selección de parejas en *P. domesticus* y encontró que las hembras no formaron parejas con machos que tenían pocos alelos, ni con aquellos cuyos CMH eran muy diferentes al de las hembras, lo que sugiere que la selección de parejas no fue al azar.

A pesar de todas estas evidencias, **Kamiya et al.** (2014) en un metaanálisis de las publicaciones aparecidas hasta el 2014 concluyeron que la evidencia que sustenta el efecto del CMH en la escogencia de pareja era aún débil. Sin embargo, durante la última década se han acumulado evidencias que sustentan que el CMH efectivamente desempeña un papel importante en la selección de parejas en muchas especies de aves, particularmente en el caso de las parejas adicionales, como se detalla más adelante. En un interesante estudio, **Hoover et al.** (2018) analizaron los datos recolectados durante cinco años provenientes de 1.078 adultos y 9.025 polluelos del albatros *O. leucorhoa* (Hydrobatidae) y encontraron una asociación positiva entre el éxito reproductivo y la heterocigocidad en el locus CMH-IIB.

CMH y selección de parejas adicionales

Las aves raramente son monógamas sexualmente; con base en estudios moleculares, se estima que en el 90 % de las especies (86 % passeriformes), principalmente las hembras tienen relaciones con parejas diferentes, la llamada fertilización extra-pareja (*extra pair fertilization*, EPF) a su pareja social (**Griffith et al.**, 2002). En las aves que viven en grupos donde se forman parejas sociales estables, las hembras buscan las EPF con machos de grupos diferentes (**Hasselquist & Sherman**, 2001; **Lifjeld et al.**, 2019; **Lifjeld & Robertson**, 1992; **Petrie & Kempenaers**, 1998). Se ha especulado que mediante las cópulas extramaritales las hembras pueden tener acceso a “genes buenos” o, alternativamente, aumentar el repertorio de los genes que transmiten a la descendencia (**Colegrave et al.**,

2002). Además, la estrategia de apareamiento extra-pareja se favorece en especies con alto grado de selección frente a patógenos (Lindsay *et al.*, 2019), como es el caso de las aves migratorias (Spottiswoode & Møller, 2004). En la **tabla 1** se resumen algunas de las investigaciones realizadas para analizar el posible beneficio de las relaciones extra-pareja en diferentes especies de aves.

Algunos de estos estudios pretendieron determinar si la cópula con parejas adicionales

Tabla 1. Apareamiento extra-pareja (EPF), respuesta inmune y asociación con el MHC

Especie	Familia	Hallazgos principales	Dependiente de CMH	Referencia
<i>Luscinia svecica</i>	Muscicapidae	Mayor respuesta a FHA en polluelos de EFP comparados con hijos de pareja social	¿?	(Johnsen <i>et al.</i> , 2000)
<i>Geothlypis trichas</i>	Parulidae	Respuesta a FHA mayor en hijos de parejas extras	¿?	(Garvin <i>et al.</i> , 2006)
<i>Tachycineta bicolor</i>	Hirundinidae	Polluelos producto de EPF tienen mayor heterocigocidad en 10 loci de microsatélites	¿?	(Stapleton <i>et al.</i> , 2007)
<i>Luscinia s. svecica</i>	Muscicapidae	Mayor heterocigocidad en microsatélite y respuesta a FHA aumentada en polluelos de EFP	¿?	(Fossey <i>et al.</i> , 2008)
<i>Cyanistes caeruleus</i>	Paridae	Respuesta a la FHA mayor en polluelos de parejas extras que en polluelos de pareja social	¿?	(Arct <i>et al.</i> , 2013)
<i>Passerculus sandwichensis</i>	Fringillidae	Hembras jóvenes evitan copular con machos de CMH similar	+	(Freeman-Gallant <i>et al.</i> , 2003)
<i>Acrocephalus sechellensis</i>	Acrocephalidae	Hembras buscan pareja extra cuando pareja social tiene baja diversidad de CMH	+	(Richardson <i>et al.</i> , 2005)
<i>Junco hyemalis</i>	Emberizidae	Más parejas extras en grupos urbanos que en rurales. Más EPF en parejas sociales con CMH similares	+	(Whittaker <i>et al.</i> , 2012)
Ocho especies passeriformes	Muscicapidae y Turdidae	Especies más promiscuas tienen más diversidad en intrones autosómicos. Diversidad de CMH. Alelos de exon 2 de CMH-IIβ tiene mas diversidad	CMH-IIβ exón 2	(Gohli <i>et al.</i> , 2013)
<i>Geothlypis trichas</i>	Parulidae	Color del plumaje de máscara se asocia con CMH y hembras prefieren machos con mayor variación en CMH-II	+ CMH-II	(Whittingham <i>et al.</i> , 2015)
<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	Parulidae	Similitud de CMH con pareja social, en EPF las hembras buscan CMH diferentes	+	(Halupka <i>et al.</i> , 2023)
<i>Luscinia svecica</i>	Muscicapidae	Selección del macho por edad y CMH dependiendo de edad	+	(Rekdal <i>et al.</i> , 2023)
<i>Spheniscus magellanicus</i>	Spheniscidae	Ausencia de asociación entre selección de parejas y CMH	-	(Knafler <i>et al.</i> , 2012)

¿?: no es clara la asociación con el CMH; +: asociación positiva con el CMH; -: asociación negativa con el CMH

tiene beneficios inmunológicos, no necesariamente dependientes del CMH. **Johnsen et al.** (2000) compararon la respuesta a la inyección intradérmica de fitohemaglutinina (FHA) en polluelos de *Luscinia svecica* (Muscicapidae) hijos de parejas sociales y de otras parejas diferentes en nidos atendidos por la pareja social. Los polluelos hijos de la pareja diferente presentaron una respuesta inmune de linfocitos T mayor que la de sus hermanos medios hijos de la pareja social. **Garvin et al.** (2006) también encontraron en *Geothlypis trichas* (Parulidae) que los hijos de las parejas diferentes tenían una mayor respuesta inmune medida por la respuesta a la FHA intradérmica que los hijos de las parejas sociales. **Stapleton et al.** (2007) estudiaron la compatibilidad genética en golondrinas *Tachycineta bicolor* (Hirundinidae) y encontraron que el 47 % de las crías había resultado de fertilizaciones extra-pareja y el 83 % de las hembras habían tenido por lo menos un polluelo de una pareja extra. El análisis de diez loci de microsatélites mostró que los polluelos de parejas extras eran más heterocigotos que sus hermanos medios, hijos de la pareja social. **Fossey et al.** (2008) hicieron un seguimiento por más de dos años de *L. svecica* (Muscicapidae), una especie socialmente monógama, para determinar la asociación entre la paternidad con parejas extras, la heterocigocidad multiloci en microsatélites y la respuesta inmune medida por la respuesta a la FHA; sus resultados evidenciaron una mayor heterocigocidad y una respuesta inmune aumentada en los polluelos de los apareamientos con parejas extras, comparados con los polluelos de la pareja social; sin embargo, la heterocigocidad y la respuesta inmune no se correlacionaron. **Arct et al.** (2013) compararon la respuesta a la FHA en nidadas mixtas de polluelos de la pareja social y de parejas extras de *Cyanistes caeruleus* (Paridae) y encontraron que la respuesta era mayor en los polluelos de las parejas extras.

Otros reportes se enfocan en la relación entre las EFP y el CMH. **Freeman-Gallant et al.** (2003) estudiaron una población silvestre de *Passerculus sandwichensis* (Passerellidae) durante dos estaciones de reproducción y encontraron que las hembras jóvenes, no así las viejas, evitaban copular con machos de CMH similares. **Richardson et al.** (2005) estudiaron los patrones de selección de parejas dependiente del CMH en *Acrocephalus sechellensis* (Acrocephalidae) y encontraron que las hembras buscaban parejas diferentes a la pareja social cuando estas tenían baja diversidad en su CMH. **Whittaker et al.** (2012) y **Whittaker** (2022) compararon las similitudes en el CMH de parejas de *Junco hyemalis* (Emberizidae) en una población recientemente establecida en una área urbana y otra establecida por largo tiempo en una área montañosa; sus hallazgos no evidenciaron diferencias en los apareamientos en cuanto al CMH. En las parejas del área montañosa no se encontraron diferencias asociadas al hecho de tener o no parejas extras, pero en las del área urbana las parejas más similares en el CMH tenían más apareamientos con parejas extras y las parejas más fieles eran las que tenían CMH más diferentes.

Con el fin de determinar si las preferencias en la selección de parejas extras por parte de las hembras busca beneficios, específicamente buenos genes o genes compatibles, **Gohli et al.** (2013) estudiaron 19 especies de paseriformes con reconocida actividad promiscua en las hembras. Sus resultados evidenciaron que las especies más promiscuas tienen mayor diversidad en los intrones autosómicos. Además, el estudio más detallado de ocho especies de las familias Muscicapidae y Turdidae mostró que los alelos del exón 2 del CMH-IIB tienen una mayor diversidad, lo que sugiere una mayor capacidad de reconocer péptidos antigénicos. **Whittingham et al.** (2015) compararon si la diferencia en el color del plumaje de la máscara (ornamento) de *Geothlypis tricha* (Parulidae), variedad de Wisconsin, la cual presenta máscara negra, y la de New York, que tiene garganta amarilla, se asociaba a variaciones en el CMH. Sus resultados muestran que, aunque los machos de ambas variedades tienen ornamentos diferentes, las hembras prefirieron en sus apareamientos por fuera de la pareja social a machos con ornamentos más notorios y mayor variación en el CMH-II, lo que se relaciona con la resistencia a hemoparásitos. Recientemente, el grupo de Westerdahl (**Halupka et al.**, 2023) ha hecho notar que generalmente en las parejas sociales la selección es independiente del CMH, pues en este caso la selección está fuertemente influenciada por beneficios directos como la calidad del territorio, el rango social y la

capacidad de recolectar alimentos para las crías, lo que enmascara las señales para la selección basada en el CMH. Otra situación ocurre en los apareamientos extras donde no existen esas restricciones. Las cópulas extra-parejas pudieran compensar parcialmente la similitud del CMH con la pareja social. Para determinar si la similitud o disimilitud es importante en la selección de la pareja social o de la extra, estos investigadores (**Halupka et al.**, 2023) estudiaron durante seis años una población de *Acrocephalus scirpaceus* (Parulidae) y encontraron que las hembras que tenían polluelos de parejas extras presentaban una mayor similitud con el CMH de su pareja social que aquellas que no tenían polluelos de parejas extras. Estos resultados sugieren que cuando las parejas sociales tienen CMH similares, las hembras buscan parejas extras para aumentar la diversidad del CMH en su descendencia. Si la selección de pareja social no le permite a las hembras escoger los mejores genes, el apareamiento con parejas extras puede haber evolucionado como una estrategia de apareamiento alternativa para lograrlo (**Lindsay et al.**, 2019). Estos hallazgos, además, sugieren que las hembras tienen la capacidad de detectar tanto la similitud como la diferencia en el CMH. **Rekdal et al.** (2023) reportaron recientemente que las hembras de *L. svecica* con una pareja social de CMH similar tienden a no tener parejas extras cuando estos son jóvenes.

No todos los estudios han confirmando la asociación entre las EFP y el CMH. **Knafler et al.** (2012) estudiaron la diversidad de los genes CMH-IIβ1 en 50 parejas de *Spheniscus magellanicus* (pingüino de Magallanes) y no encontraron una selección de parejas desasortativas en cuanto al CMH. Sin embargo, en esta especie y en *Spheniscus humboldti* (pingüino de Humboldt) hay una gran diversidad en el CMH-I, pero no en el CMH-II, posiblemente debido a la existencia de varios loci CMH-I (**Sallaberry-Pincheira et al.**, 2016). En cuanto al impacto evolutivo de la poligamia, **D'Urban-Jackson et al.** (2017) han presentado evidencia de que en las especies playeras del género *Charadrius*, la poligamia retarda la divergencia poblacional debido a que la dispersión asociada a la poligamia facilita el flujo de genes y limita la divergencia poblacional.

En su conjunto, las investigaciones sobre las EPF sugieren que con las parejas sociales se obtienen beneficios directos (alimento, cuidado de polluelos) mientras que con parejas extras se obtienen beneficios indirectos (buenos genes y “fenotipos escondidos”) mediante la adquisición de genes complementarios para su descendencia, bien sea incrementando la heterocigocidad (del CMH) o evitando la endogamia.

Conclusiones

En esta revisión presentamos un panorama de las publicaciones realizadas en las últimas décadas sobre la relación entre la selección sexual en aves y el sistema inmune, enfatizando el papel del CMH, particularmente en especies en que la hembra selecciona la pareja y, en consecuencia, los genes que trasmite a su descendencia. Es importante anotar que las especies en que hay selección intrasexual, lo que ocurre principalmente entre machos, están por fuera del alcance de esta revisión. La **figura 5** resume el papel de los principales órganos, ornamentos, moléculas, genes y fenómenos involucrados en los complejos procesos asociados con la reproducción en las aves. Durante el periodo reproductivo, que incluye cortejo, cópula, anidación y cría de polluelos, los cambios hormonales afectan muchos aspectos morfológicos y fisiológicos en ambos sexos. Las hormonas sexuales acentúan los caracteres sexuales secundarios físicos y de comportamiento, afectan la cantidad y la calidad de la producción del aceite de acicalamiento producido por las glándulas uropigiales y modulan, diferencialmente, la respuesta inmune en machos y hembras. Mientras en los machos, generalmente los andrógenos disminuyen la respuesta inmune y los hace más propensos a infecciones de diferentes patógenos, en las hembras, por el contrario, los estrógenos y progestágenos tienen un efecto inmunopotenciador probablemente asociado con las defensas necesarias para enfrentar los patógenos en los nidos o en el alimento que dan a los polluelos (**Roved et al.**, 2017).

Como insistimos en la introducción, algunos de los cambios inducidos por la testos-

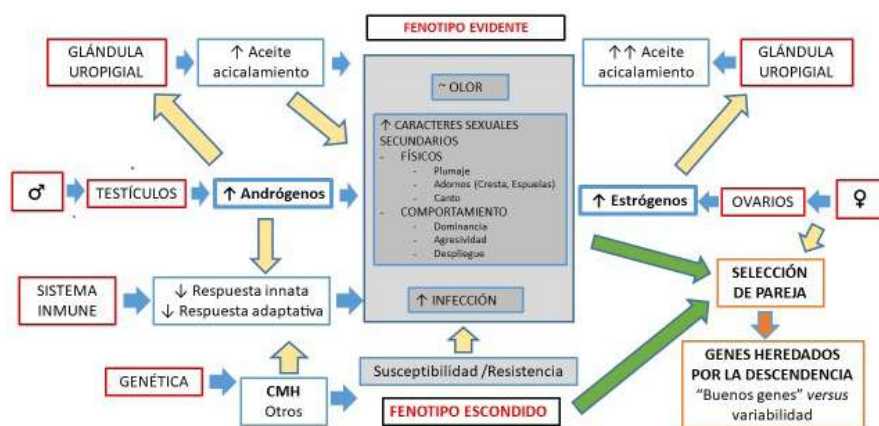


Figura 5. Modelo de los efectos de las hormonas sexuales producidas durante la estación reproductiva sobre los caracteres sexuales secundarios y el olor (Fenotipos Evidentes) y su relación con el CMH y otros genes involucrados en la respuesta inmune (Fenotipos Escondidos) en la selección de pareja por parte de las hembras y en la transmisión de genes a la descendencia.

terona durante el periodo reproductivo en los caracteres sexuales secundarios de los machos, que hemos denominado “fenotipo evidente”, tienen efectos en la selección intrasexual por competencia entre machos, pero también pueden ser atractivos sexuales para las hembras; sin embargo, no es claro cómo estos ornamentos, muchos de ellos con beneficios directos evidentes, pueden ser señales de la calidad de los genes con impacto adaptativo identificables por las hembras, que éstas transmitirían a la descendencia. Un candidato que cada vez acumula más evidencia es el olor, el cual podría desempeñar un papel fundamental como señal con información sobre el estado físico de la posible pareja, su parecido genético y la calidad de la respuesta inmune, como lo han compendiado recientemente **Whittaker (2022)** y **Schubert et al. (2021)**. Un aspecto fascinante es el papel del CMH en la selección sexual por su significado evolutivo en la resistencia y propensión a diferentes patógenos, como se ha demostrado en muchas especies de aves (**Folstad & Karter, 1992; Hamilton & Zuk, 1982; Roved et al., 2017**). Sin embargo, ni los genes, ni los productos del CMH, ni otros sistemas genéticos asociados a la respuesta inmune, pueden ser identificados directamente por los sentidos, de ahí que los hayamos denominado “fenotipo escondido”; por ello, las hembras deben reconocerlos indirectamente por su asociación con algunos de los caracteres físicos evidentes que hemos mencionado (**Mougeot et al., 2004; Verhulst et al., 1999; Von Schantz et al., 1997**) o por el olor (**Schubert et al., 2021; Whittaker, 2022**).

Como lo ha propuesto **Penn (2002)**, las preferencias de apareamiento basadas en el CMH traen, por lo menos, dos beneficios adaptativos indirectos no excluyentes: aumentar la resistencia de la progenie a las infecciones, que es una ventaja de la heterocigocidad (hipótesis del parasitismo) y evitar los apareamientos entre parientes (hipótesis de evasión de la endogamia). Ambos beneficios son evidentes en el caso de las relaciones con parejas sexuales diferentes a las parejas sociales. Estas EPF son muy frecuentes, tanto en aves no paseriformes como en las paseriformes, y ocurren principalmente cuando el CMH de la pareja social es parecido, lo que lleva a las hembras a buscar otra pareja con CMH diferente que aumente la heterocigocidad de la descendencia, con el beneficio indirecto de una mejor capacidad de identificar y reaccionar en contra de un mayor número de potenciales patógenos (**Colegrave et al., 2002; Lindsay et al., 2019**).

Además de la selección de parejas previa a la cópula, en la cual los caracteres sexuales secundarios y el olor parecen ser determinantes, hay evidencia cada vez más sólida de la existencia de selección críptica posterior a la cópula en algunas especies, que, en el caso de los machos, estaría dada por una mayor cantidad o mejor calidad del esperma

(Gillingham *et al.*, 2009), en tanto que en las hembras la selección positiva o negativa del esperma ocurriría dentro del aparato genital (Lovlie *et al.*, 2013) o por la transferencia pasiva de anticuerpos a los huevos (Saino *et al.*, 2014).

Para finalizar, el estudio de estos complejos fenómenos requiere una aproximación multidisciplinaria que incluye a ornitólogos, inmunólogos, inmunogenetistas, biólogos evolutivos, bioquímicos, etólogos y ecólogos, entre otros. La presente revisión aspira a plantear un desafío y una invitación al estudio multidisciplinario de los complejos y fascinantes fenómenos de la reproducción aviar en el país con la mayor diversidad de aves del planeta.

Agradecimientos

A Juan Luis Parra (Grupo de Ecología y Evolución de Vertebrados, Instituto de Biología, Universidad de Antioquia) por su lectura crítica y aportes al manuscrito, a Cesar Ospina por su estímulo y a Sally Station por la preparación del resumen en inglés.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Abbas, A K., Litchamn, A H., Pillai, S. (2018). *Celliular and molecular Immunology*. Elsevier Inc.
- Abplanalp, H., Sato, K., Napolitano, D., Reid, J. (1992). Reproductive Performance of Inbred Congenic Leghorns Carrying Different Haplotypes for the Major Histocompatibility Complex. *Poultry Science*, 71(1), 9-17. <https://doi.org/10.3382/ps.0710009>
- Alves Soares, T., Caspers, B. A., Loos H. M. (2024). Volatile organic compounds in preen oil and feathers – a review. *Biological Reviews*. <https://doi.org/10.1111/brv.13059>
- Amo, L., Amo-de Paz, G., Kabbert, J., Machordom, A. (2022). House sparrows do not exhibit a preference for the scent of potential partners with different MHC-I diversity and genetic distances. *PLOS ONE*, 17(12), e0278892. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278892>
- Amo, L., López-Rull, I. (2023). Zebra Finch Females Can Assess Male Quality via Olfaction. *Preprints*. <https://www.preprints.org/manuscript/202305.2241/v1>
- Arct, A., Drobnik, S. M., Podmokla, E., Gustafson, L., Cichoń, M. (2013). Benefits of extra-pair mating may depend on environmental conditions—an experimental study in the blue tit (*Cyanistes caeruleus*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 67(11), 1809-1815. <https://doi.org/10.1007/s00265-013-1588-4>
- Ardia, D. R. (2005). Cross-fostering reveals an effect of spleen size and nest temperatures on immune responses in nestling European starlings. *Oecologia*, 145(2), 326-333. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0120-6>
- Balakrishnan, C. N., Ekblom, R., Völker, M., Westerdahl, H., Godinez, R., Kotkiewicz, H., Burt, DW., Graves, T., Griffin, DK., Warren, WC., Edwards, S. V. (2010). Gene duplication and fragmentation in the zebra finch major histocompatibility complex. *BMC Biology*, 8(1), 29. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-8-29>
- Bethanne-Zelano, Scott V., Edwards. (2002). An MHC Component to Kin Recognition and Mate Choice in Birds: Predictions, Progress, and Prospects. *The American Naturalist*, 160(S6), S225-S237. <https://doi.org/10.1086/342897>
- Bjorkman, P. J. (2006). Finding the groove. *Nature Immunology*, 7(8), 787-789. <https://doi.org/10.1038/ni0806-787>
- Bollmer, J. L., Dunn, P. O., Whittingham, L. A., Wimpee, C. (2010). Extensive MHC class II B gene duplication in a passerine, the common yellowthroat (*Geothlypis trichas*). *Journal of Heredity*, 101(4), 448-460. <https://doi.org/10.1093/jhered/esq018>
- Bonadonna, F., Sanz-Aguilar, A. (2012). Kin recognition and inbreeding avoidance in wild birds: the first evidence for individual kin-related odour recognition. *Animal Behaviour*, 84(3), 509-513. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2012.06.014>
- Bonforte R. J., Topilsky M., Siltzbach L. E., Glade P. R. (1972). Phytohemagglutinin skin test: a possible in vivo measure of cell-mediated immunity. *Journal of Pediatrics*, 81(4), 775-781. [https://doi.org/10.1016/S0022-3476\(72\)80101-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3476(72)80101-X)
- Bonneaud, C., Chastel, O., Federici, P., Westerdahl, H., Sorci, G. (2006). Complex MHC-based

- mate choice in a wild passerine. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273 (1590), 1111-1116. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3325>
- Bonneaud, C., Mazuc, J., Chastel, O., Westerdahl, H., Sorci, G.** (2004). Terminal Investment Induced by Immune Challenge and Fitness Traits Associated with Major Histocompatibility Complex in the House Sparrow. *Evolution*, 58(12), 2823-2830. <http://www.jstor.org/stable/3449435>
- Bonneaud, C., Mazuc, J., González, G., Haussy, C., Chastel, O., Faivre, B., Sorci, G.** (2003). Assessing the cost of mounting an immune response. *The American Naturalist*, 161(3), 367-379. <https://doi.org/10.1086/346134>.
- Bonneaud, C., Sorci, G., Morin, V., Westerdahl, H., Zoorob, R., Wittzell, H.** (2004). Diversity of MHC class I and IIB genes in house sparrows (*Passer domesticus*). *Immunogenetics*, 55(12), 855-865. <https://doi.org/10.1007/s00251-004-0648-3>
- Boyse, E. A.** (1986). HLA and the chemical senses. *Human Immunology*, 15(4), 391-395. [https://doi.org/10.1016/0198-8859\(86\)90016-9](https://doi.org/10.1016/0198-8859(86)90016-9)
- Briles, W., McGibbon, W., Irwin, M.** (1950). On multiple alleles effecting cellular antigens in the chicken. *Genetics*, 35(6), 633. <https://eurekamag.com/research/013/778/013778886.php>.
- Briles, W. E., Stone, H. A., Cole, R. K.** (1977). Marek's Disease: Effects of B Histocompatibility Alloalleles in Resistant and Susceptible Chicken Lines. *Science*, 195(4274), 193-195. <https://doi.org/10.1126/science.831269>
- Caspers, B., Gagliardo, A., Krause, E. T.** (2015). Impact of kin odour on reproduction in zebra finches. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 69, 1827-1833. <https://doi.org/10.1007/s00265-015-1995-9>
- Colegrave, N., Kotiaho, J. S., Tomkins, J. L.** (2002). Mate choice or polyandry: reconciling genetic compatibility and good genes sexual selection. *Evolutionary Ecology Research*, 4, 911-917. <https://www.semanticscholar.org/paper/Mate-choice-or-polyandry%3A-reconciling-genetic-and-Colegrave-Kotiaho/12a5ca143204d2597b4bd69985efe4d09cca6b0b>
- Cooper, M. D., Peterson, R. D. A., Good, R. A.** (1965). Delineation of the Thymic and Bursal Lymphoid Systems in the Chicken. *Nature*, 205(4967), 143-146. <https://doi.org/10.1038/205143a0>
- D'Urban-Jackson, J., dos Remedios, N., Maher, K. H., Zefania, S., Haig, S., Oyler-McCance, S., Blomqvist, D., Burke, T., Bruford, M. W., Székely, T., Küpper, C.** (2017). Polygamy slows down population divergence in shorebirds. *Evolution*, 71(5), 1313-1326. <https://doi.org/10.1111/evo.13212>
- Dandine-Roulland, C., Laurent, R., Dall'Ara, I., Toupance, B., Chaix, R.** (2019). Genomic evidence for MHC disassortative mating in humans. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286(1899), 20182664. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2664>
- Daniel, J. Y., Vignon, F., Assenmacher, I., Rochefort, H.** (1977). Evidence of androgen and estrogen receptors in the preen gland of male ducks. *Steroids*, 30(5), 703-709. [https://doi.org/10.1016/0039-128x\(77\)90059-9](https://doi.org/10.1016/0039-128x(77)90059-9)
- Delany, M., Robinson, C., Goto, R., Miller, M.** (2009). Architecture and Organization of Chicken Microchromosome 16: Order of the NOR, MHC-Y, and MHC-B Subregions. *The Journal of Heredity*, 100, 507-514. <https://doi.org/10.1093/jhered/esp044>
- Drews, A., Strandh, M., Råberg, L., Westerdahl, H.** (2017). Expression and phylogenetic analyses reveal paralogous lineages of putatively classical and non-classical MHC-I genes in three sparrow species (*Passer*). *BMC Evolutionary Biology*, 17, 152. <https://doi.org/10.1186/s12862-017-0970-7>
- Drews, A., Westerdahl, H.** (2019). Not all birds have a single dominantly expressed MHC-I gene: Transcription suggests that siskins have many highly expressed MHC-I genes. *Scientific Reports*, 9(1), 19506. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55800-9>
- Folstad, I., Karter, A. J.** (1992). Parasites, bright males, and the immunocompetence handicap. *The American Naturalist*, 139(3), 603-622.
- Foo, Y. Z., Rhodes, G., Simmons, L.** (2016). The effects of sex hormones on immune function: A meta-analysis. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 92, 551-571. <https://doi.org/10.1111/brv.12243>
- Fossey, F., Johnsen, A., Lifjeld, J. T.** (2008). Multiple genetic benefits of female promiscuity in a socially monogamous passerine. *Evolution*, 62(1), 145-156. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2007.00284.x>
- Freeman-Gallant, C., Meguerdichian, M., Wheelwright, N., Sollecito, S.** (2003). Social pairing

- and female mating fidelity predicted by restriction fragment length polymorphism similarity at the major histocompatibility complex in a songbird. *Molecular Ecology*, 12, 3077-3083. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01968.x>
- Fulton, J. E., McCarron, A. M., Lund, A. R., Pinegar, K. N., Wolc, A., Chazara, O., Bed'Hom, B., Berres, M., Miller, M. M.** (2016). A high-density SNP panel reveals extensive diversity, frequent recombination and multiple recombination hotspots within the chicken major histocompatibility complex B region between BG2 and CD1A1. *Genetics Selection Evolution*, 48(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s12711-015-0181-x>
- Futuyma, D. J.** (2021). *How birds evolve: what science reveals about their origins, lives, and diversity*. Princeton University Press.
- Garvin, J. C., Abroe, B., Pedersen, M. C., Dunn, P. O., Whittingham, L. A.** (2006). Immune response of nestling warblers varies with extra-pair paternity and temperature. *Molecular Ecology*, 15(12), 3833-3840. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2006.03042.x>
- Gilles, M., Fokkema, R. W., Korsten, P., Caspers, B. A., Schmoll, T.** (2024). Preen oil composition of Pied Flycatchers is similar between partners but differs between sexes and breeding stages. *Ibis*, 166(1), 171-186. <https://doi.org/10.1111/ibi.13246>
- Gillingham, M. A., Richardson, D. S., Løvlie, H., Moynihan, A., Worley, K., Pizzari, T.** (2009). Cryptic preference for MHC-dissimilar females in male red junglefowl, *Gallus gallus*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1659), 1083-1092. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1549>
- Glick, B., Chang, T. S., Jaap, R. G.** (1956). The Bursa of Fabricius and Antibody Production. *Poultry Science*, 35(1), 224-225. <https://doi.org/10.3382/ps.0350224>
- Gohli, J., Anmarkrud, J. A., Johnsen, A., Kleven, O., Borge, T., Lifjeld, J. T.** (2013). Female promiscuity is positively associated with neutral and selected genetic diversity in passerine birds. *Evolution*, 67(5), 1406-1419. <https://doi.org/10.1111/evo.12045>
- Gould, S. J.** (1985). *La Sonrisa del flamenco. Reflexiones sobre historia natural*. Traducción Antonio Resinas. Crítica. Barcelona. España ISBN 978-84-8432-564-2
- Griffith, S. C., Owens, I. P. F., Thuman, K. A.** (2002). Extra pair paternity in birds: a review of interspecific variation and adaptive function. *Molecular Ecology*, 11(11), 2195-2212. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2002.01613.x>
- Hagelin, J.** (2009). Bird odors and other chemical substances: A defense mechanism or overlooked mode of intraspecific communication? *The Auk*, 124, 741-761. [https://doi.org/10.1642/0004-8038\(2007\)124\[741:BOAOCs\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1642/0004-8038(2007)124[741:BOAOCs]2.0.CO;2)
- Halupka, L., O'Connor, E., Strandh, M., Sztwiertnia, H., Klimczuk, E., Hasselquist, D., Westerdahl, H.** (2023). Female reed warblers in social pairs with low MHC dissimilarity achieve higher MHC compatibility through random extra-pair matings. *bioRxiv*, 2023.2004.2017.537178. <https://doi.org/10.1101/2023.04.17.537178>
- Hamal, K. R., Burgess S., Pevzner I. Y., Erf G. F.** (2006), Maternal Antibody Transfer from Dams to Their Egg Yolks, Egg Whites, and Chicks in Meat Lines of Chickens. *Poultry Science* 85, 1364-1372. <https://doi.org/10.1093/ps/85.8.1364>
- Hamilton, W. D., Zuk, M.** (1982). Heritable True Fitness and Bright Birds: A Role for Parasites? *Science*, 218(4570), 384-387. <https://doi.org/10.1126/science.7123238>
- Hanssen, S. A., Folstad, I., Erikstad, K. E.** (2003). Reduced Immunocompetence and Cost of Reproduction in Common Eiders. *Oecologia*, 136 (3), 457-464. <http://www.jstor.org/stable/4223696>
- Hasselquist, D.** (2007). Comparative immunoeology in birds: hypotheses and tests. *Journal of Ornithology*, 148(2), 571-582. <https://doi.org/10.1007/s10336-007-0201-x>
- Hasselquist, D., Sherman, P.** (2001). Social mating system and extrapair fertilization in passerine birds. *Behavioral Ecology*, 12, 457-466. <https://doi.org/10.1093/beheco/12.4.457>
- He, K., Liang, C.-h., Zhu, Y., Dunn, P., Zhao, A., Minias, P.** (2022). Reconstructing Macroevolutionary Patterns in Avian MHC Architecture With Genomic Data. *Frontiers in Genetics*, 13. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.823686>
- He, K., Minias, P., Dunn, P. O.** (2020). Long-Read Genome Assemblies Reveal Extraordinary Variation in the Number and Structure of MHC Loci in Birds. *Genome Biology and Evolution*, 13(2), evaa270. <https://doi.org/10.1093/gbe/evaa270>
- Hoover, B., Alcaide, M., Jennings, S., Sin, S. Y. W., Edwards, S. V., Nevitt, G. A.** (2018). Ecology can inform genetics: Disassortative mating contributes to MHC polymorphism in Leach's storm-petrels (*Oceanodroma leucorhoa*). *Molecular Ecology*, 27(16), 3371-3385. <https://doi.org/10.1111/mec.14801>

- Johnsen, A., Andersen, V., Sunding, C., Lifjeld, J. T.** (2000). Female bluethroats enhance offspring immunocompetence through extra-pair copulations. *Nature*, 406(6793), 296-299. <https://doi.org/10.1038/35018556>
- Jones, A. G. & Ratterman, N. L.** (2009). Mate choice and sexual selection: What have we learned since Darwin? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(supplement 1), 10001-10008. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901129106>
- Kamiya, T., O'Dwyer, K., Westerdahl, H., Senior, A., Nakagawa, S.** (2014). A quantitative review of MHC-based mating preference: the role of diversity and dissimilarity. *Molecular Ecology*, 23 (21), 5151-5163. <https://doi.org/10.1111/mec.12934>
- Kaufman, J.** (2013). Antigen processing and presentation: evolution from a bird's eye view. *Molecular Immunology*, 55(2), 159-161. <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2012.10.030>
- Kaufman, J., Milne, S., Göbel, T. W. F., Walker, B. A., Jacob, J. P., Auffray, C., Zoorob, R., Beck, S.** (1999). The chicken B locus is a minimal essential major histocompatibility complex. *Nature*, 401(6756), 923-925. <https://doi.org/10.1038/44856>
- Klein, J.** (1986). *Natural History of the Major Histocompatibility Complex*. John Wiley & Son.
- Koch, M., Camp, S., Collen, T., Avila, D., Salomonsen, J., Wallny, H.-J., van Hateren, A., Hunt, L., Jacob, J.P., Johnston, F., Marston, D.A., Shaw, I., Dunbar, P.R., Cerundolo, V., Jones, E.Y., Kaufman, J.** (2007). Structures of an MHC Class I Molecule from B21 Chickens Illustrate Promiscuous Peptide Binding. *Immunity*, 27(6), 885-899. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2007.11.007>
- Lakshmanan, N., Gavora, J., Lamont, S.** (1997). Major Histocompatibility Complex Class II DNA Polymorphisms in Chicken Strains Selected for Marek's Disease Resistance and Egg Production or for Egg Production Alone. *Poultry Science*, 76, 1517-1523. <https://doi.org/10.1093/ps/76.11.1517>
- Landry, C., Garant, D., Duchesne, P., Bernatchez, L.** (2001). 'Good genes as heterozygosity': the major histocompatibility complex and mate choice in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 268(1473), 1279-1285. <https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1659>
- Leclaire, S., Strandh, M., Mardon, J., Westerdahl, H., Bonadonna, F.** (2017). Odour-based discrimination of similarity at the major histocompatibility complex in birds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2466>
- Leclaire, S., van Dongen, W. F. D., Voccia, S., Merklings, T., Ducamp, C., Hatch, S. A., Blanchard, P., Danchin, E., Wagner, R. H.** (2014). Preen secretions encode information on MHC similarity in certain sex-dyads in a monogamous seabird. *Scientific Reports*, 4(1), 6920. <https://doi.org/10.1038/srep06920>
- Lifjeld, J. T., Gohli, J., Albrecht, T., Garcia-del-Rey, E., Johannessen, L. E., Kleven, O., Marki, P.Z., Omotoriogun, T.C., Rowe, M., Johnsen, A.** (2019). Evolution of female promiscuity in Passerides songbirds. *BMC Evolutionary Biology*, 19(1), 169. <https://doi.org/10.1186/s12862-019-1493-1>
- Lifjeld, J. T. & Robertson, R. J.** (1992). Female control of extra-pair fertilization in tree swallows. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 31(2), 89-96. <https://doi.org/10.1007/BF00166341>
- Lindsay, W. R., Andersson, S., Bererhi, B., Höglund, J., Johnsen, A., Kvarnemo, C., Leder, E.H., Lifjeld, J.T., Nannes, C.E., Olsson, M., Parker, G.A., Pizzari, T., Qvarnström, A., Safran, R.J., Svensson, O., Edwards, S. V.** (2019). Endless forms of sexual selection. *PeerJ*, 7, e7988. <https://doi.org/10.7717/peerj.7988>
- Lovette, Irving J.; Fitzpatrick, John W.** (eds). (2016). *Handbook of bird biology*. Cornell Laboratory of Ornithology. (3rd ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Lovlie, H., Gillingham, M., Worley, K., Pizzari, T., Richardson, D.** (2013). Cryptic female choice favours sperm from major histo-compatibility complex-dissimilar males. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*, 280, 20131296. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.1296>
- Mellinger, S., Stervander, M., Lundberg, M., Drews, A., Westerdahl, H.** (2023). Improved haplotype resolution of highly duplicated MHC genes in a long-read genome assembly using MiSeq amplicons. *PeerJ*, 11, e15480. <https://doi.org/10.7717/peerj.15480>
- Merha N.K.** (Ed) (2010). *The HLA complex in biology and medicine. A resource book*. New Delhi, India. Jaypee Brothers Medical Publishers (p) Ltd.
- Mihailova, M., Berg, M. L., Buchanan, K. L., Bennett, A.T.D.** (2014). Odour-based discrimination of subspecies, species and sexes in an avian species complex, the crimson rosella. *Animal Behaviour*, 95, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2014.07.012>

- Miller, M. M., Goto, R., Bernot, A., Zoorob, R., Auffray, C., Bumstead, N., Briles, W. E. (1994). Two Mhc class I and two Mhc class II genes map to the chicken Rfp-Y system outside the B complex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(10), 4397-4401. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.10.4397>
- Miller, M. M., Robinson, C. M., Abernathy, J., Goto, R. M., Hamilton, M. K., Zhou, H., Delany, M. E. (2013). Mapping Genes to Chicken Microchromosome 16 and Discovery of Olfactory and Scavenger Receptor Genes Near the Major Histocompatibility Complex. *Journal of Heredity*, 105(2), 203-215. <https://doi.org/10.1093/jhered/est091>
- Miller, M. M. & Taylor, R. L. (2016). Brief review of the chicken Major Histocompatibility Complex: the genes, their distribution on chromosome 16, and their contributions to disease resistance. *Poultry Science*, 95(2), 375-392. <https://doi.org/10.3382/ps/pev379>
- Minias, P., He, K., Dunn, P. O. (2021). The strength of selection is consistent across both domains of the MHC class I peptide-binding groove in birds. *BMC Ecology and Evolution*, 21(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s12862-021-01812-x>
- Minias, P., Pikus, E., Whittingham, L. A., Dunn, P. O. (2018a). Evolution of Copy Number at the MHC Varies across the Avian Tree of Life. *Genome Biology and Evolution*, 11(1), 17-28. <https://doi.org/10.1093/gbe/evy253>
- Minias, P., Pikus, E., Whittingham, L. A., Dunn, P. O. (2018b). A global analysis of selection at the avian MHC. *Evolution*, 72 (6), 1278-1293. <https://doi.org/10.1111/evo.13490>
- Minias, P., Whittingham, L. A., Dunn, P. O. (2017). Coloniality and migration are related to selection on MHC genes in birds. *Evolution*, 71(2), 432-441.
- Mougeot, F., Irvine, J. R., Seivwright, L., Redpath, S. M., Pieltney, S. (2004). Testosterone, immunocompetence, and honest sexual signaling in male red grouse. *Behavioral Ecology*, 15 (6), 930-937. <https://doi.org/10.1093/beheco/arh087>
- O'Connor, E. A., Westerdahl, H., Burri, R., Edwards, S. V. (2019). Avian MHC Evolution in the Era of Genomics: Phase 1.0. *Cells*, 8(10), 1152. <https://doi.org/10.3390/cells8101152>
- Painter, C. A. & Stern, L. J. (2012). Conformational variation in structures of classical and non-classical MHCII proteins and functional implications. *Immunological Reviews*, 250(1), 144-157. <https://doi.org/10.1111/imr.12003>
- Penn, D. (2002). The Scent of Genetic Compatibility: Sexual Selection and the Major Histocompatibility Complex. *Ethology*, 108, 1-21. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0310.2002.00768.x>
- Penn, D. & Potts, W. (1998). MHC-disassortative mating preferences reversed by cross-fostering. *Proceedings Biological Society*, 265(1403), 1299-1306. PM:9718737
- Penn, D. J. & Potts, W. K. (1999). The Evolution of Mating Preferences and Major Histocompatibility Complex Genes. *The American Naturalist*, 153(2), 145-164. <https://doi.org/10.1086/303166>
- Peters, A., Astheimer, L. B., Boland, C. R. J., Cockburn, A. (2000). Testosterone is involved in acquisition and maintenance of sexually selected male plumage in superb fairy-wrens, *Malurus cyaneus*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 47(6), 438-445. <https://doi.org/10.1007/s002650050688>
- Petrie, M. & Kempnaers, B. (1998). Extra-pair paternity in birds: explaining variation between species and populations. *Trends in Ecology & Evolution*, 13(2), 52-58. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(97\)01232-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(97)01232-9)
- Pikus, E., Dunn, P. O., Minias, P. (2022). High MHC diversity confers no advantage for phenotypic quality and reproductive performance in a wild bird. *Journal of Animal Ecology*, 91(8), 1707-1718. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13737>
- Pineaux, M., Blanchard, P., Ribeiro, L., Hatch, S. A., Leclaire, S. (2023). *A Gull Species Recognizes MHC-II Diversity and Dissimilarity Using Odor Cues*. Paper presented at the Chemical Signals in Vertebrates 15. <https://hal.science/hal-03918940>.
- Pink, J. R. L., Droegge, W., Hála, K., Miggiano, V. C., Ziegler, A. (1977). A three-locus model for the chicken major histocompatibility complex. *Immunogenetics*, 5(1), 203-216. <https://doi.org/10.1007/BF01570477>
- Potts, W. K. & Wakeland, E. K. (1993). Evolution of MHC genetic diversity: a tale of incest, pestilence and sexual preference. *Trends in Genetics*, 9(12), 408-412. [https://doi.org/10.1016/0168-9525\(93\)90103-O](https://doi.org/10.1016/0168-9525(93)90103-O)
- Rekdal, S. L., Anmarkrud, J. A., Lifjeld, J. T., Johnsen, A. (2023). Do female bluethroats without extra-pair offspring have more MHC-compatible social mates? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 77(3), 36. <https://doi.org/10.1007/s00265-023-03311-z>
- Ren, L., Yang, Z., Wang, T., Sun, Y., Guo, Y., Zhang, Z., Fei, J., Bao, Y., Qin, T., Wang, J., Huang, Y., Hu, X., Zhao, Y., Li, N. (2011). Characterization of the MHC class II α -chain gene in ducks. *Immunogenetics*, 63 (10), 667-678. <https://doi.org/10.1007/s00251-011-0545-5>

- Ribatti, D., Crivellato, E., Vacca, A.** (2006). The contribution of Bruce Glick to the definition of the role played by the bursa of Fabricius in the development of the B cell lineage. *Clinical and Experimental Immunology*, 145(1), 1-4.
- Richardson, D. S., Komdeur, J., Burke, T., Von Schantz, T.** (2005). MHC-based patterns of social and extra-pair mate choice in the Seychelles warbler. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1564), 759-767. <https://doi.org/10.1098/rspb.2004.3028>.
- Ridley, M.** (2000). *Mendel's Demon: Gene justice and the complexity of life*. Phoenix.
- Roved, J., Westerdahl, H., Hasselquist, D.** (2017). Sex differences in immune responses: Hormonal effects, antagonistic selection, and evolutionary consequences. *Hormones and Behavior*, 88, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2016.11.017>
- Saino, N., Romano, M., Rubolini, D., Caprioli, M., Costanzo, A., Canova, L., Möller, A. P.** (2014). Melanic coloration differentially predicts transfer of immune factors to eggs with daughters or sons. *Behavioral Ecology*, 25(5), 1248-1255. <https://doi.org/10.1093/beheco/aru112>
- Sallaberry-Pincheira, N., González-Acuña, D., Padilla, P., Dantas, G. P. M., Luna-Jorquera, G., Frere, E., Valdés-Velásquez, A., Vianna, J. A.** (2016). Contrasting patterns of selection between MHC I and II across populations of Humboldt and Magellanic penguins. *Ecology and Evolution*, 6(20), 7498-7510. <https://doi.org/10.1002/ece3.2502>
- Salomonsen, J., Marston, D., Avila, D., Bumstead, N., Johansson, B., Juul-Madsen, H., Olensen, G.D., Riegert P., Skjødt, K., Vainio O., Wiles, M.V., Kaufman, J.** (2003). The properties of the single chicken MHC classical class II α chain (B-LA) gene indicate an ancient origin for the DR/E-like isotype of class II molecules. *Immunogenetics*, 55(9), 605-614. <https://doi.org/10.1007/s00251-003-0620-7>
- Sato, K., Abplanalp, H., Napolitano, D., Reid, J.** (1992). Effects of Heterozygosity of Major Histocompatibility Complex Haplotypes on Performance of Leghorn Hens Sharing a Common Inbred Background. *Poultry Science*, 71(1), 18-26. <https://doi.org/10.3382/ps.0710018>
- Schat, K. A.** (1994). Cell-mediated immune effector functions in chickens. *Poultry Science*, 73(7), 1077-1081. <https://doi.org/10.3382/ps.0731077>
- Schierman, L. W. & Nordskog, A. W.** (1961). Relationship of Blood Type to Histocompatibility in Chickens. *Science*, 134(3484), 1008-1009. <https://doi.org/10.1126/science.134.3484.1008>
- Schubert, N., Nichols, H., Winternitz, J.** (2021). How can the MHC mediate social odor via the microbiota community? A deep dive into mechanisms. *Behavioral Ecology*, 32, 359-373. <https://doi.org/10.1093/beheco/abab004>
- Sepil, I., Lachish, S., Sheldon, B. C.** (2013). MHC-linked survival and lifetime reproductive success in a wild population of great tits. *Molecular Ecology*, 22(2), 384-396. <https://doi.org/10.1111/mec.12123>
- Sharma, J. M. & Tizard, I.** (1984). Avian cellular immune effector mechanisms - A review. *Avian Pathology*, 13 (3), 357-376. <https://doi.org/10.1080/03079458408418541>
- Sin, S. Y. W., Cloutier, A., Nevitt, G., Edwards, S. V.** (2022). Olfactory receptor subgenome and expression in a highly olfactory procellariiform seabird. *Genetics*, 220 (2), iyab210. <https://doi.org/10.1093/genetics/iyab210>
- Slade, J. W. G., Watson, M. J., Kelly, T. R., Gloor, G. B., Bernards, M. A., MacDougall-Shackleton, E. A.** (2016). Chemical composition of preen wax reflects major histocompatibility complex similarity in songbirds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283 (1842), 20161966. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.1966>
- Sommer, S.** (2005). The importance of immune gene variability (MHC) in evolutionary ecology and conservation. *Front Zool.*, 2, 16. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-2-16>.
- Spottiswoode, C. & Möller, A. P.** (2004). Extrajoint paternity, migration, and breeding synchrony in birds. *Behavioral Ecology*, 15(1), 41-57. <https://doi.org/10.1093/beheco/arg100>
- Stapleton, M. K., Kleven, O., Liffeld, J. T., Robertson, R. J.** (2007). Female tree swallows (*Tachycineta bicolor*) increase offspring heterozygosity through extrajoint mating. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 61(11), 1725-1733. <https://doi.org/10.1007/s00265-007-0404-4>
- Strandh, M., Westerdahl, H., Pontarp, M., Canbäck, B., Dubois, M.-P., Miquel, C., Taberlet, P., Bonadonna, F.** (2012). Major histocompatibility complex class II compatibility, but not class I, predicts mate choice in a bird with highly developed olfaction. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1746), 4457-4463. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1562>
- Verhulst, S., Dieleman, S. J., Parmentier, H. K.** (1999). A tradeoff between immunocompetence and sexual ornamentation in domestic fowl. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(8), 4478-4481. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.8.4478>

- Von Schantz, T., Wittzell, H., Bose, N., Grahn, M., Persson, K. (1996). MHC genotype and male ornamentation: genetic evidence for the Hamilton-Zuk model. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 263(1368), 265-271. <https://doi.org/10.1098/rspb.1996.0041>
- Von Schantz, T., Wittzell, H., Göransson, G., Grahn, M. (1997). Mate choice, male condition-dependent ornamentation and MHC in the pheasant. *Hereditas*, 127 (1-2), 133-140. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1997.t01-1-00133.x>
- Wedekind, C. & Folstad, I. (1994). Adaptive or Nonadaptive Immunosuppression by Sex Hormones? *The American Naturalist*, 143 (5), 936-938. <http://www.jstor.org/stable/2462885>
- Wedekind, C. & Penn, D. (2000). MHC genes, body odours, and odour preferences. *Nephrology Dialysis and Transplantation*, 15(9), 1269-1271. <https://doi.org/10.1093/ndt/15.9.1269>
- Westerdahl, H. (2007). Passerine MHC: genetic variation and disease resistance in the wild. *Journal of Ornithology*, 148(2), 469-477. <https://doi.org/10.1007/s10336-007-0230-5>
- Whittaker, D., Rosvall, K., Slowinski, S., Soini, H., Novotny, M., Ketterson, E. (2018). Songbird chemical signals reflect uropygial gland androgen sensitivity and predict aggression: implications for the role of the periphery in chemosignaling. *Journal of Comparative Physiology A*, 204. <https://doi.org/10.1007/s00359-017-1221-5>
- Whittaker, D. J. (2022). *The secret perfume of the birds: uncovering the science of avian scent*. Johns Hopkins University Press.
- Whittaker, D. J., Dapper, A. L., Peterson, M. P., Atwell, J. W., Ketterson, E. D. (2012). Maintenance of MHC Class IIB diversity in a recently established songbird population. *Journal of avian biology*, 43 (2), 109-118. <https://doi.org/10.1111/j.1600-048X.2012.05504.x>
- Whittaker, D. J. & Hagelin, J. C. (2021). Female-Based Patterns and Social Function in Avian Chemical Communication. *Journal of Chemical Ecology*, 47 (1), 43-62. <https://doi.org/10.1007/s10886-020-01230-1>
- Whittaker, D. J., Slowinski, S. P., Greenberg, J. M., Alian, O., Winters, A. D., Ahmad, M. M., Burrell, M. J. E., Soini, H. A., Novotny M. V., Ketterson, E. D., Theis, K. R. (2019). Experimental evidence that symbiotic bacteria produce chemical cues in a songbird. *Journal of Experimental Biology*, 222 (20), jeb202978. <https://doi.org/10.1242/jeb.202978>
- Whittaker, D. J., Soini, H. A., Gerlach, N. M., Posto, A. L., Novotny, M. V., Ketterson, E. D. (2011). Role of testosterone in stimulating seasonal changes in a potential avian chemosignal. *Journal of Chemical Ecology*, 37, 1349-1357. <https://doi.org/10.1007/s10886-011-0050-1>
- Whittingham, L. A., Freeman-Gallant, C. R., Taff, C. C., Dunn, P. O. (2015). Different ornaments signal male health and MHC variation in two populations of a warbler. *Molecular Ecology*, 24(7), 1584-1595. <https://doi.org/10.1111/mec.13130>
- Yamazaki, K., Beauchamp, G. K., Curran, M., Bard, J., Boyse, E. A. (2000). Parent-progeny recognition as a function of MHC odortype identity. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 97(19), 10500-10502. <https://doi.org/10.1073/pnas.180320997>
- Yu, C. Y., Yang, Z., Blanchong, C. A., Miller, W. (2000). The human and mouse MHC class III region: a parade of 21 genes at the centromeric segment. *Immunology Today*, 21(7), 320-327. [https://doi.org/10.1016/s0167-5699\(00\)01664-9](https://doi.org/10.1016/s0167-5699(00)01664-9)
- Ziegler, A., Kentenich, H., Uchanska-Ziegler, B. (2005). Female choice and the MHC. *Trends in Immunology*, 26 (9), 496-502. <https://doi.org/10.1016/j.it.2005.07.003>
- Zinkernagel, R. M. & Doherty, P. C. (1997). The discovery of MHC restriction. *Immunology Today*, 18 (1), 14-17. [https://doi.org/10.1016/s0167-5699\(97\)80008-4](https://doi.org/10.1016/s0167-5699(97)80008-4)

Chemical Sciences

Original article

Arsenic geochemical species modeling, prediction, and bioavailability in groundwaters of the Oban Massif, southeastern Nigeria

Modelación, predicción y biodisponibilidad de especies geoquímicas de arsénico en aguas subterráneas del macizo de Oban, sureste de Nigeria

 Azubuike S. Ekwere

Department of Geology, University of Calabar, Calabar, Nigeria

Abstract

To ascertain the distribution patterns, source identification, chemical speciation, and bioavailability of arsenic in basement aquifers, 64 groundwater samples were analyzed using hydrochemical and geochemical modeling. It was determined that important ion geochemistry, hydrogeochemical facies, and basic hydrogeochemical parameters are interdependent. Arsenic (As) concentrations varied from 0.001 mg/l to 0.03 mg/l, with a mean of 0.007 mg/l. The results of 4.68% of samples were higher than the allowable level of 0.01 mg/l, i.e., groundwater arsenic levels are not dangerous. Significant ion concentrations decreased from dry to rainy seasons suggesting that ionic concentrations generated by silicate weathering in aquifers became diluted. Abundance trends in metal concentration during the dry and rainy seasons were $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cd}$ and $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd}$, respectively. Of the two hydrochemical facies discovered, the predominant one was the main alkaline-earth-bicarbonate facies $[\text{Ca}(\text{Mg})\text{-HCO}_3]$ typical of basement terrains, suggesting the fundamental stage of groundwater evolution. Plots of ionic ratios, metal loads, and principal component analyses showed that ionic concentrations are controlled by geology. Geochemical modeling revealed the presence of aqueous arsenic species, which are the less dangerous arsenates at unsaturated levels and do not currently pose a concern.

Keywords: Arsenic; Groundwater; Speciation; Basement; Nigeria.

Resumen

Para determinar los patrones de distribución, las fuentes, la especiación química y la biodisponibilidad de arsénico en acuíferos subterráneos, se analizaron 64 muestras de agua subterránea mediante modelos hidroquímicos y geoquímicos. Se determinó que la geoquímica iónica de importancia, las facies hidrogeoquímicas y los parámetros hidrogeoquímicos básicos son interdependientes. Las concentraciones de arsénico (As) variaron de 0,001 mg/l a 0,03 mg/l, con una media de 0,007 mg/l. Los resultados del 4,68 % de las muestras sobrepasaron el nivel permitido de 0,01 mg/l, lo que significa que el agua subterránea no tiene un contenido peligrosamente alto de arsénico. Las concentraciones significativas de iones en las estaciones secas disminuyeron en las lluviosas, lo que sugiere que las concentraciones iónicas, generadas por la erosión de silicatos en los acuíferos, se diluyeron. La tendencia de la abundancia en la concentración de metales fue $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cd}$ durante la estación seca y $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd}$ durante la lluviosa. De las dos facies hidroquímicas descubiertas, la predominante fue la facies principal de bicarbonato alcalinotérreo $[\text{Ca}(\text{Mg})\text{-HCO}_3]$, típica de terrenos de basamento, lo que sugiere la etapa fundamental de la evolución del agua subterránea. Los gráficos de proporciones iónicas, cargas metálicas y análisis de componentes principales evidenciaron que las concentraciones iónicas están controladas por la geología. Los modelos geoquímicos revelaron la presencia de especies acuosas de arsénico, es decir, los arseniados menos peligrosos en niveles no saturados, por lo que actualmente no representan una preocupación.

Palabras clave: Arsénico; Agua subterránea; Especiación; Basamento; Nigeria.

Citation: Ekwere AS. Arsenic geochemical species modeling, prediction, and bioavailability in groundwaters of the Oban Massif, southeastern Nigeria. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):131-144, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1948>

Editor: Luis Fernando Echeverri

Corresponding author:

Azubuike S. Ekwere;
zerratta77@yahoo.com

Received: July 23, 2023

Accepted: January 25, 2024

Published on line: February 15, 2024



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

Introduction

According to the UN Sustainable Development Goals (**Manu et al.**, 2023; **Katila et al.**, 2019), water availability and quality are major indicators of living standards. Metal/metalloid concentrations and their species are pollutants in water resources. Metalloids are a class of metals and semimetals known to exist in the earth's crust; they have specific gravities over 5 g/cm³ or at least five times that of water (**Duffus**, 2002) and comprise elements with an atomic number over 20 according to a recent definition (**Ali & Khan**, 2018; **Ali et al.**, 2019).

Metal and metalloid pollution have a deleterious effect on the ecosystem due to its toxicity, non-biodegradability, and persistent nature, accumulating quickly in the soil, water, and sediment (**Bhairo et al.**, 2023; **Heidari et al.**, 2019; **Kumar et al.**, 2019).

Some of these metalloids, described as non-essential metals, render no benefits to living systems, and many of them are toxic even at low concentrations (**Idowu**, 2022). Non-essential metalloids include lead (Pb), cadmium (Cd), mercury (Hg), arsenic (As), tin (Sn), aluminum (Al), silver (Ag), gold (Au), antimony (Sb), bismuth (Bi), palladium (Pd), platinum (Pt), vanadium (V), strontium (Sr), tellurium (Te), titanium (Ti), uranium (U), and chromium (Cr) (**Tchounwou et al.**, 2012).

The concerns and studies on metalloids hinge on the fact that they can get into the food chain via bioaccumulation in plants and animal species and contaminate potable water sources. Water resource pollution is common, especially in developing countries where many rural communities depend on unprotected and vulnerable surface and ground water sources for drinking and other domestic purposes.

According to **Rajmohan & Elango** (2005), tracing metals or metalloids in ground-water is important for public health, plant growth, and academic research to understand the mobility of metals in aqueous environments. In this sense, **Rehman et al.** (2023), **Shahid et al.** (2023), **Zhu et al.** (2023), and **Feng et al.** (2022) have concluded that AS poses a serious concern to human health in drinking water, as it is a pervasive pollutant in groundwater, affecting more than 100 million people in 50 countries (**Soldatova et al.**, 2022).

Arsenic occurs in inorganic and organic forms in natural geochemical environments (**Hassan**, 2008) and is one of the potentially toxic elements in the natural environment (**Chandrasekar et al.**, 2020). This potentially toxic mobile metal exists naturally in its elemental state or as a compound within the earth's crust. It occurs in the form of arsenic-bearing minerals such as sulfides, oxides, arsenates, arsenites, etc., in sedimentary, metamorphic, and igneous rocks. Like most potentially toxic metals in the environment, arsenic occurrence and mobilization have been attributed to a combination of natural and anthropogenic reactions (**Khan & Rai**, 2022; **Soldatova et al.**, 2022; **Keskin & Özler**, 2020; **Shankar et al.**, 2014; **Smedley & Kinniburgh**, 2013; **Smedley & Kinniburgh**, 2002).

García et al. (2007) have reported that As concentration in groundwater is controlled by lithology, but the spatial and temporal variation in concentrations is controlled by pH changes, climatic factors, and human perturbations. **Li et al.** (2021) suggest that arsenic is released into groundwater due to hydrochemical and geological processes. Arsenic anthropogenic mobilization is exacerbated by mining, fossil-fuel combustion, and the use of synthetic arsenical compounds (pesticides, herbicides, crop desiccants, and arsenic-based additives in livestock feed) (**Smedley & Kinniburgh**, 2013).

Some of the highest aqueous arsenic concentrations are found in groundwater due to the high solid-to-solution ratios in aquifers, which threaten health (**Smedley & Kinniburgh**, 2013; **Stollenwerk**, 2003). Groundwater within aquifers is vulnerable to water-rock interactions, leading to arsenic release. Aquifers have physical and chemical conditions more favorable for arsenic mobilization and transport than surface waters (**Smedley & Kinniburgh**, 2013). However, As high concentrations in groundwater are rare, as background concentrations are usually less than 10 µg L⁻¹, which is the maximum acceptable level (**WHO**, 2011).

Arsenic contamination of water sources poses a serious risk to human health. Excessive and prolonged exposure to inorganic As in drinking water causes arsenicosis, a deteriorating and disabling disease characterized by skin lesions and pigmentation and patches on hand palms and feet soles (Li *et al.*, 2021; Shankar *et al.*, 2014; Stollenwerk, 2003).

Metals in soils and groundwater are present in varied chemical forms known as species. Metalloid species play a role in determining groundwater health effects rather than the total concentration levels (Zhang *et al.*, 2017). The distribution of these chemical species in different forms is known as speciation, and it determines metals transport, retention, and bioavailability and their impact (Lofts & Tipping, 1999). Many computer-based mathematical models have been developed to simulate speciation and predict metal behavior, which is usually easy for metallic components and oxyanions (Lofts & Tipping, 1999). However, natural systems have chemical complexation and heterogeneity that play a crucial role in determining speciation.

The interest in ascertaining arsenic species in groundwaters in the study area is hinged on the fact that its toxic effects are solely connected to its chemical forms and oxidation states (Bose *et al.*, 2011). Species identification and quantification give insight into arsenic toxicity and bioavailability.

The Oban massif hosts several rock aggregate quarries that have been zoned based on their operational longevity as old (more than twenty years of operations) and younger (less than twenty years of operations). These quarrying activities are believed to have impacted, at some levels, the geoenvironment and groundwaters within the massif and its environs (Ekwere & Edet, 2021, 2023).

This study aimed to establish the status of As concentration, possible origin, and distribution by speciation modeling, and the hazard prognosis of groundwater concentrations in sections of the Precambrian basement at the Oban Massif in southeastern Nigeria.

Study area

The Oban Massif forms part of the giant spurs of the western elongation of the Cameroon Mountains into the Cross River Plains of southeastern Nigeria (Ekwere, 2023a). The Precambrian basement complex is built primarily of granites, metamorphic rocks, and other rock units expressed as migmatitic and sheared gneissic rocks, paraschists, phyllites, metaconglomerates and quartzites, amphibolites and metadolerite, foliated pegmatites and aplites, pyroxenite, and others. There are also synkinematic to late-kinematic older granite intrusive series that comprise rocks varying in composition from meladiorites, granodiorite, and adamellite to granitic rocks, weakly foliated to unfoliated pegmatite, aplite, quartz veins, and unmetamorphosed dolerite to microdioritic intrusives.

These series of rocks exhibit variations across the sectors of the massif, encompassing a landmass of approximately 8,740 km², located between longitudes 8° 00' E–8° 55' E and latitudes 5° 00' N–5° 45' N (Figure 1). The relief of the massif is rugged and undulating, straddling isolated hills of up to 1,200 m above sea level (Ekwere & Edet, 2012). Deeply incised v-shaped valleys are also found, and the hills are typically forested at their highest peaks (Ekwere, 2023a).

Drainage within the massif is through weathered zones and fractured and jointed areas, coursing dominantly in two directions: southwards (seawards) and northwards to join the upper course of the Cross River in the Ikom depression (Ekwere & Edet, 2012, 2023).

The Oban Massif and environs lie within a tropical climate belt characterized by two seasons: a rainy period from May to October and a dry one from November to April. Temperatures are generally high, with negligible diurnal and annual variations and monthly averages of 27–34° C (Ekwere *et al.*, 2012). The yearly precipitation regime over the area is about 2,300 mm, and mean daily relative humidity and evaporation are 86% and 3.85 mm/day, respectively (Ekwere, 2012).

The massif's many rock types show diverse degrees of weathering. Pegmatites, granodiorites, diorites, tonolites, monzonites, charnokites, and dolerites have been found to penetrate these rocks (Ekwueme & Ekwere, 1989, 1991).

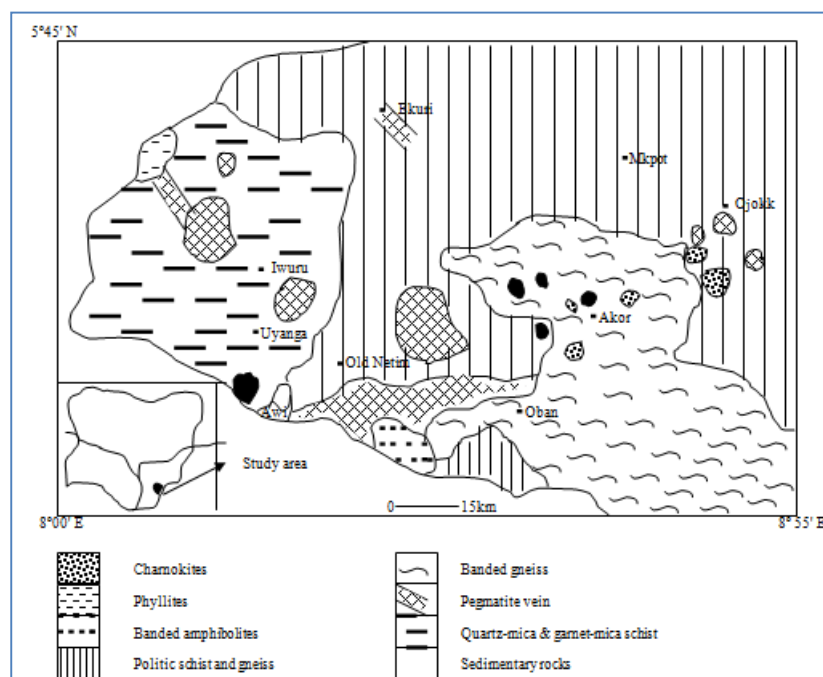


Figure 1. Geologic map of the study area; insert: map of Nigeria (adapted from **Ekwere**, 2012)

Hydrogeological settings

In terms of regional hydrogeological characterization, the study area belongs to the basement complex hydrogeological province of the Cross River area in southeastern Nigeria (**Ekwere & Edet**, 2012). **Okereke et al.** (1998) describe the Oban massif as a three-layer hydro-geo-electrical stratigraphic model composed of top unsaturated clayey sand (lateritic), middle gravelly sand-decomposed bedrock, and fresh fractured bedrock. Groundwater in the area is controlled by structural discontinuities such as fractures, joints, fissures, and regolith (**Petters et al.**, 1989; **Edet**, 1993; **Edet et al.**, 1994; **Ekwere & Edet**, 2012). The massif has a low to moderate lineament density that reflects the depth and extent of weathering profiles and their groundwater potential (**Ekwere & Edet**, 2012). There is no general water table for the area due to the variability of structural and geological controls. The thickness of the water-bearing formations has been estimated at 5–140 m (**Edet et al.**, 1998; **Okereke et al.**, 1998); the vulnerability of groundwater to pollution is dominantly controlled by the depth of the groundwater and, to a lesser extent, by the development of the vadose zone (**Ekwere & Edet**, 2015, 2017). Recharge rates and levels to porous aquiferous media are subject to impedance due to clay-rich top lateritic soil cover characterized by low permeabilities (**Petters et al.**, 1989; **Ekwere & Edet**, 2012). Groundwater occurs under water table conditions in the weathered and fractured units, with static water levels ranging from 0.00 to 10.00m across the massif (**Ekwere**, 2010).

Methodology

Sixty-four (64) groundwater samples were collected from 32 locations during the dry and rainy seasons. The samples were retrieved from hand-dug wells and motorized boreholes straddling the various geologic units that cover the entire area. Duplicate samples were collected at each location in 75 cl-polyethylene bottles. The sample bottles were soaked in 10% HNO_3 for 24 hours and rinsed several times with de-ionized water before use. The sampling bottles were thoroughly rinsed with aliquots of the sampled waters before collection at each location. One sample from each site was preserved by acidifying to pH ca.2 with 0.5 ml of concentrated HNO_3 acid for trace metal analysis.

In situ parameters, including temperature, electrical conductivity, total dissolved solids, pH, and Eh, were measured using standard field equipment (PHT-027 multi-parameter water quality probe). Before measuring the pH, the electrode was calibrated using pH 6.88 and 4.01 buffer solutions at a temperature similar to water samples. The same meter and an Ionode ORP electrode were used to measure Eh.

The ion concentrations of water samples were analyzed using standard procedures. Sodium and potassium were determined by flame photometry, and magnesium and calcium were determined with the titrimetric method using EDTA titration. The turbidimetric method was used to calculate sulfate (SO_4^{2-}) levels, and the titrimetric method was used for bicarbonate (HCO_3^-). Nitrate (NO_3^-) was determined by the Brucine colorimetric method in **Ademoroti** (1996) using a UNICAM UV2 spectrophotometer. Trace metal contents were also determined by atomic absorption spectrometry (AAS). Ions and nutrients were analyzed to aid in water type characterization and speciation modeling to identify arsenic species. The spectrophotometer wavelength and transmittance accuracies were $\pm 1\text{nm}$ and $\pm 0.5\%T$, respectively.

Analytical data quality was tested using charge balances of the groundwater composition and species distribution. The charge balance is calculated as follows:

$$\frac{[\sum \text{anion} - \sum \text{cation}]}{[\sum \text{anion} + \sum \text{cation}]} \times 100$$

The negative charge in all cases ranged from -4.082×10^{-3} to 6.046×10^{-5} . The percentage error was given by $100 * (\text{Cation} - [\text{Anion}]) / \text{Cation} (\text{Cation} + [\text{Anion}])$ ranging from -14.26 to 10.41. Based on the resulting groundwater metals composition, hydrochemical modeling was done using the Visual-MINTEQ software to identify metallic species. The model provides a flexible, cutting-edge example of equilibrium solution chemistry software for diluted aqueous systems in metal speciation prediction (**Ekwere**, 2023b). In contrast to other modeling programs, it has a sizable mineral and aqueous species database for interpretation reasons. For a saturation index (SI) equal to 0, the groundwater or solution is in equilibrium as regards the specific mineral. If $\text{SI} < 1$, it is deemed undersaturated; if $\text{SI} > 1$, it is considered oversaturated.

Results and discussion

Table 1 provides a statistical summary of the physicochemical data from sample analysis. The measurements were taken throughout the dry and wet seasons, and the information was compared with the World Health Organization's (**WHO**, 2010) permissible limits for each parameter. The groundwater was acidic to alkaline (5.63–8.65) throughout the sampling seasons. Total dissolved solids (TDS) levels below 1000 mg/l are another factor supporting the freshness of the waters. Indicative of weak acidic activity, often carbonic acid and lesser levels of organic acids like fulvic acid, mean pH values in the dry season are greater acidity, which is within the range of 4.5–7.0 (**Langmuir**, 1997). According to **Ekwere et al.** (2012), the mean pH value during the rainy season showed a rise in alkalinity, possibly due to the effects of dissolved salts from the weathering of silicates, carbonates, evaporites, and sulfide minerals besides atmospheric contributions.

Electrical conductivity (EC), which represents the ionic strength of the solution, had a higher mean during the rainy season, indicating increased ion concentrations from salt dissolution over the period, as verified by matching increases in TDS values.

According to a nutrient evaluation, cations tended to be $\text{Ca} > \text{K} > \text{Na} > \text{Mg}$, and anions tended to be $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{NO}_3$ during the dry season. The trends for cations and anions during the rainy season were $\text{Ca} > \text{Na} > \text{K} > \text{Mg}$ and $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{NO}_3$, respectively. The concentration of cations generally decreases from the dry to the rainy season. The fact that calcium was the most prevalent cation in both the dry and rainy seasons (78% and 61%, respectively) may be explained by the chemical weathering of silicates and the widespread presence of calcium carbonate (**Langmuir**, 1997). This may also determine the water-rock

Table 1. Statistical summary of physicochemical parameters measured in groundwater (all values in mg/l except where specified and pH)

Parameter	Dry season			Rainy season			WHO
	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	
Temp.(°c)	26	30.4	28	26	28	26.89	-
pH	5.88	8.65	6.75	5.63	8.10	7.18	6.5-8.5
Eh (mV)	20	84	29.79	14	67	27.44	-
EC(μS/cm)	60	580	247.38	210	800	566.67	1400
TDS (ppm)	40	890	233.45	140	790	462.22	1000
Ca	6.04	97.14	21.50	5.025	25.16	8.49	100
Mg	0.269	3.674	1.59	0.116	0.492	0.39	50
Na	1.762	6.974	4.35	1.162	2.113	1.43	200
K	0.192	32.18	8.51	0.278	1.314	0.82	12
Fe	0.001	9.80	1.71	0.128	1.108	0.547	0.3
Mn	0.005	0.224	0.081	0.008	0.165	0.075	0.1
Ni	0.003	0.061	0.016	0.003	0.036	0.011	0.1
As	0.001	0.013	0.008	0.001	0.030	0.006	0.01
Cu	0.001	0.036	0.012	0.002	0.015	0.008	0.05
Cd	0.001	0.018	0.004	0.001	0.025	0.006	0.005
Pb	0.001	0.021	0.004	0.001	0.041	0.010	0.05
Zn	0.020	0.210	0.090	0.180	0.350	0.273	0.01
SO ₄	13.64	839.60	120.23	132.0	896.2	572.9	400
NO ₃	0.094	11.721	2.69	1.439	6.714	4.41	10
HCO ₃	12.14	384.3	68.42	72.3	878.4	454.36	-
Cl	22.14	596.6	127.35	98.5	380.2	197.48	250

reactions of mineral phases such as plagioclase, calcite, aragonite, anhydrite, and dolomite from the basement and the sedimentary landscape near the study location. Magnesium and potassium came next in order of dominance among the cations, a pattern throughout all sampling seasons. Compared to other cations, potassium had the lowest concentrations, frequent in natural waters due to its propensity to be fixed by clay minerals and precipitate to form secondary minerals (Matheis, 1982).

Metal concentration assessments tended toward greater abundance with Fe > Mn > Zn > Ni > Cu > As > Pb > Cd in the dry season compared to Fe > Zn > Mn > Ni > Pb > Cu > As > Cd in the wet season.

The WHO (2010) tolerable standard of 0.3 mg/l for Fe was exceeded in the dry and rainy seasons with mean levels of 1.71 and 0.547 mg/l, respectively. According to Ekwere & Edet (2015), the increase in aquifer recharge from surface runoff during the rainy season may have had a dissolving effect on the mean concentration value that decreased during the rainy season. Since igneous and metamorphic rocks predominate in the research area, Fe is primarily mobilized and redistributed during the chemical weathering of these rocks (Ekwere & Edet, 2012). According to Deer *et al.* (1992), silicates and alumino-silicates like olivine, pyroxene, amphibole mineral groups, and mica biotite are the most likely sources of iron on the massif. Other widespread minerals that define metamorphic and igneous rocks include magnetite (Fe₂O₄) and pyrite (FeS₂) (Ekwere, 2012).

The mean Mn concentrations during the dry and rainy seasons were 0.081 mg/l and 0.075 mg/l, respectively, whereas the mean Ni concentrations were 0.016 mg/l and 0.011 mg/l. The mean readings for these metals were significantly below the 0.1mg/l acceptable

limit established by **WHO** (2010). Both metals are typically found alongside Fe in ferromagnesian igneous and metamorphic rocks, and just like with Fe, their evolution within aquifers is governed by redox potential-related processes.

The mean Cu concentrations during the dry and wet seasons were 0.012 mg/l and 0.008 mg/l, respectively, below the allowed limit of 0.05 mg/l. Hydrated minerals containing Cu^{2+} ions include antlerite, bronchantite, chalcantite, atacamite, azurite, malachite, melanothallite, and tenorite. Their concentrations are influenced by the pH, redox, chlorinity, sulfate, and total copper in the study area (**Ekwere et al.**, 2011; **Ekwere**, 2023b).

Pb showed average readings within the permissible range of 0.05 mg/l across all sample seasons. Other significant Pb species found in the research area, besides free mobile Pb^{2+} ions, include anglesite, cerussite, litharge, massicot, cotunnite, and many other abundant hydrated species (**Ekwere**, 2023b). Due to the low Pb concentration and absence of PbCO_3 , which would restrict this species' mobility, its presence is not a concern for groundwater contamination (**Edet et al.**, 2004).

Cd mean readings ranged from 0.004 mg/l in dry conditions to 0.006 mg/l in wet ones. The average value throughout the wet season exceeded the allowable limit of 0.005 mg/l. Cd is mostly associated with the ultra-basic and basic minerals of the basement massif (**Ekwere**, 2010). Considered as the result of in-situ anthropogenic impacts, a few areas showed spike concentrations over the permissible level.

The trace element of primary concern in this study, arsenic (As), had mean concentrations of 0.008 mg/l in the dry season and 0.006 mg/l in the rainy season, substantially below the permissible limit of 0.01 mg/l. However, three locations, barely 4.68% of the study's total sampled groundwater, showed readings above the permitted threshold during the dry season. As observed, areas with relatively high As concentrations also had relatively high Fe, HCO_3^- , and low NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations, deemed indicative of the prevalence of iron oxyhydroxides' reductive dissolution (**Khan & Rai**, 2022; **Soldatova et al.**, 2022). According to **Vivona et al.** (2007), this defies the presumption that Fe oxidation processes remove solutes (arsenates) from the solution.

Hydrochemical facies and water classification

The sampled groundwaters were classified based on **Piper's** (1944) trilinear plot and metal load according to **Ficklin et al.** (1992) and **Caboi et al.** (1999). The Piper plot in **figure 2** shows the relative concentrations of the major ionic species in the groundwater based on recorded values. Closely followed by chloride, calcium was the dominant cation, and bicarbonate was the dominant anion, leading to two recognizable hydrochemical facies: Ca - (Mg) - HCO_3 and Ca - (Na) - Cl - SO_4 .

The dominant alkaline-earth-bicarbonate facies [Ca-(Mg)- HCO_3] has been defined as water's alkaline group, typical of basement terrains; it has developed regolith with limited mixing, perhaps reflecting a primary stage of the evolution of its groundwater system (**Ekwere**, 2012; **Vivona et al.**, 2007; **Elueze et al.**, 2004). Its composition reflects the dissolution of silicate minerals in the bedrock and aluminosilicates in the weathered regolith (**Tijani**, 1994).

The second hydrochemical facies, Ca - (Na) - Cl - SO_4 , reflects the constituents of atmospheric precipitation (**Davis & Deweist**, 1966) and its subsequent influence on groundwater recharge.

Zhu et al. (2023) report the alkali/alkaline - HCO_3 . SO_4 water types are favorable for arsenic dissolution in groundwaters.

Figure 3 displays the metal load (Fe + Mn + Ni + As + Cu + Pb + Zn + Cd) against the pH plot. More than 85% of the water fall within the plot's nearly neutral low metal field. The cluster denotes that the region's naturally-weathered basement rocks are the main source of these metals. Plots in the acid-low metal field might depict how acid precipitation interacts with changed rocks to produce acidic groundwater (**Ekwere & Edet**, 2012). The intake of unpolluted water and the adsorption and precipitation processes can reduce the

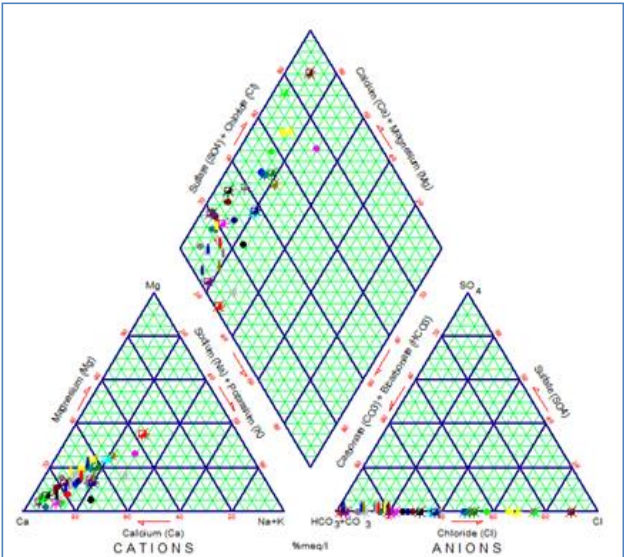


Figure 2. Hydrochemical facies of groundwater in the study area

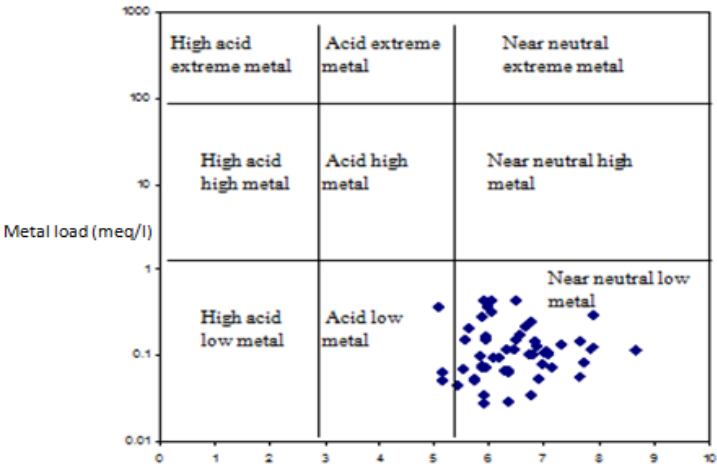


Figure 3. Metal classification of groundwater in the study area

levels of metals in groundwater (Rosner, 1998; Paulson, 1999). As a result, adsorption and precipitation processes may be able to lower concentration levels of metal inputs from anthropogenic and weathering processes (Ekwere, 2023b).

Figure 4 shows a plot adapted from Vivona *et al.* (2007) of an inverse association between Ca and As. It supports the chemical affinities of soluble hydrated calcic minerals (e.g., plagioclase) and arsenates (e.g. $[Ca_5(AsO_4)_3]$) reported in the groundwaters of the research area (Ekwere, 2010).

Principal component analysis

Correlation analysis. At $p=0.05$ (5% level of significance), discernible correlations between variables were identified and interpreted using Pearson’s correlation matrix (Table 2). Correlation indices between variables with coefficient $r > 0.7$ are considered strongly associated for ranking and classification purposes; coefficients between 0.3 and 0.6 are considered moderate correlations, and those < 0.3 are considered low. Both positive and negative correlation indices are possible.

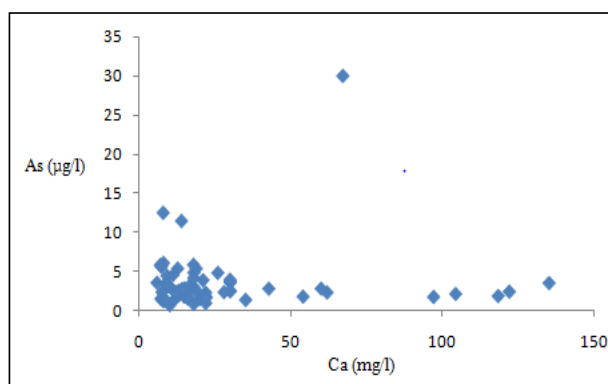


Figure 4. Scatter plot of arsenic vs calcium

Table 2. Correlation analysis of parameters measured in groundwater

	pH	Fe	Mn	As	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Cl	HCO ₃	SO ₄	NO ₃
pH	1												
Fe	-0.181	1											
Mn	0.128	0.323	1										
As	0.421	0.526	0.304	1									
Cu	-0.102	0.142	-0.007	0.346	1								
Pb	-0.097	-0.199	-0.128	0.118	-0.284	1							
Zn	0.071	0.037	0.104	0.345	0.661	-0.082	1						
Cd	0.958	-0.039	-0.018	0.067	0.412	-0.174	0.273	1					
Cr	0.341	-0.355	-0.146	0.315	0.043	0.070	0.191	0.214	1				
Cl	0.273	0.296	0.412	0.048	0.031	0.048	0.218	0.010	0.092	1			
HCO₃	0.426	-0.019	0.231	0.256	0.026	-0.244	-0.046	0.284	-0.113	0.246	1		
SO₄	0.259	0.396	0.086	0.198	0.166	-0.340	-0.034	0.278	-0.078	0.059	0.384	1	
NO₃	0.191	-0.946	0.304	0.204	0.014	0.256	0.208	-0.106	0.025	0.681	0.103	-0.188	1

In this matrix, pH has a strong positive correlation (0.958) with Cd, a moderately positive one with Cr (0.341), As (0.421), and HCO₃ (0.426), and a weak positive correlation with SO₄. According to the correlation, carbonic acid and bicarbonate (HCO₃) concentration in groundwater regulates pH or acidity and these, the solubility and potential mobilization of related metals. The calcic plagioclase in aquifer matrixes and contents from recharge sources with meteoric origin are believed to be the sources of the bicarbonate ions (Ekwere, 2010).

Fe has a moderate positive correlation with As, Mn, and SO₄, and a low one with Cu and Cl, which have to do with how water interacts under the surface with ferromagnesian rocks and other mineral complexes in the regolith.

Cu-Pb-Zn and arsenic have a weak to moderately favorable connection, and Cu and Cd-Zn have a moderately to strongly positive association, which suggests that groundwater in the catchment region interacts with the regolith and aquifers of chalcophile progenitor rocks. According to the apparent weak and faint positive association between some of the metals, there may be a common source but waning effect of environmental and subterranean processes.

Cluster analysis

Based on the water parameters measured, the cluster analysis resulted in the dendrogram shown in **figure 5**. Four clusters arose from an absolute correlation of a single linking iteration: water quality key indicators (pH, HCO₃, SO₄) and Fe, Pb, and Cr formed cluster one (1), with a 28.25 similarity level and geogenic control, as inferred from the correlation analysis; cluster 2 (Mn, Cl, NO₃) showed a 28.41 similarity and suspected anthropogenic control reckoned by biogenic or nutrient inputs, and clusters 3 (As) and 4 (Cu, Zn, Cd) were related to rock mineralogy.

Predicted arsenic species in groundwater

The distribution of arsenic aqueous ionic species and their corresponding saturation indices were estimated from groundwater compositions using hydrochemical modeling with the Visual-MINTEQ software, which, in contrast to other modeling programs, has a sizable database of mineral and aqueous species facilitating interpretation (Ekwere, 2023b). Saturation index (SI) values equal to 0 indicate groundwater or solution in equilibrium concerning the specific mineral. If SI < 1, it is deemed undersaturated; if SI > 1, it is regarded as oversaturated.

An element’s bioavailability, toxicity, and mobility are correlated with its physico-chemical speciation. Arsenic can be found in the environment in many forms and redox states, for which its toxicological study is challenging (Soldatova *et al.*, 2022). **Table 3**

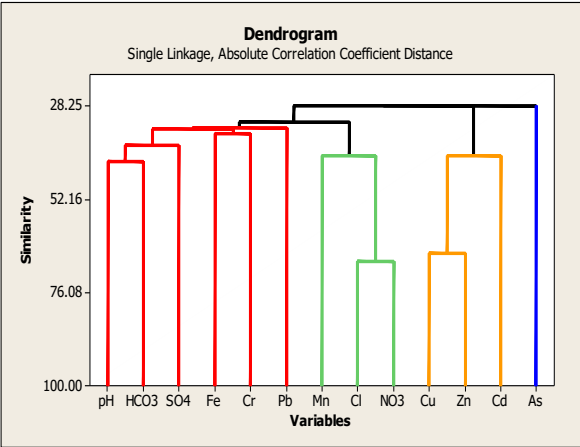


Figure 5. Dendrogram from the cluster analysis of water parameters measured

Table 3. Predicted aqueous arsenic (As) species from geochemical modeling

Ionic species	Saturation index	%Total concentration
AsO ₄ ⁻³	-32.84	68.2
As ₂ O ₅	-22.27	1.853
Zn ₃ AsO ₄ ·H ₂ O	-10.90	1.652
Mn ₃ (AsO ₄) ₂ ·H ₂ O	-7.98	1.278
Ni ₃ (AsO ₄) ₂ ·H ₂ O	-14.74	0.966
Pb ₃ (AsO ₄) ₂	-4.91	0.746
Cu(AsO ₄) ₂ ·H ₂ O	-5.78	0.046
Cu ₃ (AsO ₄) ₂ ·H ₂ O	-12.42	0.038
Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ·H ₂ O	-21.84	0.072

lists the aqueous species of arsenic. However, it should be noted that the geochemical modeling of the data predicted about 75% of ionic arsenic species. Other arsenic ionic species may be bound in mineral-species phases of elements not analyzed here; an approach to the projected species' potential effects on mineral solubility, adsorption and desorption behavior, and potential bioavailability is provided. Arsenic ionic species saturation indices may be used to identify substances precipitating, dissolving, or affecting groundwater composition. These calculations are based on an equilibrium model, and the results should only serve as a guide since kinetic factors could prevent them from achieving equilibrium (Ekwere, 2023b).

AsO_4^{3-} contributed roughly 68.2% of the total arsenic ionic concentration, i.e., it was the dominating arsenic species composed of the hydrated ionic phases H_2AsO_4^- , H_3AsO_4 , and HAsO_4^{2-} ; As_2O_5 (1.85%) came in second, and the other predicted species were identified as other metals' hydrated arsenates. The saturation indices revealed that all contributing species were undersaturated.

Fe and Mn oxyhydroxide coatings are known to adsorb arsenic (As), and Ekwere (2012) has detected these species in the area's groundwater. Adsorbed co-precipitated As is released as a result of the reduction of Fe and Mn hydroxides common in shallow groundwater. In shallow wells, an increase in the water table frequently causes the reductive dissolution of As-rich Fe oxyhydroxides. Qin *et al.* (2019) have suggested that adsorbed arsenate anions may also interact with dissolved carbonate anions and be discharged into groundwater. According to the geochemical model, arsenic predominately occurs as arsenates (As V), not as dangerous as the arsenite species (As III).

Conclusion

The groundwater in the study area is slightly acidic to alkaline across both sampling seasons, and the values of total dissolved solids indicate it can be considered fresh.

Ion concentrations generally decrease from the dry to the rainy season; the trend of dominance is similar, with slight variations in the major anions. Ionic concentrations reflect silicate weathering, resulting in two hydrochemical facies, Ca - (Mg) - HCO_3 and Ca - (Na) - Cl - SO_4 , of the basement groundwaters primary evolution.

The principal component and correlation and clusters analyses evidenced an interrelation between measured parameters explained basically by geogenic processes.

Arsenic concentrations are well within acceptable limits, and geochemical modeling predicts undersaturated aqueous species, especially arsenates, in the current physicochemical conditions. The bioavailable forms of arsenic are less toxic and pose no danger.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest regarding this manuscript.

References

- Ademorati, C.M.A. (1996). Environmental chemistry and toxicology. Ibadan, Nigeria: Foludex press.
- Ali, H. & Khan, E. (2018). What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'-proposal of a comprehensive definition. *Toxicol Environ Chem*, 100(1), 6-19 21.
- Ali, H., Khan, E., Ilahi, I. (2019) Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, Vol 2019, 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- APHA (1995). Standard methods for the examination of water and waste water. 19th Edition. American Water Works Association, Washington DC.
- Bhairo P. A., Pallavi, D., Vaibhav, S., Manish, K. (2023). Perspectives of Heavy Metal Pollution Indices for soil, sediment, and water pollution evaluation: An insight. *Total Environment Research Themes*, 6, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100039>
- Bose, U., Rahman, M., Alamgir, M. (2011). Arsenic toxicity and speciation in ground water sample: A review of some techniques. *International Journal of Chemical Technology*, 3(1),14-25.

- Chandrasekar, T., Keesari, T., Gopalakrishnan, G., Shankar-Karuppannan, S., Senapathi, V., Sabarathinam, C., Prasanna-Mohan-Viswanathan, P.M.** (2020). Occurrence of heavy metals in groundwater along the lithological interface of K/T Boundary, Peninsular India: A special focus on source, geochemical mobility and health risk. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80, 183-207. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00803-1>
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J.** (1992). *An introduction to the rock forming minerals*. New York: John Wiley & Sons.
- Duffus, J. H.** (2002). Heavy metals, a meaningless term? (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793-807.
- Edet, A. E., Okereke, C. S. Teme, S. C. Esu E. O.** (1998). Application of remote-sensing data to groundwater exploration: A case study of the Cross River State, SE Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 6, 394-404.
- Edet, A.E., Merkel, B.J., Offiong, O.E.** (2004). Contamination risk assessment of fresh groundwater using the distribution and chemical speciation of some potentially toxic elements in Calabar (southern Nigeria). *Environmental Geology*, 45, 1025-1035.
- Ekwere, A.S.** (2010). Hydrogeological and Hydrogeochemical Framework of the Oban Massif, south-eastern Nigeria. Ph.D Thesis, Dept. of Geology, University of Calabar, Calabar, Nigeria.
- Ekwere A.S., Edet, A., Ukpong, A.J.** (2011). Hydrochemistry of the near shore marine bay, Calabar River (South-eastern, Nigeria). *Materials and Geoenvironment*, 58(4), 421-436.
- Ekwere, A.S.** (2012). Hydrogeochemical framework of the Oban Massif, south-eastern Nigeria: A baseline for hydrogeochemical assessment and monitoring. Lambert Academic Publishing (LAP) GmbH, Germany.
- Ekwere, A.S. & Edet, A.E.** (2012). Hydrogeochemical Signatures of Different Aquifer Layers in the Crystalline Basement of Oban Area (SE Nigeria). *Journal of Geography and Geology*, 1 (1), 90-102.
- Ekwere, A. S., Edet, A. E., Ekwere, S. J.** (2012). Groundwater chemistry of the Oban Massif, South-Eastern Nigeria. *Revista Ambiente & Água*, 7(1), 51-66.
- Ekwere, A. S. & Edet, A.,** (2012). Trace metals in ground and surface waters of the Oban Massif area, SE Nigeria. *Advances in Applied Sciences Research*, 3(1), 312-318.
- Ekwere, A. S. & Edet, B. B.** (2021). Temporal variations of heavy metals in sediments, soils and dust particulates across the rock quarrying districts of the Oban Massif, southeastern Nigeria. *Environment Nanotechnology, Monitoring & Management* 15, 100431.
- Ekwere, A. S.** (2023a). Geology, Geomorphology and Evolution of the Landscapes of Cross Region, South-Eastern Nigeria: In A. Faniran *et al.* (Eds.), *Landscapes and Landforms of Nigeria, World Geomorphological Landscapes* (pp. 217-223). Springer-Nature Switzerland AG.
- Ekwere, A. S.** (2023b). Heavy Metal Distribution Trend and Speciation in Groundwaters within the Lower Cross River Hydrological Basin, SE-Nigeria. *Sustainable Water Resources Management*, 9,73. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00859-6>
- Feng, S., Guo, H., Sun, X., Han, S.** (2022). Limited roles of anthropogenic activities on arsenic mobilization in groundwater from the Yinchuan Basin, China. *Journal of Hydrology*, 610, 127910. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127910>
- Flora, S.J., Flora G.J.S, Saxena, G.** (2006). Environmental occurrence, health effects and management of lead poisoning. In: Cascas, S.B, Sordo, J., (Eds) *Lead: Chemistry, Analytical Aspects, Environmental Impacts and Health Effects* (pp 158-228). Elsevier Publication, Netherlands.
- Garcia, M. G., Scracek, O., Fernández, D. S., Hidalgo, M.** (2007). Factors affecting arsenic concentration in groundwaters from Northwestern Chaco-Pampean Plain, Argentina. *Environmental Geology*, 52, 1261-1275. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0564-y>
- Harvey L.J. & McArdle H.J.** (2008). Biomarkers of copper status: a brief update. *British Journal of Nutrition*, 99(S3): S10-S13.
- Hassan, A.** (2008). *Arsenic in alluvial aquifers in the Meghna Basin, southeastern Bangladesh: Hydrogeological and Geochemical Characterization*. TRITA-LWR PhD thesis. 1047 ISSN 1650-8602.
- Heidari, A., Kumar, V., Keshavarzi, A.,** (2019). Appraisal of metallic pollution and ecological risks in agricultural soils of Alborz province, employing contamination indices and multivariate statistical analysis. *International Journal of Environmental Health Research*, 31, 607-625. <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1677864>
- Idowu, G.** (2022). Heavy Metals Research in Nigeria: A Review of Studies and Prioritization of Research needs. Preprint (Version 1) available at Research Square: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1495299/v1>

- Katila, P., Colfer, C.J.P., De, J.W., Galloway, G., Pacheco, P., Winkel, G.** (2019). *Sustainable Development Goals*. Cambridge University Press: London, UK.
- Keskin, T. E. & Özler, E.** (2020). Heavy metal contamination in groundwater and surface water due to active Pb-Zn-Cu mine tails and water-rock interactions: A case study from the Küre mine area (Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29, 878-895. <https://doi.org/10.3906/yer-2001-3>
- Khan, M.U. & Rai, N.** (2022). Arsenic and selected heavy metal enrichment and its health risk assessment in groundwater of the Haridwar district, Uttarakhand, India. *Environmental Earth Sciences*, 81, 37.
- Kumar, V., Pandita, S., Sharma, A., Bakshi, P., Sharma, P., Karaouzas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A.K., Cerda, A.,** (2019). Ecological and human health appraisal of metal(oids) in agricultural soils: a review. *Geology, Ecology and Landscapes*, 5, 173-185. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1701310>
- Langmuir, D.** (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, Inc.
- Li, Y., Bi, Y., Mi, W., Xie, S., Ji, L.** (2021). Land use change caused by anthropogenic activity increase, fluoride and arsenic pollution in groundwater and human health risk. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124337.
- Lofts, S. & Tipping, E. W.,** (1999). Modeling the Speciation of Contaminants in Soils and Groundwaters. *Land Contamination and Reclamation*, 7 (4), 291-292.
- Manu, E., De Lucia, M., Kühn, M.** (2023). Hydrochemical Characterization of Surface Water and Groundwater in the Crystalline Basement Aquifer System in the Pra Basin (Ghana). *Water*, 15, 1325.
- Matthess, G.,** (1982). *The properties of groundwater*. Wiley, New York.
- Okereke, C. S., Esu, E. O., Edet, A. E.** (1998). Determination of potential groundwater sites using geological and geophysical techniques in Cross River State, southeastern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 27 (1), 149 – 163.
- Orisakwe, O.E., Oladipo, O.O., Ajaezi G.C, Udowelle, N.A.** (2017) Horizontal and Vertical Distribution of Heavy Metals in Farm Produce and Livestock around Lead-Contaminated Goldmine in Dareta and Abare, Zamfara State, Northern Nigeria. *Journal of Environmental and Public Health*, 2017, 3506949. <https://doi.org/10.1155/2017/3506949>
- Paulson, A. J.** (1999). Modelling removal of Cd, Cu, Pb and Zn in acidic groundwater during neutralisation by ambient surface water and groundwaters. *Environmental Sciences Technology*, 33, 3850-3856.
- Petters, S. W., Adighije, C. I., Essang, E. B., Ekpo, I. E.** (1989). A Regional Hydrogeological Study of rural water supply options for planning and implementation of phase II rural water programme in Cross River State, Nigeria. Research Square: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1979540/v1>
- Qin, B., Paerl, H. W., Brookes, J. D., Liu, J., Jeppesen, E., Zhu, G.** (2019). Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007–2017) efforts. *Science Bulletin*, 64, 354-356.
- Rahman, A. A. M. S., Ukpong, E. E., Azmatullah, M.** (1981). Geology of parts of the Oban massif, southeastern Nigeria. *Journal of Mining and Geology*; 18 (1), 60 – 65.
- Rehman, F., Azeem, T., Hashmi, R. A., Siddique, J., Shahab, A., Mustafa, S.** (2023). Drinking and irrigation quality of groundwater and health risk assessment due to arsenic exposure in Shekhupura district, Punjab, Pakistan. *Kuwait Journal of Science*, 50, 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2022.12.001>
- Rosner, U.** (1998). Effects of historical mining activities on surface water and groundwater – an example from northwest Arizona. *Environmental Geology*, 33, 224-230.
- Shahid, U. S., Iqbal, J., Abbasi, N. A., Tahir, A.** (2023). GIS based hotspot analysis and health risk assessment of groundwater arsenic from an unconfined deep aquifer of Lahore, Pakistan. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 6053-6068. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01612-w>
- Shankar, S., Shanker, U., Shikha.** (2014). Arsenic contamination of groundwater: A review of sources, Prevalence, Health Risks, and Strategies for Mitigation. *The Scientific World Journal*, 2014, 304524. <https://doi.org/10.1155/2014/304524>
- Soldatova, E., Sidkina, E., Dong, Y., Ivanov, V., Li, J., Sun., Z.** (2022). Arsenic in groundwater of the Poyang Lake area (China): aqueous species and health risk assessment. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01391-w>

- Stern, B.R.** (2010). Essentiality and toxicity in copper health risk assessment: overview, update and regulatory considerations. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 73 (2), 114–127.
- Stollenwerk, K.G.** (2003). Geochemical Processes Controlling Transport of Arsenic in Groundwater: A Review of Adsorption. In: Welch, A.H., Stollenwerk, K.G. (Eds.) *Arsenic in Ground Water* (pp 67–100). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-306-47956-7_3
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, D.J.** (2012). Heavy metals toxicity and the environment. In: Luch A (Ed). *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology: Experientia Supplementum 101*, (pp 133-164). Springer, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Tijani, M.N.** (1994). Hydrochemical assessment of groundwater in Moro area, Kwara State, Nigeria. *Environmental Geology*, 24, 194-202.
- Vivona, R., Preziosi, E., Madé, B., Giuliano, G.** (2007). Occurrence of minor toxic elements in volcanic-sedimentary aquifers: a case study in central Italy. *Hydrogeology Journal*, 15, 1183-1196.
- Wani, A.L., Ara, A., Usmani, J.A.** (2015). Lead toxicity: a review. *Interdisciplinary Toxicology*, 8 (2), 55-64.
- World Health Organization (WHO).** (2010). *Guideline for drinking water quality* (4th Ed). New York, Geneva, Switzerland.
- Zhang, Y., Chen, J., Shi, W.L., Zhang, D.D., Zhu, T., Li, X.** (2017). Establishing a human health risk assessment methodology for metal species and its application of Cr^{6+} in groundwater environment. *Chemosphere*, 189, 525-537.
- Zhu, Y., Yang, Q., Wang, Yang, J., Zhang, X., Li, Z., Martin, J.D.** (2023). A hydrochemical and isotopic approach for source identification and health risk assessment of groundwater arsenic pollution in the central Yinchua basin. *Environmental Research*, 231, 116153. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116153>

Ciencias de la Tierra

Artículo original

Pronóstico de la precipitación en los Andes tropicales: lecciones de las simulaciones de convección permitida

Forecasting precipitation over the tropical Andes: Lessons from convection-permitting simulations

J. Alejandro Martínez^{1,*}, María L. Rendón¹, Luisa F. Buriticá-Ruiz¹,
Santiago Giraldo-Cárdenas¹, Paola A. Arias²

¹ Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

² Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Resumen

Se presentan los resultados de la evaluación de 625 pronósticos diarios de precipitación en una parte de los Andes colombianos, realizados con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) entre 2020 y 2022. Las simulaciones se hicieron en modo de “convección permitida” usando un espaciado de cuadrícula de 4 km. El desempeño del WRF se contrastó con los pronósticos del Global Forecasting System (GFS) y con datos basados en observaciones. Los pronósticos con el WRF produjeron un patrón promedio de máximos nocturnos en valles interandinos y tierras bajas similar al del Global Precipitation Measurement Mission (GPM). La precipitación diurna según el WRF tuvo lugar, sobre todo, en las montañas. Comparados con los de la GPM, los promedios estacionales evidenciaron una sobreestimación en las montañas y una subestimación en tierras bajas. Los sesgos y precipitaciones absolutas del GFS fueron de menor magnitud que los del WRF. Las correlaciones entre acumulados diarios del GPM y los pronósticos de ambos modelos tendieron a ser mayores en las temporadas secas, llegando a valores máximos de 0,62 y 0,70 con WRF y GFS, respectivamente. Los índices basados en tablas de contingencia fueron similares en el WRF y el GFS, con valores de Bias, FAR y POD cercanos a 1,1, 0,10 y 0,96, respectivamente. La inspección de dos eventos especiales de precipitaciones elevadas en sendos lugares de Antioquia estableció que tanto el WRF como varios de los modelos globales proveyeron pronósticos útiles hasta con 12 horas de anticipación. Sin embargo, las simulaciones de mayor resolución representaron mejor las estructuras y gradientes propios del terreno complejo de los Andes tropicales.

Palabras clave: Pronóstico meteorológico; Regiones montañosas; Meteorología de mesoescala; Modelos numéricos; WRF.

Abstract

We evaluated 625 daily precipitation forecasts over parts of the Colombian Andes using the Weather Research and Forecasting (WRF) model between 2020 and 2022. We run the simulations in “convection-permitting” mode using a grid spacing of 4 km. WRF’s performance was compared with forecasts from the Global Forecasting System (GFS) and observational data. On average, WRF’s forecasts produced a pattern of nighttime maxima within the inter-Andean valleys and lowlands like that of the Global Precipitation Measurement Mission (GPM). According to the WRF model, daytime precipitation mostly occurred over the mountains. Compared to GPM, the WRF model overestimated precipitation in the mountains and underestimated it in the lowlands. In the GFS model, the biases and the absolute precipitation were smaller in magnitude than in the WRF. Correlation values between daily precipitation in the GPM and the forecasts of both models tended to be higher during dry seasons, with maximum values of 0.62 and 0.70 in the WRF and the GFS, respectively. The indices based on contingency tables were similar in the WRF and the GFS, with Bias, FAR, and POD values close to 1.1, 0.10, and 0.96, respectively. The evaluation of heavy rainfall events in two

Citación: Martínez JA, Rendón ML, Buriticá-Ruiz LF, *et al.* Pronóstico de la precipitación en los Andes tropicales: lecciones de las simulaciones de convección permitida. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):145-168, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1965>

Editor: José Daniel Pabón Caicedo

***Correspondencia:**

J. Alejandro Martínez;
john.martinez@udea.edu.co

Recibido: 8 de agosto de 2023

Aceptado: 14 de diciembre de 2023

Publicado en línea: 1 de febrero de 2024



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

places in Antioquia established that the WRF and several global models provided forecasts up to 12 hours in advance. However, higher-resolution simulations are better for representing structures and gradients typical of the complex terrain of the tropical Andes.

Keywords: Weather forecast; Mountain regions; Mesoscale meteorology; Numerical models; WRF.

Introducción

Los Andes tropicales colombianos están conformados por las cordilleras occidental, central y oriental. Cada cordillera tiene sus regímenes de precipitación diferenciados que dependen de diversos sistemas de mesoescala y generan complejos climas locales y regionales (**Poveda**, 2004). A la altura del departamento de Antioquia la cordillera central puede alcanzar altitudes de 4.080 m s.n.m, en el páramo del Sol, y descender hasta conectarse con los valles de los ríos Cauca y Magdalena. La interacción entre los valles y la alta montaña determina climas característicos en ambas laderas de la cordillera, con una gran variabilidad espacial diaria (**Poveda et al.**, 2005; **Ramírez & Jaramillo**, 2012; **Herzog et al.**, 2017). Según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), en la región andina se ha presentado el 90 % de los eventos relacionados con movimientos en masa, principalmente en Antioquia: 1.393 de los 11.900 registrados entre 1921 y 2019 (**UNGRD**, 2021). Además, en el 2019 fue uno de los departamentos con mayor pérdida anual esperada por inundación.

Los eventos meteorológicos extremos, como las precipitaciones intensas que producen avenidas torrenciales, derrumbes e inundaciones, pueden producir graves afectaciones a los asentamientos humanos y los ecosistemas, con pérdida de vidas humanas y costosos daños en propiedades e infraestructuras. Por lo tanto, el monitoreo y el pronóstico meteorológico son actividades esenciales para prevenir la pérdida de vidas y planificar actividades: construcción de infraestructura, tráfico aéreo, generación eléctrica, etc. Sin embargo, dada la complejidad intrínseca de la atmósfera y del territorio antioqueño, los pronósticos meteorológicos (es decir, la predicción con uno o dos días de antelación) son un gran reto que requiere esfuerzos continuos de investigación antes de aprovecharlos en la práctica. Frente a este reto, es fundamental el recurso de las simulaciones atmosféricas de alta resolución para el pronóstico meteorológico en el departamento.

Los modelos de pronóstico meteorológico en Colombia son una parte integral de la gestión del riesgo y de los sistemas de alertas tempranas. Algunas instituciones, como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá (SIATA), emplean el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (**Skamarock et al.**, 2019) para la predicción de variables meteorológicas como la temperatura y la precipitación a escalas nacional y regional, respectivamente. La verificación de las simulaciones para el pronóstico de precipitación del IDEAM ha dado buenos resultados en ciudades como Quibdó, Providencia, San Andrés y Rionegro, pero errores en Riohacha, Cali, Valledupar e Ibagué (**Ruiz et al.**, s.f.). Los pronósticos meteorológicos presentan grandes sesgos porque, al ser numéricos, tienen limitaciones para representar las condiciones atmosféricas de la región andina debido a la complejidad de la topografía de las tres cordilleras y los valles interandinos.

En diversos estudios se ha encontrado que el WRF proporciona buenas predicciones meteorológicas y que, comparado con otros modelos, resulta el más acertado para predecir la cantidad de tormentas intensas durante el tiempo de simulación o reproducir las principales características de la precipitación en áreas montañosas (**Gálvez & Douglas**, 2006; **Wang et al.**, 2006; **Gómez-Ríos et al.**, 2023). Por el contrario, en regiones con topografía compleja, este modelo suele sobreestimar la precipitación (**Colle et al.**, 1999; **Jiménez**, 2014), principalmente cuando la topografía está relacionada con fuertes procesos convectivos (**Jiménez**, 2014; **Gómez-Ríos et al.**, 2023). Asimismo, suele subestimar la precipitación nocturna en algunas regiones, lo cual estaría asociado con la sobreestimación de las precipitaciones durante la tarde, que deja condiciones termodinámicas poco favorables para las precipitaciones de la noche (**Álvarez & León**, 2015). Además de la

evaluación de las simulaciones de la precipitación con el modelo WRF, algunos estudios se han enfocado en el análisis de otras variables. Por ejemplo, **Urrego et al. (2019)** y **Cano et al. (2022)** evaluaron pronósticos de radiación solar sobre el Valle de Aburrá obtenidos con el WRF a partir de la información de piranómetros ubicados en la región. Los dos estudios sugieren que el WRF provee información útil sobre las variaciones del total diario de energía solar en superficie, aunque tiende a sobreestimar la radiación solar incidente.

Dada la importancia de los pronósticos meteorológicos en una región con topografía compleja como el departamento de Antioquia, en este trabajo se evaluó el desempeño del modelo WRF para simular la distribución espacial y temporal de los eventos de precipitación en partes de Antioquia durante cerca de 625 días en el período de 2020 a 2022. Los resultados se contrastaron con el comportamiento de modelos globales operados por centros internacionales. Se presentan aquí los resultados de la comparación estadística entre la precipitación según el WRF y las estimaciones satelitales. Primero se compararon la precipitación diurna con la nocturna y las variaciones estacionales de los promedios diarios; después se analizaron las correlaciones entre los acumulados diarios en diferentes temporadas y se evaluó el desempeño del WRF en términos de índices basados en tablas de contingencia. Estos análisis se contrastaron con los pronósticos del Global Forecasting System (GFS). Por último, se incluyeron dos ejemplos de eventos especiales de precipitación durante enero del 2023.

Datos y metodología

Simulaciones regionales con el WRF

Se estudiaron simulaciones hecha con la versión V4.0.2 del modelo atmosférico WRF (**Skamarock et al., 2019**), el cual se emplea para múltiples fines, desde pronósticos meteorológicos hasta simulaciones climáticas. Con el modelo WRF se generaron simulaciones de las condiciones atmosféricas a partir de las condiciones iniciales y de frontera de los campos del GFS. Las condiciones iniciales correspondieron a las 00:00 UTC (es decir, 19:00 LT del día anterior), y las simulaciones del WRF representaban las condiciones atmosféricas de las siguientes 54 horas (es decir, desde las 19:00 LT del día 0 hasta las 01:00 LT del día 3). Se consideraron las primeras 12 horas de simulación como el *spin-up* del modelo, y los análisis estadísticos presentados correspondieron a las 24 horas siguientes (es decir, desde las 07:00 LT del día 1 hasta las 07:00 LT del día 2). Este tipo de simulaciones corresponden en sentido estricto a un re-escalamiento de los pronósticos del GFS, ya que no se realiza ningún procedimiento adicional como la asimilación de datos.

Las simulaciones WRF incluyen dos dominios (**Figura 1a, b**). El dominio externo (d01) comprende toda Colombia, además de varios países vecinos. El tamaño de la celda en d01 es de 12 km, con 290 (260) celdas en la dirección este-oeste (norte-sur). Se usa también un “ajuste espectral” (*spectral-nudging*) para longitudes de onda mayores a 1.700 km. El dominio interno (d02) tiene un tamaño de celda de 4 km, con 169 (151) celdas en la dirección este-oeste (norte-sur). Este dominio es mucho más pequeño en términos de número de celdas debido a restricciones computacionales. En el d02 se usa, asimismo, *spectral nudging* para los campos de viento, temperatura, humedad y presión por encima de la capa límite planetaria (*planetary boundary layer*, PBL), en este caso para longitudes de onda mayores a 700 km. En ambos dominios se usa el *spectral nudging* para mantener parte de la información sinóptica del GFS, lo que es importante en el caso de ondas tropicales y otras estructuras. Ambos dominios tienen 50 niveles en la vertical, con el tope en 30 hPa.

En la **tabla 1** se presentan las parametrizaciones usadas en las simulaciones. En el dominio de 12 km (es decir, el d01) se usó el esquema de cúmulos de New Tiedtke, en tanto que en el de 4 km (es decir, el d02) se esperó que las mayores estructuras convectivas fueran explícitamente resueltas por el modelo, lo que implicó que la simulación de d02 se corriera en modo de “convección permitida”. El resto de las parametrizaciones fueron las mismas en ambos dominios y se escogieron porque generalmente muestran un buen desempeño para nuestra región de estudio según se constató en los estudios de **Urrego**

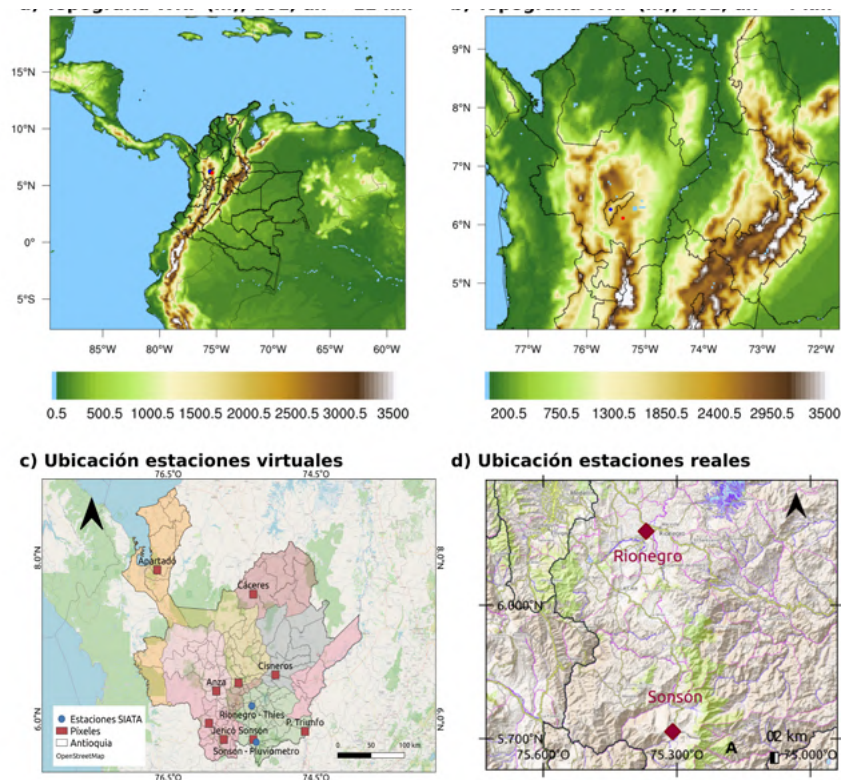


Figura 1. a) Dominio externo del WRF. b) Dominio anidado del WRF. c) Ubicación de puntos para comparación entre GPM, WRF y GFS (estaciones virtuales: cuadros rojos). d) Ubicación de estaciones meteorológicas que representan observaciones *in situ* (ver puntos azules en (c) para ubicación relativa)

Tabla 1. Parametrizaciones usadas en las simulaciones con el modelo WRF (V4.0.2). Cuadrícula d01: dx = 12 km, 290 x 260. Cuadrícula d02: dx= 4 km, 169 x 151. Niveles verticales: 50. Tope: 30 hPa

Parametrización	Opción usada
Cúmulus	New Tiedtke (solo d01)
Microfísica	Morrison
Radiación	RRTMG
Capa límite planetaria	YSU
Modelo de superficie terrestre	Noah

et al. (2019), *Cano et al.* (2022), *Ruiz et al.* (2022), *Espinosa* (2019, 2022), *Carmona* (2021), *Fernández* (2021), *Morales* (2021) y *Camacho* (2023). Se almacenaron diversos campos de los dos dominios con intervalos de muestreo diferentes: 1 hora para d01 y 15 minutos para d02.

El desempeño del modelo empleado para el pronóstico de la precipitación se evaluó con un subconjunto de las simulaciones realizadas. El análisis se enfocó en el periodo 2020-2022 con simulaciones orientadas al pronóstico casi diario. En la **tabla 2** se registra la cantidad de días por mes con simulaciones WRF durante el periodo de análisis estadístico del estudio (marzo de 2020 a julio de 2022). Otras fechas, antes y después del periodo analizado, están disponibles en nuestro sitio web (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>); algunas de ellas se emplearon posteriormente en dos ejemplos del 2023.

Tabla 2. Número de días por mes disponibles para el análisis estadístico de este estudio (2020-2022) en las simulaciones WRF y en común en “Todos”: WRF, GFS, GPM y observaciones *in situ*. Total de días comunes: 625

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
WRF	50	54	67	72	76	68	42	50	60	62	45	55
Todos	47	52	66	65	70	39	31	50	60	61	30	54

Modelo global GFS

El Global Forecasting System (GFS) (https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php) de Estados Unidos es un sistema de pronósticos para todo el globo. Por motivos prácticos, se usan los pronósticos de precipitación de GFS inicializados a las 06:00 UTC (01:00 LT) en la comparación con el WRF (inicializado a las 00:00 UTC), ya que ambas simulaciones están disponibles en las primeras horas de la mañana. En este sentido, se le dio prioridad a las simulaciones disponibles a una hora fija con fines operacionales (por ejemplo, para entregar información a los responsables de decisiones y a otros usuarios a las 7 am de cada día), en lugar de comparar la misma hora de inicialización (00:00 UTC). Una desventaja es que los modelos no empiezan desde una misma condición inicial, pero la evaluación resultante permite evaluar de forma realista el valor agregado de correr el WRF con una mayor resolución (en condiciones de GFS) que simplemente esperar el pronóstico más actualizado (pero con menor resolución espacial) del GFS para su uso en las primeras horas de la mañana.

Los campos de precipitación del GFS se descargaron casi diariamente durante el periodo de interés (2020-2022) en el sitio <https://ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/gfs/prod> con una resolución de 0,25° (no debe confundirse esta con el tamaño de la celda original del modelo, de 13 km aproximadamente) (**sección 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>).

Información satelital

En este estudio se usaron las estimaciones de precipitación de la Global Precipitation Measurement (GPM) (Huffman *et al.*, 2019) para evaluar el desempeño de los modelos de pronóstico WRF y GFS. Para ello, se descargaron los datos de la GPM correspondientes a una región que cubre Antioquia y se agregaron en diferentes ventanas temporales, a partir de una hora y hasta 24, según el modelo o la métrica de desempeño considerada (ver abajo). El análisis incluyó no solamente la comparación entre campos sino también la definición de estaciones virtuales de la GPM, empleado como conjunto de referencia (**Figura 1c**), para el análisis de correlaciones y tablas de contingencia (mayores detalles en la **sección 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>).

Estaciones meteorológicas

Se empleó la información de la red de estaciones meteorológicas del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) para medir el desempeño de los pronósticos de precipitación en el oriente antioqueño en dos estaciones (“Rionegro” y “Sonsón”) ubicadas en esta subregión (**Figura 1d**). Estas estaciones contenían información horaria de la precipitación en el periodo 2020-2022, aunque con algunos intervalos de datos perdidos. Dichos registros horarios correspondían a diferentes escalas de tiempo: las 3-horaria, 6-horaria, 12-horaria y diaria (Buriticá, 2023), así como acumulados diarios de precipitación de los registros horarios entre las 7 am del día de interés y las 7 am del día siguiente (es decir, la misma definición que la de los acumulados diarios del WRF) (**Tabla 3**).

Métodos de evaluación de los pronósticos

La evaluación de la precipitación con el WRF se basó primordialmente en la comparación con las estimaciones satelitales de la GPM cualitativas (comparando los campos con la

Tabla 3. Generalidades de las estaciones SIATA empleadas

Municipio	Código	Datos perdidos (%)	Longitud (°)	Latitud (°)
Sonsón	227,228	12,10%	-75,30937	5,71597
Rionegro	199	25,90%	-75,36900	6,16629

resolución original de cada conjunto de datos) y cuantitativas (a partir de la diferencia de campos, además de correlaciones y tablas de contingencia de estaciones virtuales basadas en la GPM). Se hicieron análisis similares para el GFS y se evaluaron el WRF, el GFS y la GPM con respecto a dos estaciones meteorológicas en superficie.

Los coeficientes de correlación de Spearman proveen información sobre la co-variabilidad de los modelos y los datos basados en observaciones, independientemente de las diferencias en las magnitudes típicas propias de cada conjunto de datos. Los acumulados diarios de precipitación de los modelos y la GPM se separaron según el mes del año al cual pertenecían, y para cada mes se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman del modelo y la GPM en cada una de las estaciones virtuales definidas.

El análisis de las tablas de contingencia permite explorar mejor la capacidad de los modelos para pronosticar días “con lluvia” en contraste con días “sin lluvia”, sin importar la variación continua de los valores de los acumulados diarios de precipitación. En nuestro estudio se dividió cada muestra de datos (GPM, WRF o GFS) en dos partes: aquellos días con valores iguales o menores al percentil 5 de cada distribución, se catalogaron como días “sin lluvia”, y el resto de las fechas (con valores mayores al percentil 5 de cada distribución) se etiquetaron como días “con lluvia”. De este modo, un día “con lluvia” en el modelo y en las observaciones podía tener acumulados de precipitación muy diferentes. Es decir, el análisis de la tabla de contingencia basada en esta clasificación permitió indagar por la cantidad de veces en que el modelo se comportó de forma cualitativamente similar a las observaciones en términos de presencia o ausencia de lluvia.

Nuestros resultados se centran en índices de desempeño derivados de las tablas de contingencia, incluidos los escalares de Bias (B), porción correcta (PC), probabilidad de detección (POD) y probabilidad de falsas alarmas (FAR) (Wilks, 2006). La PC corresponde al número de días que se pronosticaron correctamente como días con o sin lluvia con respecto al total de días analizados. El Bias corresponde al número total de días con lluvia en el modelo comparado con las observaciones. El FAR representa el número de veces en que se pronosticó erróneamente un día con lluvia con respecto al total de días con lluvia en el modelo. El POD corresponde al número de días con lluvia pronosticados exitosamente con respecto al total de días con lluvia en las observaciones (para detalles adicionales ver **material suplementario 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>). Aquí se presentan los resultados del análisis de los pronósticos de la precipitación acumulada en periodos de 12 horas (intervalos de 07:00 - 19:00 LT y 19:00 - 07:00 LT del día siguiente) y de 24 horas (precipitación diaria en la ventana de 07:00 LT a 07:00 LT del día siguiente). Para este fin, la información de todas las bases de datos usadas (GPM, IDEAM, WRF y GFS) se acumuló con la de los intervalos de 12 y 24 horas a partir de sus resoluciones temporales originales.

En la **tabla 2** se muestra la cantidad de días por mes con datos disponibles del WRF, los comunes de las observaciones (IDEAM y GPM) y del GFS (“Todos”). Las fechas comunes para la comparación y la evaluación fueron 625, distribuidas entre el 2020 y el 2022. La temporada seca de mitad de año estuvo entre las menos muestreadas por estos conjuntos de datos. Además, el periodo 2020-2022 se caracterizó por condiciones propias de La Niña, lo que usualmente representa anomalías positivas de precipitación en la región de estudio.

Eventos especiales de precipitación

Para el estudio de los dos eventos especiales de precipitación, se usó la información de una estación del IDEAM, cuatro estaciones del Sistema de Alerta y Monitoreo de

Antioquia (SAMA) y 25 estaciones del SIATA, así como estimaciones satelitales de la GPM y pronósticos del GFS y el WRF. Además, se emplearon pronósticos de precipitación de otros dos modelos globales disponibles para esas fechas: el modelo Icosahedral Nonhydrostatic (ICON) y el Global Environmental Multiscale Model (GEM). Los pronósticos de ICON los hace el servicio meteorológico alemán (DWD) usando una configuración con un tamaño equivalente a una cuadrícula de 13 km (https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/01_num_weather_prediction_modells/icon_description.html). El modelo GEM lo emplea el servicio meteorológico de Canadá, con un tamaño de cuadrícula de 15 km (https://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gef_html_public/index.html). Los pronósticos de ICON y GEM usados aquí para los dos eventos tienen como hora de inicialización las 00:00U TC (7 p.m. del día anterior a la fecha de interés), teniendo en cuenta la disponibilidad operacional.

Análisis y resultados

En esta sección se hace primero el análisis estadístico del desempeño del WRF y el GFS en el pronóstico de precipitación en la región correspondiente al dominio interno (tamaño de celda de 4 km) del WRF (**Figura 1b**). Las comparaciones entre los diferentes conjuntos de datos corresponden al conjunto común de días con información (625 días).

Contraste entre día y noche en el WRF y la GPM

El ciclo diurno es una característica importante de la precipitación (**Poveda et al., 2005**). En las **figuras 2 y 3** se muestran los acumulados de 12 horas, que representan las precipitaciones diurnas (entre 7 am y 7 pm LT) y las nocturnas (entre 7 pm y 7 am LT), según el WRF y la GPM. Estos campos incluyen tanto los meses típicamente lluviosos del año (abril y octubre), como los de temporada seca (enero y julio). La comparación entre el WRF y la GPM sugiere que el modelo representa la disminución de las lluvias que tiene lugar durante la época más seca del año en esta región (ilustrada con los campos de enero), y el incremento relativo en los meses de temporada lluviosa (abril y octubre). En julio se registraron precipitaciones más fuertes que en enero tanto en las observaciones de la GPM como en los pronósticos del WRF.

También es notable la capacidad del modelo para simular precipitaciones diurnas y nocturnas con patrones similares a los de la GPM. Especialmente durante la noche, la GPM registró valores mucho mayores que durante el día, especialmente en el costado occidental de la cordillera occidental (incluidas partes de Chocó, así como del suroeste y del Urabá antioqueños). Algunas de estas precipitaciones están asociadas al efecto de las brisas marinas desde el Pacífico (**Mapes et al., 2003**) y a la actividad estacional y sinóptica de los vientos de bajo nivel del oeste, incluido el chorro del Chocó (**Sierra et al., 2015; Mejía et al., 2021**). Además, debe tenerse en cuenta la influencia de las precipitaciones asociadas a los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) sobre el Pacífico colombiano (**Sakamoto et al., 2011; Zuluaga & Houze, 2015; Jaramillo et al., 2017**). Al norte de la región de estudio los mayores acumulados nocturnos se registran en el nororiente de Antioquia y partes de Córdoba, Sucre y Bolívar (incluida la Serranía de San Lucas). Una parte sustancial de esta precipitación está asociada con los SCM, los cuales se inician en las primeras horas de la noche y continúan su desarrollo y decaimiento durante la madrugada y las primeras horas de la mañana (**Zuluaga & Houze, 2015; Hernández-Deckers, 2020**). Durante abril y octubre se notan también grandes acumulados en el valle del Magdalena y en sus cercanías, incluido el oriente de Antioquia (altiplano del Oriente y Magdalena Medio) y partes de Santander. Dichas precipitaciones pueden estar asociadas tanto a circulaciones de valle nocturnas en el valle del Magdalena (**Gómez-Ríos et al., 2023**), como a incursiones desde el sur por el Magdalena o vientos de bajo nivel de tipo chorro nocturno desde el Caribe (**Camacho, 2023**).

Durante la noche, el WRF registró los mayores acumulados en zonas similares a las de la GPM, aunque con patrones menos extendidos. Esto es especialmente notable en las lluvias en el Magdalena (entre Antioquia y Santander) y al oeste de la cordillera occidental

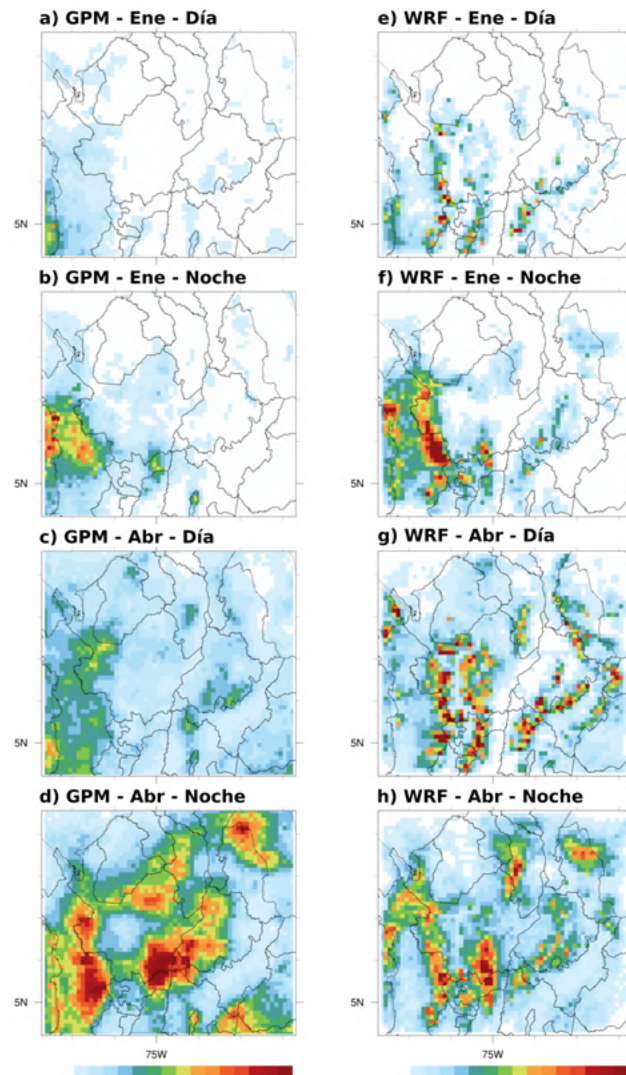


Figura 2. Promedios para enero (Ene) y abril (Abr) de precipitación acumulada (mm/12hr) en ventanas de 12 horas según el GPM (a-d) y el WRF (e-h). Ambas fuentes se grafican en la cuadrícula del GPM (0,1°). Los acumulados para “Día” se calculan entre las 7 am y las 7 pm LT. Los acumulados para “Noche” se calculan entre las 7 pm y las 7 am LT del día siguiente.

(sobre Chocó). Excepto por lo pronosticado en julio, el WRF no representó bien el patrón nocturno de precipitaciones entre Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar (incluidas Ayapel y partes de La Mojana), estando los máximos en esta zona asociados a la Serranía de San Lucas (Bolívar). Por último, es notable el patrón de precipitaciones diurnas del WRF sobre y cerca de la topografía (**Figuras 2e, g y 3e, g**; ver también la **Figura 1b** como referencia), el cual no es aparente en los campos de la GPM. Es bien conocido que en varias partes de los Andes tropicales de Colombia hay un pico de precipitación en horas de la tarde (**Poveda *et al.*, 2005**). En este sentido, hay que tener en cuenta que productos satelitales similares a la GPM tienen sesgos en la estimación de la precipitación en la región (**Jaramillo *et al.*, 2017**; **Vallejo-Bernal *et al.*, 2021**); en este caso, pronosticó tiempo seco en las horas de la tarde, probablemente debido a que no se consideraron las lluvias asociadas con estructuras menos profundas. En contraste, pese a los sesgos de magnitud del WRF, este habría capturado mejor que la GPM el pico de la tarde en la actividad convectiva y la precipitación asociada en áreas de los Andes tropicales.

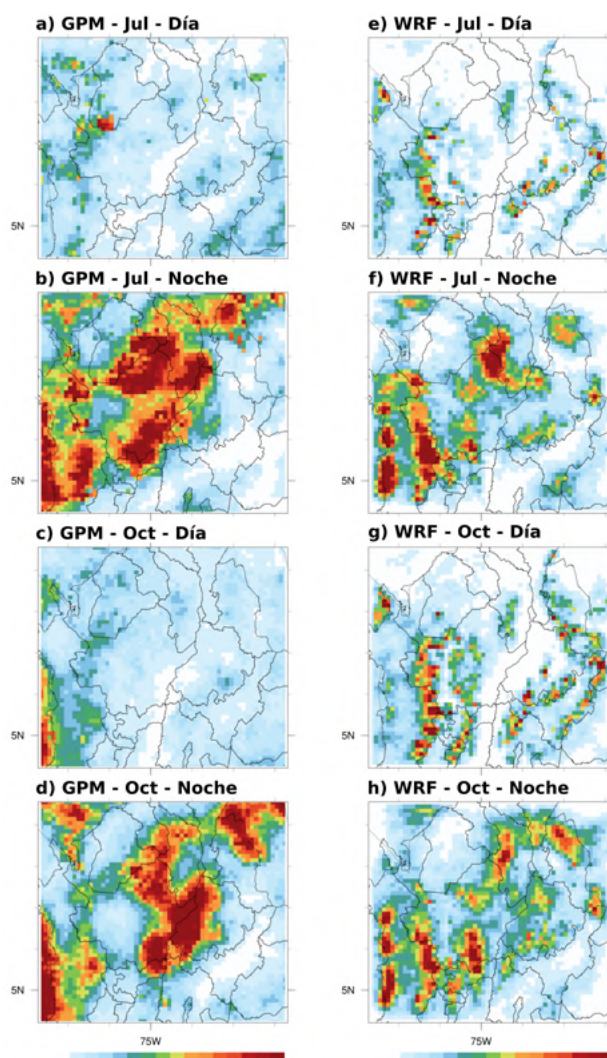


Figura 3. Promedios para julio y octubre de precipitación acumulada (mm/12hr) en ventanas de 12 horas según el GPM (a-d) y el WRF (e-h). Ambas fuentes se grafican en la cuadrícula del GPM (0,1°). Los acumulados para “Día” se calculan entre las 7 am y las 7 pm LT. Los acumulados para “Noche” se calculan entre las 7 pm y las 7 am LT del día siguiente.

El contraste de la precipitación diurna y la nocturna tiene que ver parcialmente con el ciclo diurno de los vientos en la región. Por ejemplo, durante junio, julio y agosto, los vientos a 925hPa no son muy fuertes en la mañana, pero sí se empiezan a notar vientos superficiales apuntando hacia la parte alta de las montañas (pendiente arriba) gracias al calentamiento diferencial del terreno (**Figura 4 a, b**, respectivamente). Durante la tarde se notan, además, los efectos de las brisas marinas tanto del Pacífico como del Caribe (**Figura 4 c, d**). Los vientos pendiente arriba contribuyen a la convección de menor escala en las cordilleras y los patrones de mesoescala resultantes de las brisas marinas y su interacción con el terreno favorecen zonas de convergencia de mesoescala, por ejemplo en el costado occidental de la cordillera Occidental (Chocó y occidente de Antioquia) y partes de La Mojana (Bajo Cauca). Durante la noche los vientos en la capa límite pueden acelerarse debido a una disminución del arrastre asociado con la turbulencia de la capa límite convectiva diurna (**Figura 4e**). Este desacople da lugar a estructuras como los chorros nocturnos y los vientos de brecha (ambos asociados con máximos de viento) y los diferentes *hot spots* de convergencia de mesoescala alrededor de los Andes, incluidos

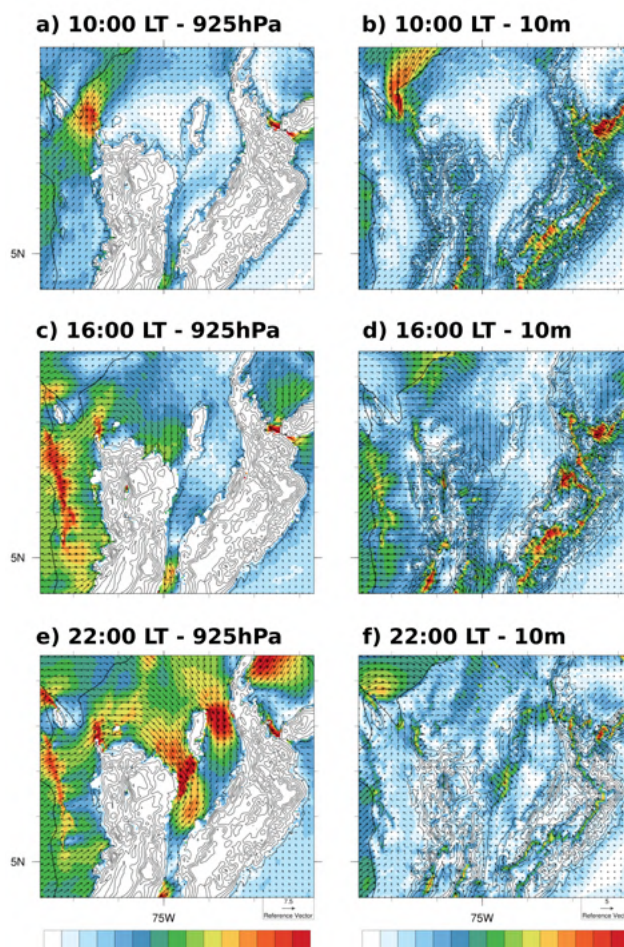


Figura 4. Promedios de campos de vientos para diferentes horas del día durante la temporada junio-julio-agosto según simulaciones del WRF entre 2021 y 2022. Izquierda: nivel de 925hPa. Derecha: vientos a 10 m sobre la superficie. Los contornos de colores indican la magnitud de viento en m s^{-1} .

algunos a lo largo del valle del Magdalena (Magdalena Medio y Oriente antioqueño). De esta forma, mientras que la circulación pendiente arriba está relacionada con las lluvias en las cordilleras durante el día (especialmente la tarde) (**Figura 3e**), la convergencia de mesoescala está relacionada con las lluvias en el costado occidental de la cordillera Occidental en la tarde y noche, y en La Mojana, el Magdalena Medio y el Oriente de Antioquia en horas de la noche (**Figura 3f**).

Comportamiento estacional del WRF y el GFS

Los promedios estacionales de la precipitación total diaria dan una idea de las zonas más lluviosas en la región de estudio y de su comportamiento a lo largo del año (**Figura 5**). Los campos de la GPM (**Figura 5 a-d**) muestran el trimestre diciembre-enero-febrero (DEF) como el más seco del año, con valores por debajo de los 10 mm/día. Durante el periodo de estudio 2020-2022, tanto los trimestres climatológicamente caracterizados como las temporadas lluviosas (marzo-abril-mayo, MAM, y septiembre-octubre-noviembre, SON) como la temporada de junio-julio-agosto (JJA) mostraron acumulados notables de precipitaciones, con zonas alrededor de los Andes que superaron los 25 mm/día. Sobre tierra, específicamente el costado occidental de la cordillera Occidental (entre Chocó y Antioquia) y el costado oriental de la cordillera Central (en el valle del Magdalena), según la GPM los promedios pueden superar los 45 mm/día, en tanto que sobre el mar fácilmente

superan los 55 mm/día. Debe tenerse precaución con las mayores magnitudes estimadas por la GPM, ya que podrían corresponder a sobreestimaciones, pero, de todas maneras, proveen una imagen de las regiones y temporadas más lluviosas.

El WRF, por su parte, mostró variaciones estacionales similares a las de la GPM (**Figuras 5 e-h**), aunque con patrones menos extendidos y estructuras disminuidas o ausentes sobre partes del valle del Magdalena y el norte de Antioquia. Además, los promedios diarios en el WRF registraron una parte notable de la precipitación localizada sobre las cadenas montañosas o en sus laderas. En este sentido, la cuadrícula de 4 km del WRF evidenció dos efectos marcados de la topografía en la distribución de las precipitaciones gracias a los efectos de la distribución de las montañas: i) el calentamiento diferencial diurno (fuentes de calor elevadas) y sus consecuencias en la formación de convección sobre el terreno elevado y las circulaciones térmicas, y ii) el efecto mecánico de las montañas en el flujo atmosférico. Estos dos efectos combinados, entre otros, ayudan a dar forma a estructuras locales y de mesoescala en los vientos de bajo nivel que pueden favorecer regiones de convergencia y proveer forzamiento para la convección (**Figura 4**). La comparación ocasional con campos de radar (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/>

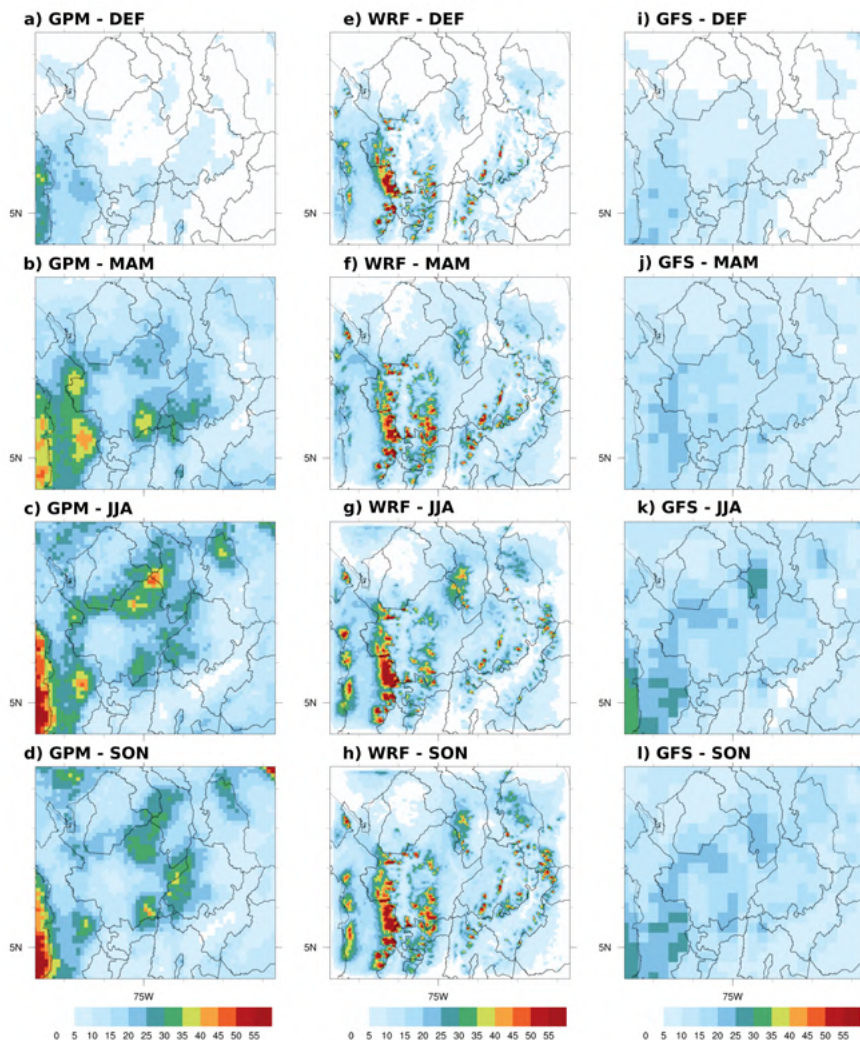


Figura 5. Promedios estacionales de precipitación diaria (mm/día) según la GPM (**a-d**), el WRF (**e-h**) y el GFS (**i-l**). Cada fuente se grafica en su cuadrícula original: GPM: 0,10°, WRF: 4km (~0,036°), GFS: 0,25°

article/view/1965/3943) sugiere que las estructuras simuladas por el WRF asociadas a la topografía tienden a proveer una imagen realista, al menos en un sentido espacial. Sin embargo, nuestras simulaciones con el WRF tendieron a producir mayores acumulados diarios sobre tierra que las estimaciones de la GPM, con máximos locales que fácilmente superaban los 30 mm/día. Esta característica parece corresponder a un sobreestimado real de la precipitación en el WRF, como lo sugieren las comparaciones directas con estaciones en superficie (Buriticá, 2023).

En el caso del GFS (**Figuras 5 i-l**), los campos a 0,25° mostraron, naturalmente, estructuras mucho más gruesas que los de la GPM o el WRF. Es notable, además, que los promedios diarios estacionales fueron mucho menores en el GFS que en la GPM (y que en el WRF, en general), con valores entre los 5 y los 25 mm/día. Tanto los cambios estacionales como las estructuras simuladas por el GFS tendieron a parecerse a los de la GPM, aunque la diferencia media en las magnitudes no parece explicar la ausencia del patrón marcado de lluvias sobre el Magdalena (entre Antioquia y Santander) que sugiere la GPM. A escalas de cientos de kilómetros (la mitad o un cuarto de un departamento), el GFS produjo estructuras espaciales similares a las de la GPM y el WRF, pero no proporcionó detalles en las escalas más finas ni ofreció los fuertes gradientes que probablemente sean más propios de los Andes tropicales.

Las diferencias entre el WRF y el GFS y la GPM pueden verse más claramente en la **figura 6**. En los dos modelos se presentaron subestimaciones en las regiones bajas, principalmente sobre el valle del Magdalena (entre Antioquia y Santander), el norte de Antioquia, La Mojana y la costa Pacífica, pero las magnitudes de tales subestimaciones con respecto a la GPM fueron mayores en el WRF. En cuanto a las regiones de montaña, es evidente que WRF presentó mayores sesgos, con sobreestimaciones durante todas las temporadas del año, en tanto que con el GFS las diferencias absolutas fueron casi nulas, con excepción de algunas regiones durante los trimestres de junio a agosto (JJA) y de septiembre a noviembre (SON).

Desempeño de los pronósticos diarios: correlaciones y tablas de contingencia

Para identificar mejor el comportamiento diario de los pronósticos sugeridos por los modelos, se hizo un análisis basado en coeficientes de correlación y tablas de contingencia a partir de los acumulados diarios de precipitación. Como primera aproximación, se usaron estaciones virtuales con datos de la GPM que representaban las cabeceras urbanas de nueve municipios del departamento ubicados en zonas expuestas a diferentes regímenes de precipitación (**Figura 1c** y **Figura 5**). En particular, los municipios de Apartadó, Cáceres y Puerto Triunfo están más expuestos a los sistemas atmosféricos formados en tierras bajas, algunos de ellos asociados a los grandes patrones de precipitación descritos más arriba (**Figuras 2-5**). Los demás municipios están, en general, en tierras más altas, en terreno más complejo, aunque algunos de ellos (como Salgar y Sonsón) pueden verse afectados por estructuras atmosféricas de mayor escala asociadas con dinámicas del occidente de la cordillera Occidental y el valle del Magdalena, respectivamente.

En ambos modelos las mayores correlaciones (**Tabla 4**) se encontraron en julio y agosto y diciembre y enero en la mayoría de las estaciones virtuales, con valores de hasta 0,62. Estos periodos corresponden también a temporadas climatológicamente menos lluviosas, cuando la zona de convergencia intertropical (*Intertropical Convergence Zone*, ITCZ) está algo más alejada de la región de estudio o se ha suprimido. Así, los mayores valores de correlación en estos meses podrían sugerir el efecto de variaciones asociadas con estructuras sinópticas, las cuales podrían estar mejor representadas por ambos modelos. En contraste, los meses climatológicamente más lluviosos, como abril, septiembre y octubre, presentan algunos de los valores más bajos de correlación, lo que sugeriría que la actividad en estos meses tiene una componente sinóptica o subsinóptica menor que fuerza parte de la precipitación, ya que hay suficiente energía y agua precipitable para lluvias de rápido desarrollo cuando la ITCZ está más localizada sobre la región de estudio. En general, el GFS tuvo valores de correlación algo mayores que los del WRF, aunque las

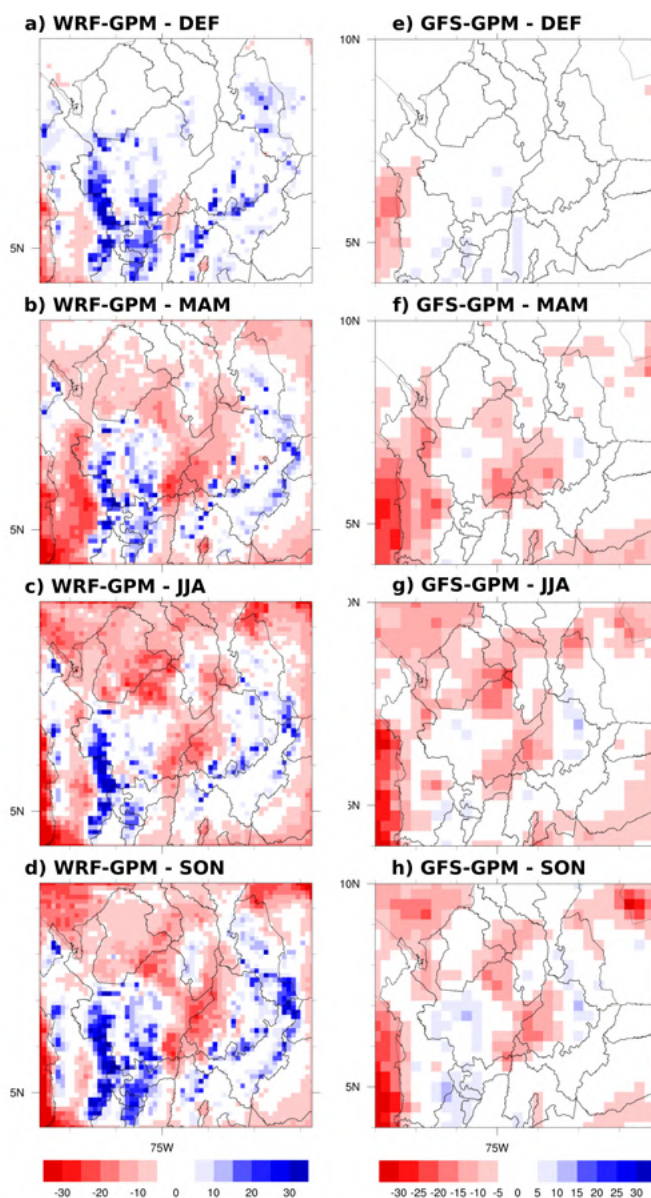


Figura 6. Diferencias en precipitación promedio diaria (mm/día) entre: **(a-d)** WRF y GPM, en cuadrícula de la GPM de 0,1°; **(e-h)** GFS y GPM, en cuadrícula GFS de 0,25°

diferencias en promedio no fueron muy grandes. En este sentido, ambos modelos tendrían un desempeño similar en el pronóstico de fluctuaciones en la precipitación diaria (día a día) al de las estaciones virtuales escogidas. Por último, no se notó una estratificación clara dependiente de la altura de las estaciones virtuales (comparar primeras tres filas y las últimas seis).

A partir de las tablas de contingencia obtenidas para el WRF y el GFS y comparadas con la GPM, se estimaron los índices en la **tabla 5**. La PC de los pronósticos estuvo entre 78 y 90 % en el WRF, y entre 89 y 94 % en el GFS, dependiendo de la estación virtual. Además, el Bias tendió a estar entre 1,1 y 1,2 en el caso del WRF, mientras que los valores del GFS fueron más cercanos a 1,0, lo que sugiere que el WRF tendió a sobreestimar en un 10 a 20 % el número de días con lluvia comparado con la GPM. Además, el FAR se situó entre 0,1 y 0,2 en el WRF, con tendencia a situarse por debajo de 0,1 en el GFS.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Spearman de los valores diarios de precipitación de **a)** WRF vs. GPM (en cuadrícula GPM de 0,10°), y **b)** GFS vs. GPM (en cuadrícula GFS de 0,25°). Los nombres de municipios representan las locaciones de las estaciones virtuales (**Figura 1c**). Las estaciones están ordenadas de menor a mayor altura sobre el nivel del mar. Los valores en negrilla son estadísticamente significativos según una prueba *t* de dos colas, con un nivel $\alpha = 0,05$; los grados de libertad se evaluaron para cada mes por separado según la **Tabla 2**.

a) WRF Vs. GPM

Municipio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Apartadó	0,42	0,29	0,61	0,26	0,17	-0,13	0,20	0,15	0,46	0,21	0,28	0,23
Cáceres	0,23	0,07	0,46	0,06	0,16	-0,01	0,08	0,19	0,21	0,43	0,08	0,32
Puerto Triunfo	0,16	0,33	0,19	0,29	0,33	0,09	0,14	0,44	0,27	0,31	0,01	0,22
Anzá	0,33	0,32	0,46	0,26	0,31	0,30	0,51	0,55	0,05	0,20	0,36	0,41
Cisneros	0,09	0,33	0,36	0,07	0,28	0,46	0,09	0,40	0,34	0,22	0,11	0,06
Salgar	0,47	0,18	0,36	0,42	0,29	0,23	0,43	0,55	0,25	0,35	0,38	0,57
Jericó	0,44	0,41	0,17	0,43	0,47	0,34	0,55	0,62	0,34	0,35	0,26	0,49
San Pedro	0,28	0,25	0,34	0,28	0,55	0,52	0,51	0,58	0,37	0,45	0,49	0,36
Sonsón	0,39	0,27	0,32	0,22	0,47	0,32	0,55	0,49	0,30	0,41	0,32	0,22

b) GFS Vs. GPM

Municipio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Apartadó	0,23	0,19	0,75	0,31	0,25	0,35	0,56	0,38	0,30	0,16	0,36	0,22
Cáceres	0,32	0,44	0,61	0,40	0,40	0,48	0,19	0,41	0,44	0,40	0,08	0,36
Puerto Triunfo	0,57	0,28	0,37	0,27	0,37	0,38	-0,03	0,48	0,31	0,27	0,17	0,43
Anzá	0,54	0,24	0,25	0,38	0,50	0,42	0,50	0,63	0,60	0,41	0,45	0,23
Cisneros	0,67	0,27	0,46	0,14	0,39	0,55	0,22	0,70	0,39	0,35	0,25	0,44
Salgar	0,50	0,49	0,19	0,49	0,32	0,13	0,43	0,48	0,32	0,32	0,56	0,54
Jericó	0,49	0,34	0,24	0,42	0,23	0,12	0,43	0,51	0,36	0,24	0,40	0,28
San Pedro	0,61	0,28	0,47	0,20	0,43	0,45	0,33	0,68	0,33	0,38	0,40	0,42
Sonsón	0,67	0,26	0,23	0,29	0,43	0,35	0,32	0,53	0,40	0,49	0,42	0,26

Por otra parte, la POD fue superior al 95 %, con valores similares en ambos modelos. Por último, debe señalarse que la fracción FAR/POD estuvo entre 0,073 y 0,219 en el WRF, en tanto que en el GFS estuvo en el rango de 0,038 a 0,115, lo que demuestra que ambos modelos tienen más pronósticos acertados de días con lluvia comparados con los desaciertos en días con lluvia pronosticados, siendo el desempeño del GFS ligeramente mejor. En el caso del WRF, Salgar se destacó como el municipio con el mejor desempeño del modelo, mientras que Cáceres presentó el peor. El modelo GFS tuvo un mejor desempeño en Sonsón y Anzá, pero mayores dificultades en Cáceres. Además, se destaca que ambos modelos presentaron un desempeño superior en municipios ubicados a mayor altitud (primeras seis filas en la **Tabla 5**).

Por último, teniendo en cuenta que la GPM puede tener sesgos importantes en la región de estudio, se presenta un análisis basado en tablas de contingencia y observaciones *in situ* del SIATA (**Tabla 6**). Una evaluación de los pronósticos basada en un conjunto amplio de estaciones meteorológicas está más allá del objetivo principal del presente estudio, por lo que el desempeño de los modelos WRF y GFS y de la GPM se evaluó con respecto a dos estaciones meteorológicas ubicadas en el sur-oriente de Antioquia (sub-región Oriente) (**Figura 1d**). Dichas estaciones están expuestas a regímenes de

Tabla 5. Tablas de contingencia para los modelos WRF y GFS y estimaciones satelitales de la GPM

a) WRF Vs. GPM

Municipio	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
San Pedro	0,858	1,115	0,126	0,974	0,129
Sonsón	0,856	1,105	0,124	0,968	0,128
Jericó	0,864	1,106	0,120	0,974	0,123
Salgar	0,902	1,040	0,071	0,967	0,073
Cisneros	0,798	1,184	0,184	0,966	0,190
Anzá	0,853	1,070	0,111	0,951	0,117
Puerto Triunfo	0,824	1,114	0,145	0,952	0,152
Cáceres	0,778	1,236	0,213	0,973	0,219
Apartadó	0,795	1,209	0,195	0,973	0,200

b) GFS Vs. GPM

Municipio	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
San Pedro	0,915	1,002	0,046	0,956	0,048
Sonsón	0,939	1,010	0,037	0,973	0,038
Jericó	0,923	1,008	0,044	0,963	0,046
Salgar	0,917	1,000	0,044	0,956	0,046
Cisneros	0,906	1,026	0,063	0,962	0,065
Anzá	0,931	1,002	0,037	0,964	0,038
Puerto Triunfo	0,878	1,042	0,085	0,954	0,089
Cáceres	0,872	1,092	0,112	0,974	0,115
Apartadó	0,896	1,016	0,063	0,952	0,066

Tabla 6. Tabla de contingencia para las simulaciones del modelo WRF y los pronósticos de la GFS con respecto a las observaciones del GPM y las observaciones de estaciones meteorológicas del SIATA: **a)** Sonsón; **b)** Rionegro

a) Sonsón

Comparación	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
SIATA Vs. GPM	0,877	1,11	0,115	0,983	0,117
SIATA Vs. GFS	0,841	0,996	0,09	0,904	0,102
SIATA Vs. WRF	0,882	1,098	0,11	0,977	0,113
GPM Vs. GFS	0,945	1,01	0,037	0,973	0,038
GPM Vs. WRF	0,856	1,105	0,124	0,968	0,128

b) Rionegro

Comparación	PC	Bias	FAR	POD	FAR/POD
SIATA Vs. GPM	0,845	1,063	0,117	0,939	0,125
SIATA Vs. GFS	0,857	1,119	0,129	0,975	0,132
SIATA Vs. WRF	0,836	1,129	0,143	0,967	0,148
GPM Vs. GFS	0,934	1,024	0,053	0,97	0,055
GPM Vs. WRF	0,869	1,1	0,115	0,974	0,118

precipitación con máximos en las temporadas MAM y SON, y se caracterizan por máximos nocturnos de precipitación sustanciales (Buriticá, 2023). La estación Rionegro está localizada en territorio relativamente plano sobre la cordillera central de los Andes (valle de San Nicolás) y la estación Sonsón se encuentra más cerca al valle del Magdalena y está expuesta a los sistemas de precipitación propios de dicho valle (Figuras 3-5).

En la **tabla 6** se muestra un buen desempeño del modelo WRF en las estaciones de análisis, con un índice de PC del 84 % en Rionegro y del 88 % en Sonsón. Los valores de Bias del WRF indicaron un pronóstico algo excesivo de eventos de precipitación. En cuanto al índice FAR, el valor fue del 14 % en Rionegro y del 11 % en Sonsón, en tanto que el POD fue cercano al 97 %. Además, se observó un mejor desempeño del modelo WRF en el municipio de Sonsón que en Rionegro.

Tanto el GFS como la GPM fueron capaces de representar las observaciones de las estaciones meteorológicas (**Tabla 6**), con un mejor desempeño en el municipio de Sonsón que en Rionegro. Esta diferencia se refleja en la relación FAR/POD, la cual fue más baja en Sonsón en todos los casos analizados. Además, el modelo GFS tuvo un comportamiento más similar a las estimaciones de la GPM que a las observaciones provenientes de las estaciones meteorológicas. Por ejemplo, en Sonsón la relación FAR/POD entre la GPM y el GFS fue de 0,038, en tanto que aumentó hasta tres veces entre el SIATA y el GFS. En cuanto a las observaciones en tierra, se observó un buen desempeño del modelo GFS, con un índice PC superior al 86 % en ambos municipios. El Bias fue del 12 %, lo que indica un pronóstico levemente excesivo de los eventos de lluvia. Además, se obtuvo un FAR del 12 % y un POD del 98 %.

Uno de los resultados más relevantes fue la similitud del desempeño en la GPM y el SIATA con respecto a la GPM, o, incluso, ligeramente peor (en PC y POD). De hecho, al comparar el desempeño de la GPM con los datos de las estaciones de SIATA, este fue similar al de los modelos WRF y GFS. Esto tiene que ver tanto con los posibles sesgos en la GPM (Jaramillo *et al.*, 2017; Vallejo-Bernal *et al.*, 2021) como con su resolución efectiva, la cual puede ser varias veces mayor a $0,1^\circ$ (Guilloteau & Foufoula-Georgiou, 2020). Estos resultados también sugieren que la representatividad de las diferentes bases de datos debe ser tomada en cuenta. Por una parte, los modelos tienen una resolución efectiva mayor que su tamaño equivalente de cuadrícula (Warner, 2010; Pielke, 2013) y, por otra parte, la precipitación es un fenómeno muy variable que las estaciones en superficie no representan cabalmente por cubrir áreas muy pequeñas (Kidd *et al.*, 2017). En efecto, se notó una mayor similitud entre la GPM y los modelos (probablemente porque representan áreas más parecidas entre sí), que entre esta y las observaciones del IDEAM. En este contexto, los resultados en la **tabla 5** para las estaciones virtuales sugieren que el desempeño del WRF y el GFS es, cuando menos, comparable con la representación de la GPM y, por lo tanto, puede ofrecer información útil.

Ejemplos de pronóstico de dos eventos de altas precipitaciones en el departamento de Antioquia

Para complementar el análisis estadístico presentado, se estudiaron en detalle dos eventos de precipitación ocurridos en enero del 2023 en el departamento de Antioquia, los cuales causaron daños y pérdidas importantes en cuestión de horas. El primer evento se registró el 10 de enero en el municipio de Betulia y el segundo tuvo lugar el día 14 de enero en el Valle de Aburrá.

Evento 9-10 de enero, Betulia. El 10 de enero de 2023 se presentó un movimiento en masa que dejó incomunicados y sin acueducto a cerca de 3.500 campesinos de 11 veredas del municipio de Betulia, suroeste de Antioquia (Blu Radio, 2023). Es de interés analizar la precipitación en este tipo de eventos dado que su acumulación en la zona pudo tener implicaciones en la saturación del suelo, una de las posibles causas del movimiento en masa registrado.

Según las estimaciones satelitales de la GPM (**Figuras 7 a-d**), el evento de mayor magnitud tuvo lugar el 9 de enero, justo un día antes de la tragedia registrada en el municipio de Betulia, y se inició entre las 19:00h y las 20:00 LT. El máximo correspondiente

puede verse en la **Figura 7c**, en la cual el recuadro indica la zona aproximada de las mayores precipitaciones en alrededores del municipio de Betulia. Las estimaciones de la GPM muestran precipitaciones en la zona entre la 1 pm del 9 de enero y la 1 am del 10 de enero (**Figuras 7b, c**). Las **Figuras 7 e-h** muestran los pronósticos del WRF para el 9 de enero y la madrugada del 10 de enero. En la actividad simulada por el modelo se nota un máximo de precipitación sobre la región de Betulia durante la noche y primera hora de la madrugada (recuadro, **Figura 7g**), además de lluvias previas en la tarde (**Figura 7 f**). Por su parte, el pronóstico del GFS muestra lluvias en la zona entre la noche del 9 de enero y las primeras horas de la mañana del 10 de enero (**Figuras 7 k, l**). Tanto el WRF como el GFS sugerían una actividad durante las primeras horas del 10 de enero que no se nota en la GPM (**Figura 7 d**). Hay que anotar que la simulación del WRF fue inicializada con las condiciones de las 19:00 LT del 8 de enero, y la del GFS seis horas después (01:00 LT), y ambas estuvieron disponibles en las primeras horas de la mañana del 9 de enero. Esto sugiere que, en principio, dichos pronósticos podrían usarse para una advertencia en la zona con cerca de 12 de horas de anticipación.

Para comparar con los registros en superficie, se consideraron las estaciones de la red SAMA y del IDEAM disponibles en las fechas y la zona del evento (**Figura 8**). Para la comparación con las estimaciones satelitales y los pronósticos de varios modelos, en la **figura 8 c** se incluyó el promedio de los registros de las estaciones meteorológicas disponibles (**Figuras 8 a, b, d**). Se incluyeron, además, los valores correspondientes al día 1 de pronóstico para cada fecha según varios modelos meteorológicos promediados en el recuadro en la **Figura 7c**. Por ejemplo, los valores de precipitación del WRF entre las 07:00 LT del 9 de enero y las 07:00 LT del 10 de enero corresponden a la simulación inicializada el 8 de enero a las 19:00 LT. Asimismo, se obtuvieron los pronósticos de los modelos globales ICON y GEM. En el caso del modelo global GFS, la hora de inicialización corresponde a 01:00 LT del día correspondiente (e.g., 9 de enero). En el caso de los modelos globales, sólo hubo datos a partir del 9 de enero para el presente ejemplo.

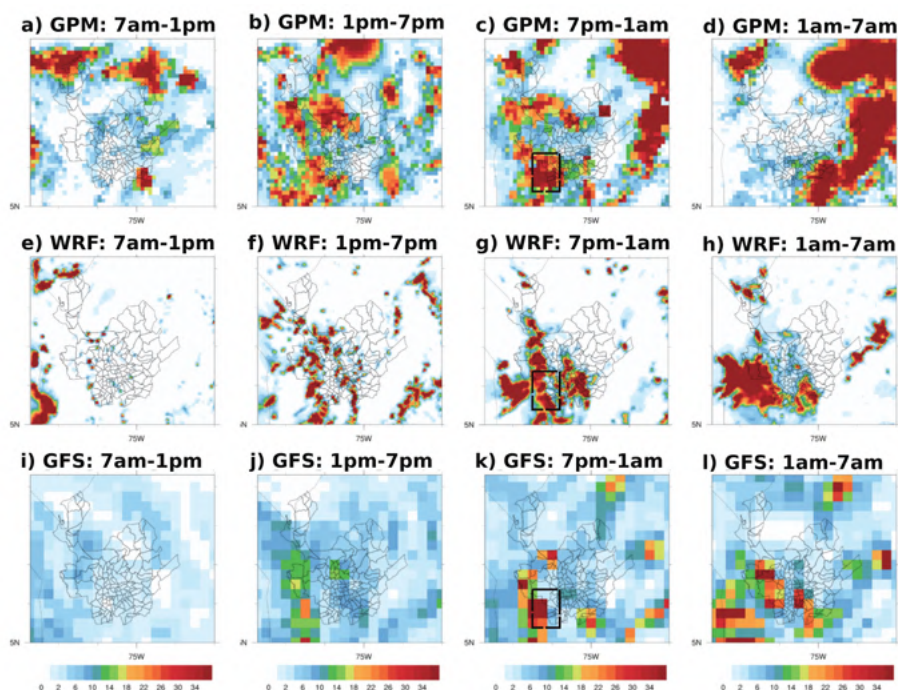


Figura 7. Precipitación acumulada en intervalos de 6 horas (mm/6hr) durante el 9 (primeras tres columnas) y 10 (cuarta columna) de enero de 2023, según: (**a-d**) GPM, (**e-h**) WRF, e (**i-l**) GFS. Los recuadros en la tercera columna rodean la región de Betulia.

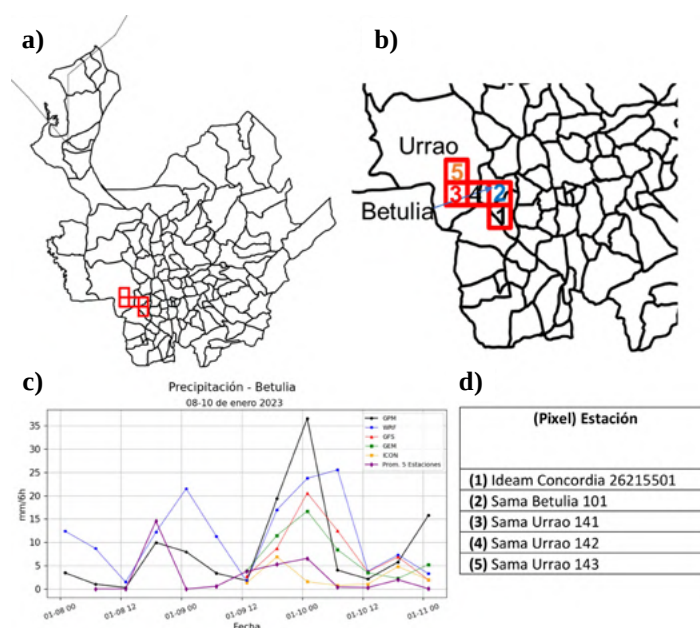


Figura 8. a) Ubicación de estaciones meteorológicas usadas para este evento. b) Zoom de la región de las estaciones y etiquetas para su identificación. c) Series de precipitación acumulada en 6 horas según promedios de las estaciones, estimaciones satelitales de la GPM y pronósticos de modelos (WRF, GFS, GEM e ICON); el eje horizontal tiene formato “mm-dd hh”. d) Identificación de las estaciones usadas según etiquetas en b)

La serie de tiempo del promedio de las estaciones muestra un evento entre las 13:00 LT del 9 y la 01:00 LT del 10 de enero, además de un evento de menor duración durante la tarde del 8 de enero. Las estimaciones de la GPM evidenciaron precipitaciones en los mismos pasos de tiempo, aunque la señal se sobreestimó mucho para el evento del 9-10 de enero. El WRF mostró acumulados notables entre el 8 y el 9 de enero, y valores mayores entre el 9 y 10 de enero, extendiéndose incluso hasta las primeras horas de la mañana. El GFS mostró valores menores que los del WRF y también detectó un evento entre el 9 y el 10 de enero mayor que en los pasos de tiempo siguientes. Por último, mientras que el GEM sugería un evento de una magnitud similar a la del WRF, los pronósticos de ICON presentaban valores mucho menores, y similares entre el 9 y el 10 y el 10 y el 11 de enero (es decir, no sugerían un evento especial el 9-10 de enero).

Evento 14 de enero, Valle de Aburrá. El 14 de enero del 2023 se presentó un evento de precipitación fuerte que generó pérdidas y daños en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Además de la precipitación, nuestra variable de mayor interés, el evento registró fuertes vientos superficiales que ocasionaron aun más daños.

En la **figuras 9 a-d** se aprecian las estimaciones de la GPM acumuladas en períodos de 6 horas. El recuadro en la **figura 9 c** muestra el Valle de Aburrá y la zona de las precipitaciones del evento del 14 de enero. En particular, las lluvias asociadas con los daños en la parte central de Medellín tuvieron lugar en horas de la tarde. Una inspección de los datos de la GPM hora a hora (no se muestra) registró el inicio de las lluvias fuertes entre las 16:00 y las 17:00 LT, principalmente en el sur del valle. Además, se puede ver que las lluvias persistieron hasta aproximadamente las 20:00h de ese 14 de enero. El acumulado máximo aproximado para el final del día (24:00h) en el sur del valle fue de 60 mm y entre 30-40 mm en el centro del valle (Medellín). El pronóstico del WRF (**Figuras 9 e-h**), similar al de la GPM, incluía una actividad notable sobre el Valle de Aburrá en horas de la tarde, incluidas lluvias en el sur y el centro del valle (**Figuras 9 c, g**). El WRF también coincidió con el GPM en cuanto a las lluvias en la noche en el sur del valle y el suroriente

de Antioquia (**Figuras 9 d, h**). El GFS también evidenció un pico de actividad durante la tarde en el Valle de Aburrá y las regiones vecinas (**Figura 9 k**), aunque la resolución de los datos disponibles ($0,25^\circ$) no permitió tanto detalle como la del GPM o el WRF.

Para el evento del Valle de Aburrá fue posible usar datos de la red de estaciones en superficie del SIATA (**Figuras 10 a, b, d**). Para simplificar la presentación de este ejemplo, se usó un promedio de 25 estaciones (**Figura 10 d**) para describir la evolución temporal de la precipitación días antes y después del evento (curva morada en **figura 10 c**). Un comportamiento análogo se observó en la mayor parte de las estaciones individuales (no se muestra). La **figura 10 c** también incluye series de tiempo de acumulados de 6 horas de precipitación según los pronósticos disponibles de varios modelos globales y del WRF, que aparecen promediados en el recuadro de la **figura 9 c** (ver discusión de la **figura 7** para la descripción de los datos de los modelos).

En estas series de tiempo (**Figura 10 c**) resalta el pico de precipitación que se presentó en el acumulado de la madrugada del 14 de enero según la GPM, lo cual se debe exclusivamente a un pico de lluvias ubicado sobre la región del oriente antioqueño (**Figura 9 a**) y que no tuvo implicaciones directas en el Valle de Aburrá. Para la tarde del 14 de enero, el promedio de las estaciones muestra un máximo de precipitaciones. A pesar de que las estimaciones satelitales de la GPM no alcanzaron la magnitud alcanzada por el promedio de las estaciones, sí lograron registrar el evento ocurrido en horas de la tarde. Por otra parte, se observa que los modelos lograron pronosticar el máximo de precipitación ocurrido en la tarde, siendo las magnitudes pronosticadas por el WRF similares al promedio de las estaciones y mayores a las del GFS. El GEM también logró predecir un evento mayor que en los días anteriores, en tanto que el ICON mostró un comportamiento muy homogéneo entre el 13 y el 15 de enero.

Los dos ejemplos considerados reflejan el potencial de los modelos de pronóstico meteorológico como herramientas esenciales para la gestión del riesgo. Tanto el WRF como el GFS reprodujeron cualitativamente bien las mayores estructuras notables en la GPM a lo largo del día en el resto del dominio, con patrones más finos en el WRF debido a su mayor resolución en la representación de efectos topográficos y dinámicos.

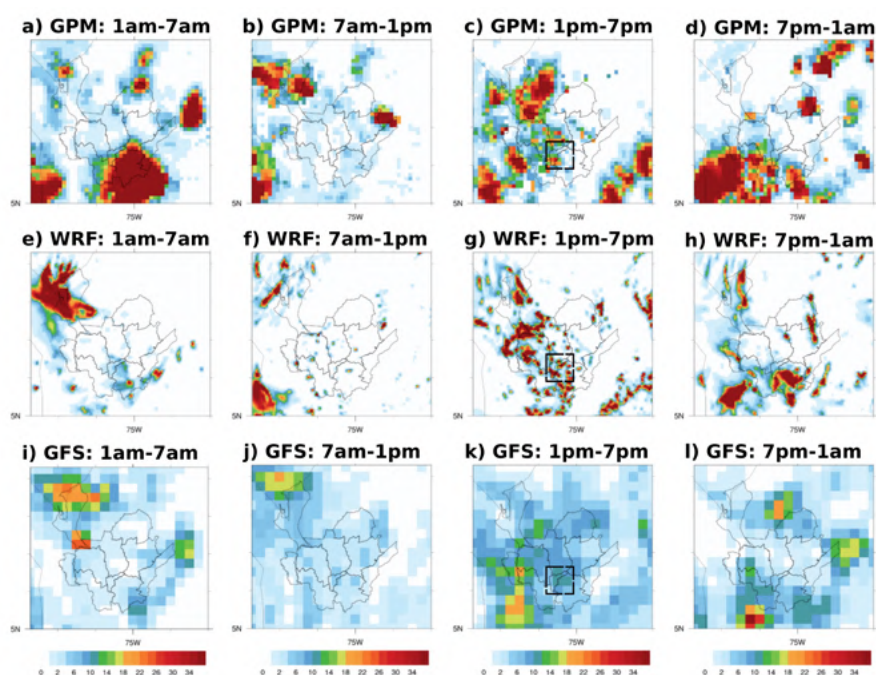


Figura 9. Precipitación acumulada en intervalos de 6 horas (mm/6hr) durante el 14 de enero de 2023 según: (a-d) GPM, (e-h) WRF, e (i-l) GFS

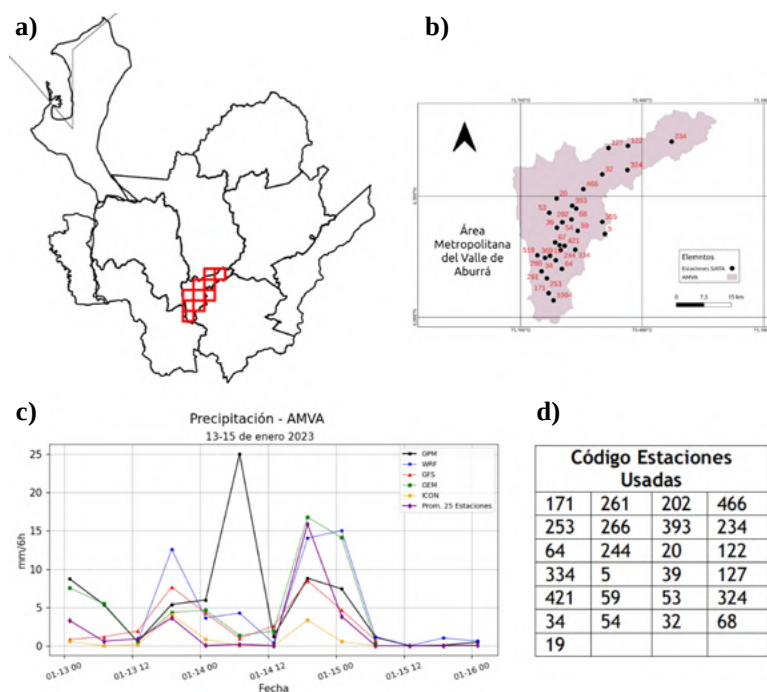


Figura 10. a) Ubicación de estaciones meteorológicas usadas para este evento. b) Zoom de la región de las estaciones y etiquetas para su identificación. c) Series de promedios en las estaciones, estimaciones satelitales de la GPM y pronósticos de modelos (WRF, GFS, GEM e ICON); el eje horizontal tiene formato “mm-dd-hh”. d) Identificación de las estaciones usadas según etiquetas en b)

Discusión y conclusiones

En este artículo se presentan algunos resultados de la evaluación del modelo WRF en simulaciones de tipo meteorológico para pronósticos de precipitación. El ejercicio incluyó una muestra relativamente grande de simulaciones de convección permitida, con la evaluación estadística de 625 de ellas, lo que corresponde a más de 120.000 horas centrales.

Las conclusiones más relevantes fueron las siguientes: el WRF tiende a sobreestimar la precipitación en las cordilleras y a subestimarla en las tierras bajas, pero describe un ciclo diurno y una distribución espacial de máximos de precipitación consistente con los campos de la GPM. Las correlaciones entre la precipitación diaria del WRF y el GFS con las estimaciones del GPM tienden a ser mayores en temporadas secas, alcanzando valores de 0,62 y 0,70, respectivamente, lo que podría relacionarse con una buena simulación de las estructuras de mayor escala y su mayor efecto en la variabilidad de la precipitación en estas temporadas. Tanto el WRF como el GFS tienden a sobreestimar los días con eventos de precipitación (Bias ~ 1,1), con una fracción de falsas alarmas cercana al 10 % y una probabilidad de detección de cerca del 96 %. Por último, el análisis de dos eventos especiales de precipitación sugirió que, teniendo en cuenta la hora operacional de disponibilidad de los pronósticos, se puede tener información relevante en el WRF o los modelos globales hasta con 12 horas de anticipación.

Comparado con la GPM, el WRF sobreestimó la precipitación en el terreno montañoso y la subestimó en las tierras bajas. Si bien la comparación con unas pocas estaciones meteorológicas sugiere que el WRF en efecto tiene un sesgo positivo en el terreno montañoso (Buriticá, 2023), la diferencia con respecto a la GPM también podría estar asociada con sus propios sesgos (Jaramillo *et al.*, 2017; Vallejo-Bernal *et al.*, 2021). El sesgo negativo en las zonas más bajas de la región de estudio podría estar asociado con la dificultad para representar los efectos de las estructuras dinámicas de mesoescala (por ejemplo, por el reducido tamaño del dominio) y con potenciales sobreestimaciones de la GPM.

Desde un punto de vista estadístico, pese a que la inicialización es más temprana en el WRF que en el GFS, el primero mostró estadísticos de correlación y desempeño similares a los del segundo, con el posible valor adicional de mostrar estructuras más finas asociadas con los efectos del terreno complejo en la meteorología de montaña, la representación de circulaciones de mesoescala (vientos de valle, brisas marinas), y la parte explícita de la convección simulada. El potencial de este valor agregado se ilustró con un ejemplo de radar (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>) y con dos eventos de precipitación particulares (**Figuras 7 y 9**). Estos resultados son similares a los encontrados en estudios ya clásicos como los de **Mass et al.** (2002). En este sentido, una mejor cuantificación del potencial valor agregado de las simulaciones de alta resolución requiere el uso de un número mayor de estaciones en superficie (promediando estaciones vecinas por asuntos de representatividad) con registros de segmentos menores al día para comparar extremos de precipitación que no siempre registran adecuadamente los satélites (**Dinku et al.**, 2010) o campos de radares meteorológicos, por ejemplo en busca de precipitaciones de montaña o de sistemas más someros, no detectadas por el GPM.

Nuestros resultados también sugieren otros aspectos que deben tenerse en cuenta en futuras simulaciones. En los experimentos más recientes se ha evidenciado que el *spectral nudging* en el dominio interno puede evitar la formación de estructuras organizadas (como los SCM) en el WRF, aunque parece ayudar con los efectos de estructuras sinópticas como las ondas tropicales. Este es un aspecto que debe estudiarse más sistemáticamente. Otro es el efecto del tamaño del dominio interno, ya que parte de las estructuras en el Pacífico y el valle del Magdalena sugeridas por la GPM podrían estar ausentes en el WRF por estar muy cerca a los bordes del dominio usado (**Gómez-Ríos et al.**, 2023). A estos dos aspectos (*nudging* y dominio) hay que sumar la continua experimentación con otras parametrizaciones, por ejemplo, de la PBL o la microfísica (**Ruiz et al.**, 2020; **Urrego et al.**, 2019).

Para juzgar mejor los resultados del ejercicio con el WRF, es necesario tener en cuenta que estas simulaciones experimentales no incluyen un protocolo de asimilación de datos ni de estadística de salida de modelo (*Model Output Statistics*, MOS), procedimientos esenciales para mejorar los pronósticos en un contexto operacional que tienen gran sofisticación en modelos globales como el GFS, el ICON y el GEM). En este sentido, teniendo en cuenta una ventana de pronóstico de 24 horas (luego de un *spin-up* de 12 horas), tanto la evaluación estadística del WRF como su valoración cualitativa a partir de eventos particulares sugieren que las simulaciones del tipo presentado en este reporte pueden ser una guía útil en la delimitación de regiones con posible actividad de precipitaciones a escala de subregión y departamento (es decir, en la escala meso- β , 20-200 km), y a escalas temporales (es decir, acumulados de precipitación) de 12 y 24 horas (asociadas con el ciclo diurno y con variaciones de día a día). Esta escala espacial se relaciona no sólo con la resolución efectiva de un modelo atmosférico (que para una cuadrícula de 4 km es de máximo 20 km), sino con las mayores estructuras atmosféricas afectadas por la morfología de la región de estudio (**Figura 1 b**).

Más allá de evaluaciones clásicas, el monitoreo cualitativo y continuo de las estructuras simuladas por el WRF en la región de estudio sugiere que las simulaciones de alta resolución pueden ofrecer más información que sus valores puntuales de precipitación (**Mass et al.**, 2022). Una mayor comprensión de las estructuras atmosféricas asociadas a nuestro complejo territorio (**Gómez-Ríos et al.**, 2023; **Camacho**, 2023) puede permitir un uso más efectivo de las simulaciones de alta resolución. Esto incluye la práctica clásica del ajuste de los pronósticos crudos de la precipitación basada en la interpretación física por parte de personal entrenado en meteorología y clima de montaña. Pero este conocimiento físico también puede emplearse para la construcción de procedimientos que integren técnicas MOS o de Inteligencia Artificial que ayuden a mejorar los pronósticos de modelos dinámicos como el WRF.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1965/3943>

Agradecimientos

El diseño e implementación experimental de las simulaciones con el WRF se hicieron en el marco del programa “Colombia Científica”, proyecto “Ecosistema Científico” (contrato No. FP44842-218-2018). Las simulaciones con el modelo WRF discutidas en este trabajo se realizaron en el servidor del Grupo GIMEL de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. La evaluación de los pronósticos de precipitación fue posible en el marco del proyecto Sistema de Alertas Tempranas de Antioquia (SAMA; <https://dagran.antioquia.gov.co/sama>), desarrollado por la Gobernación de Antioquia y la Universidad de Antioquia. Este proyecto es ejecutado por el grupo G-LIMA de la Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Agradecemos al IDEAM, el SAMA y el SIATA por facilitar la información de las estaciones meteorológicas usadas en este estudio.

Contribución de los autores

J.A.M. y P.A.: diseño y dirección de la investigación; J. A. M.: diseño y realización de simulaciones WRF; M.L.R.: procesamiento y análisis de datos de precipitación de modelos (WRF, GFS, ICON, GEM), satélite (GPM) y estaciones; L.F. y BR: evaluación de pronósticos puntuales mediante tablas de contingencia con respecto a estaciones reales y virtuales; S. G.C.: preprocesamiento de datos de los modelos GFS, ICON y GEM en diferentes frecuencias temporales para comparación con las estimaciones satelitales. Todos los autores contribuyeron en la escritura y edición del artículo.

Conflicto de intereses

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

Referencias

- Álvarez, A. M. & León, J. O. (2015). Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5(1), 135-145. <https://doi.org/10.18259/acs.2015021>
- Blu Radio. (10 de 01 de 2023). Blu Radio. <https://www.bluradio.com/blu360/antioquia/video-deslizamiento-en-betulia-antioquia-tiene-incomunicados-y-sin-acueducto-a-3-500-campesinos-rg10>
- Buritica Ruiz, L. F. (2023). Desempeño del modelo WRF en la simulación de precipitación en los municipios de Sonsón y Rionegro del oriente antioqueño. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/34374>
- Camacho, J.C. (2023). Sistemas convectivos de mesoescala sobre el norte de Colombia: una visión desde las simulaciones de convección permitida. Trabajo de Investigación de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
- Cano, L. M., Carmona, M. A., Martínez, J. A., Arias, P. A. (2022). Estimación y pronóstico de radiación solar en el valle de Aburrá-Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46 (179), 529-549. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1576>
- Carmona-Rivera, M. A. (2021). Evaluación del modelo atmosférico WRF en el pronóstico meteorológico de irradiancia solar en el Valle de Aburrá, Colombia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/20523>
- Colle, B. A., Westrick, K. J., Mass, C. F. (1999). Evaluation of MM5 and Eta-10 Precipitation Forecasts over the Pacific Northwest during the Cool Season. *Weather and Forecasting*, 14 (2), 137-154.
- Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S. J., Ceccato, P. (2010). Validation and intercomparison of satellite rainfall estimates over Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5), 1004-1014.

- Espinosa-Ospina, D.** (2022). Variaciones en el clima local asociadas a un cambio de cobertura: efectos de un embalse en el Trópico. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/28445>
- Espinosa-Ospina, D.** (2019). Estado de la atmósfera asociado al evento de precipitación extrema de mesoescala en Mocoa 2017: diagnóstico con análisis atmosféricos y experimentos con el modelo WRF. Trabajo Final Pregrado, Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
- Fernández-Gaviria, L. F.** (2021). Validación de pronósticos de temperatura, viento y radiación solar empleando el modelo atmosférico WRF. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18408>
- Gálvez, J. M. & Douglas, M. W.** (2006). Modulation of rainfall by Lake Titicaca using the WRF model. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE, p. 745-752.
- Guilloteau, C. & Foufoula-Georgiou, E.** (2020). Multiscale evaluation of satellite precipitation products: Effective resolution of IMERG. *Satellite Precipitation Measurement: Volume 2*, 533-558.
- Gomez-Ríos, S., Zuluaga, M. D., Hoyos, C. D.** (2023). Orographic Controls over Convection in an Inter-Andean Valley in Northern South America. *Monthly Weather Review*, 151 (1), 145-162.
- Hernández-Deckers, D.** (2022). Features of atmospheric deep convection in Northwestern South America obtained from infrared satellite data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(742), 338-350.
- Herzog, S. K. & Tiessen, H.** (2017). Climate change and biodiversity in the tropical Andes. https://museohn.unmsm.edu.pe/docs/pub_ictio/Josse%202011.pdf
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P., Stocker, E. F.** (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Jaramillo, L., Poveda, G., Mejía, J. F.** (2017). Mesoscale convective systems and other precipitation features over the tropical Americas and surrounding seas as seen by TRMM. *International Journal of Climatology*, 37, 380-397.
- Jiménez-García, M.** (2014). Validación de la capacidad del modelo WRF “Weather Research and Forecasting” para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D. B.** (2017). So, how much of the Earth’s surface is covered by rain gauges? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 69-78.
- Mapes, B. E., Warner, T. T., Xu, M., Negri, A. J.** (2003). Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part I: Observations and context. *Monthly Weather Review*, 131 (5), 799-812.
- Mass, C. F., Ovens, D., Westrick, K., Colle, B. A.** (2002). Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? The Results of Two Years of real-Time Numerical Weather Prediction over the Pacific Northwest. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83 (3), 407-430.
- Mejía, J. F., Yepes, J., Henao, J. J., Poveda, G., Zuluaga, M. D., Raymond, D. J., Fuchs-Stone, Ž.** (2021). Towards a mechanistic understanding of precipitation over the far eastern tropical Pacific and western Colombia, one of the rainiest spots on Earth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(5), e2020JD033415.
- Morales Salgado, J. S.** (2022). The Choco low-level jet under different sea surface temperature conditions: present and future climate. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/28276>
- Pielke Sr, R. A.** (2013). Mesoscale meteorological modeling. Academic press.
- Poveda, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., Mesa, O., Salazar, L., Arias, P., Moreno, H., Vieira, S., Agudelo, P., Toro, V., Álvarez, J.** (2005). El Ciclo Diurno de Precipitación en los Andes Tropicales de Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228-240. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/133/1/mwr-2853.1.xml>
- Ramírez B., V. H. & Jaramillo R., A.** (2012). Digital repository of the National Coffee Research Centre - CENICAFE: Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia. Repositorio digital del centro nacional de investigación de café - Biblioteca Alberto Machado Sierra, 60(2). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/228>

- Ruiz, J., Arango, C., Kilpinen, J.** (s.f.) IDEAM, Fondo Monetario Internacional (FMI). Verificación del modelo WFR que opera en el IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/VerificacionWRF.pdf>
- Ruiz, S. A. G., Barriga, J. E. C., Martínez, J. A.** (2022). Assessment and validation of wind power potential at convection-permitting resolution for the Caribbean region of Colombia. *Energy*, 244, 123127. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123127>
- Sakamoto, M. S., Ambrizzi, T., Poveda, G.** (2011). Moisture sources and life cycle of convective systems over western Colombia. *Advances in Meteorology*, Volume 2011 | Article ID 890759 | <https://doi.org/10.1155/2011/890759>
- Sierra, J. P., Arias, P. A., Vieira, S. C.** (2015). Precipitation over northern South America and its seasonal variability as simulated by the CMIP5 models. *Advances in Meteorology*, 2015, 1-22
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J.G., Duda, M.G., Barker, D.M., Huang, X. Y.** (2019). A description of the advanced research WRF version 4. NCAR tech. note ncar/tn-556+ str, 145.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).** (2021). Lo que usted debe saber sobre deslizamientos. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/32846>
- Urrego-Ortiz, J., Martínez, J. A., Arias, P. A., Jaramillo-Duque, Á.** (2019). Assessment and Day-Ahead Forecasting of Hourly Solar Radiation in Medellín, Colombia. *Energies*, 12(22), 4402. <https://doi.org/10.3390/en12224402>
- Vallejo-Bernal, S. M., Urrea, V., Bedoya-Soto, J. M., Posada, D., Olarte, A., Cárdenas-Posso, Y., Ruiz-Murcia, F., Martínez, M.T., Petersen, W.A., Huffman, G.J., Poveda, G.** (2021). Ground validation of TRMM 3B43 V7 precipitation estimates over Colombia. Part I: Monthly and seasonal timescales. *International Journal of Climatology*, 41(1), 601-624.
- Wang, Sc., Huang, Sx., Li, Yi.** (2006). Sensitive Numerical Simulation and Analysis of Rainstorm Using Nested WRF Model. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.* 18, 578-586. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(06\)60138-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60138-8)
- Warner, T. T.** (2010). Numerical weather and climate prediction. Cambridge University Press.
- Wilks, D. S.** (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences, vol. 100. International geophysics series.
- Zuluaga, M. D. & Houze, R. A.** (2015). Extreme convection of the near-equatorial Americas, Africa, and adjoining oceans as seen by TRMM. *Monthly Weather Review*, 143(1), 298-316.

Artículo original

Análisis del índice de claridad atmosférica diaria en la ciudad de Puno, 2014-2021

Analysis of the daily atmospheric clarity index in the city of Puno, 2014-2021

 Lelia Quispe-Huamán

Departamento Académico de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Juliaca, Puno, Perú

Resumen

El índice de claridad atmosférica es un parámetro óptico que resulta de la relación de la radiación solar global y la extraterrestre; dicha relación indica el estado atmosférico de una zona, las condiciones y características climáticas y su cambio en el transcurso del tiempo. El objetivo del presente estudio fue analizar el índice de claridad atmosférica en Puno desde enero del 2014 hasta diciembre del 2021, exceptuando el 2016 por ausencia de datos registrados. La radiación solar global se midió con el piranómetro Kipp & Zonen CMP11 del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - Zonal Puno en diferentes condiciones de cielo: muy soleado, soleado, parcialmente nublado y nublado. Según los resultados, el 39,138 % de los días fueron muy soleados, el 25,636 % soleados, el 34,873 % parcialmente nublados y el 0,313 % nublados, con variaciones en el índice de claridad atmosférica de 0,755-0,990, 0,645-0,754, 0,263-0,644 y 0-0,242, respectivamente, y un promedio de radiación solar global de 6,624 kWh/m². En conclusión, este índice de claridad atmosférica es óptimo para la observación astronómica, la aviación y la implementación de los sistemas fotovoltaicos orientados a mitigar la contaminación antropogénica en el medio ambiente de la ciudad y la región de Puno.

Palabras clave: Análisis; Condiciones de cielo; Índice de claridad atmosférico; Puno; Radiación solar global; Radiación solar extraterrestre.

Abstract

The atmospheric clarity index is an optical parameter resulting from the relationship between global solar radiation and extraterrestrial solar radiation; it indicates the atmospheric state of an area, its climatic conditions and characteristics, and their change over time. The objective of this study was to analyze the atmospheric clarity index in Puno from January 2014 to December 2021, except in 2016, as there is no recorded data. Global solar radiation was measured using the Kipp & Zonen CMP11 pyranometer of the National Service of Meteorology and Hydrology for the zone of Puno in different sky conditions: very sunny, sunny, partly cloudy, and cloudy. According to the results, 39.138% were very sunny days, 25.636% sunny days, 34.873% partially cloudy, and 0.313% cloudy, with atmospheric clarity index variations between 0.755-0.990, 0.645-0.754, 0.263-0.644 and 0-0.242, respectively, with an average global radiation of 6.624 kWh/m². This atmospheric clarity index is optimal for studies in astronomy, aviation, and the implementation of photovoltaic systems to mitigate anthropogenic pollution on the environment in the city and region of Puno.

Keywords: Analysis; Sky conditions; Atmospheric clarity index; Puno; Global solar radiation; Extraterrestrial solar radiation.

Citación: Quispe-Huamán L. Análisis del índice de claridad atmosférica diaria en la ciudad de Puno, 2014-2021. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):169-177, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2134>

Editor: Santiago Vargas Domínguez

Correspondencia:

Lelia Quispe-Huamán;
l.quispe@unaj.edu.pe

Recibido: 8 de octubre de 2023

Aceptado: 19 de diciembre de 2023

Publicado en línea: 19 de marzo de 2024



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

Introducción

El Sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente cuyo diámetro mide $1,39 \times 10^9$ m; está a una distancia promedio de $1,5 \times 10^{11}$ m de la Tierra y tiene una temperatura efectiva de 5.777 K (Montero-Martín *et al.*, 2020, Santos *et al.*, 2018). El índice de claridad es un parámetro de radiación adecuado para describir diferentes condiciones atmosféricas relacionadas con la transferencia de radiación en la atmósfera (Babatunde & Aro, 1995). La radiación solar es la principal fuente de energía para la tierra. El calentamiento de la superficie terrestre por acción de la radiación solar desencadena fenómenos meteorológicos como la evaporación, la formación de nubes y, en consecuencia, la lluvia (Da Silva *et al.*, 2014). En este sentido, el índice también es importante para evaluar la viabilidad a largo plazo de los proyectos de energía solar en una región (Danso *et al.*, 2020).

Por otra parte, los aerosoles producidos por la quema de biomasa se dispersan a gran distancia lo que, añadido a la presencia de nubes, reduce significativamente la radiación solar directa (Casagrande *et al.*, 2021) y atenúa su incidencia (Danso *et al.*, 2020). Por ello, la evaluación correcta de las condiciones de la nubosidad en cualquier lugar es importante para determinar la disponibilidad característica del recurso solar (Egeonu *et al.*, 2000). Dicha información también puede utilizarse en los estudios orientados al desarrollo de sistemas solares para uso térmico, como la calefacción de ambientes activos o pasivos o la conversión directa de la energía solar en electricidad (Fernando *et al.*, 2022).

Materiales y métodos

Área de estudio y datos utilizados

Puno, capital de la región de Puno, está situada al sur de Perú, en las riberas del lago Titicaca, a una altitud de 3.825 m s.n.m. (latitud: 15°49,58' y longitud: 70°00,73') (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2023). El clima es frío y seco, los veranos son lluviosos y nublados, y los inviernos despejados.

Para determinar el índice de claridad atmosférica se utilizaron los datos de la radiación solar global diaria medida con el piranómetro Kipp-Zonen de la estación meteorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - Zonal Puno entre el 1 de enero del 2014 y el 31 de diciembre del 2021. No se incluyó el 2016 porque no se encontraron datos registrados de radiación solar global para ese año.

Índice de claridad atmosférica

El índice de claridad atmosférica se define como la relación entre la radiación solar global medida a nivel del suelo y la radiación extraterrestre en la parte superior de la atmósfera (Rimasilana & Islami, 2022), calculada mediante la ecuación (1).

$$k_t = \frac{R_g}{R_e} \tag{1}$$

donde R_g es la radiación solar global diaria y R_e es la radiación solar global extraterrestre diaria.

Este parámetro, propuesto originalmente por Liu & Jordan (1960), mide la transparencia de la atmósfera; en él se apoyan la mayoría de los métodos para estimar la radiación sobre superficies inclinadas. Se han sugerido diferentes bandas de índice de claridad atmosférico (Yousif *et al.*, 2013) como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Escala del índice de claridad atmosférica

Clasificación de cielo	Índice de claridad atmosférica
Nublado	$0 < k_t \leq 0,2$
Parcialmente nublado	$0,2 < k_t \leq 0,6$
Soleado	$0,6 < k_t \leq 0,75$
Muy soleado	$0,75 < k_t < 1$

Fuente: Yousif *et al.* (2013)

Factores geométricos de la relación entre la Tierra y el Sol

Factor de corrección (E_0). El movimiento de traslación de la tierra consiste en su desplazamiento alrededor del sol siguiendo una elipse de baja excentricidad en la que el sol ocupa uno de los focos; dicha excentricidad lleva a que la distancia entre la tierra y el sol sea variable. El factor de corrección se calcula mediante la ecuación (2) para evaluar la relación entre r_0 y r en función del día del año d_n (Perpiñan, 2020).

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0,033 \cos \left[\frac{2\pi d_n}{365} \right] \quad (2)$$

Declinación angular (δ). La eclíptica es el plano de revolución de la Tierra alrededor del Sol (Iqbal, 1983); esta y el eje polar forman un ángulo constante de $23,45^\circ$. Además, el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que forman la Tierra y el Sol es variable a lo largo del año (Duffie & Beckman, 2013). El ángulo de la declinación solar se obtiene mediante la ecuación de Perrin de Brichambaut para el n -enésimo día del año (3):

$$\delta = 0,409 \cdot \sin \left[\frac{2\pi d_n}{365} - 1,39 \right] \quad (3)$$

Ángulo horario (ω). Este mide el movimiento del Sol con respecto al mediodía, que es el momento en que el Sol pasa al plano meridiano del lugar (cenit). Este ángulo de tiempo es negativo si el tiempo solar es inferior a las 12 p.m. El concepto se utiliza para describir la rotación de la Tierra, la cual equivale a $+15^\circ$ por hora durante la mañana y -15° por la tarde (Ben Othman *et al.*, 2018), como lo indicada la ecuación (4).

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (4)$$

Radiación solar extraterrestre (R_e). La radiación extraterrestre es la incidencia de la radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra (Maleki *et al.*, 2017). Cuando el sol está más cerca de la Tierra, el 3 de enero, el calor en el borde exterior de la atmósfera de la tierra es de aproximadamente 1.400 W/m^2 ; y cuando el sol está más alejado, el 4 de julio, es de aproximadamente 1.330 W/m^2 (Kalogirou, 2014), según se indicada en la ecuación (5).

$$R_e = \frac{24(60)}{\pi} E_0 I_{cs} (\omega \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega) \quad (5),$$

dónde la constante solar es $I_{cs} = 0,082 [\text{MJm}^{-2} \text{ día}^{-1}]$, ϕ es la latitud, δ el ángulo de declinación, ω el ángulo horario y E_0 el factor de corrección.

Resultados y discusión

El índice de claridad atmosférica se determinó para cada día desde enero del 2014 hasta diciembre del 2021, exceptuando el año 2016, ya que no se encontraron datos registrados de la radiación solar global.

La figura 1 ilustra el comportamiento de la radiación solar global diaria desde el 1 de enero del 2014 hasta el 31 de diciembre del 2021 según las mediciones con el piranómetro Kipp-Zonen. En los años 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 se obtuvieron variaciones de 2,997-10,838, 2,072-10,405, 2,395-10,896, 0,622-9,633, 3,044-9,070, 1,619-9,747, 2,124-9,240 kWh/m^2 , respectivamente. Asimismo, la radiación solar extraterrestre se estimó en función del día juliano, la latitud de la zona y los ángulos solares diarios. Los mayores valores se obtuvieron en primavera y los mínimos en invierno. El máximo valor obtenido fue de $11,428 \text{ kWh/m}^2$, para el día 27 de diciembre, y el mínimo fue de $7,263 \text{ kWh/m}^2$, para el 22 de junio, con un promedio de $9,694 \text{ kWh/m}^2$.

La radiación solar global se incrementó a partir de la primavera (septiembre), pero en verano alcanzó valores altos debido a la cercanía entre el Sol y la Tierra, la ubicación de Perú con respecto a la línea ecuatorial y la disminución de concentraciones de ozono en la atmósfera. Cabe señalar que la radiación solar global es responsable de los principales procesos naturales que ocurren en la superficie terrestre y que incluyen desde los bioquímicos, como la fotosíntesis, hasta los procesos físicos y los meteorológicos.

Se estableció, asimismo, la relación entre el índice de claridad atmosférica diaria, a partir de la radiación solar global estimada con el modelo de Bristow-Campbell y las medidas tomadas con el piranómetro Kipp-Zonen, que se asemejan por la similitud entre ambos parámetros, en los que las oscilaciones estacionales de radiación solar global se deben a los solsticios en el hemisferio sur del planeta, obteniéndose una correlación de Pearson de $R=0,872$ indicativa de un alto valor de confianza (87,2 %). Cabe mencionar que el modelo Bristow-Campbell fue desarrollado por **Quispe & Sotomayor (2022)**.

En la **figura 2** se ilustra el comportamiento del índice de claridad atmosférica diaria desde enero del 2014 hasta diciembre del 2021, exceptuando, como se dijo, el año 2016. Cabe señalar que comprender la relación de la radiación solar global incidente en el tope de la atmósfera y en la superficie terrestre es fundamental para la comprensión de los fenómenos agronómicos y meteorológicos.

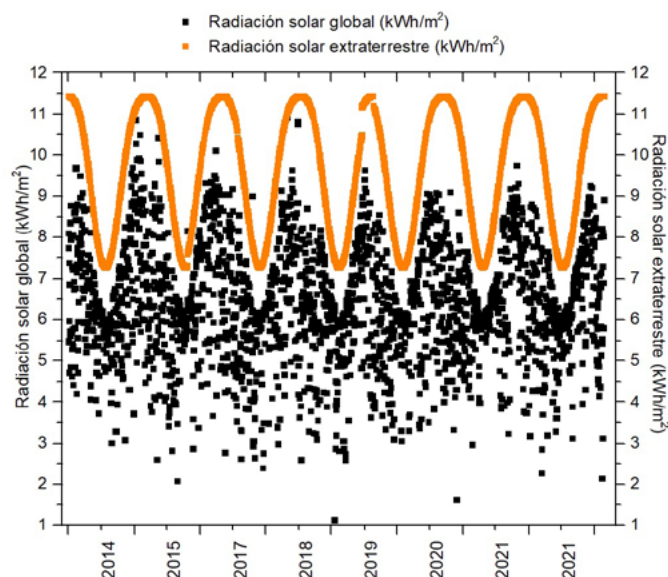


Figura 1. Radiación solar global y extraterrestre diaria registrada desde el 2014 hasta el 2021

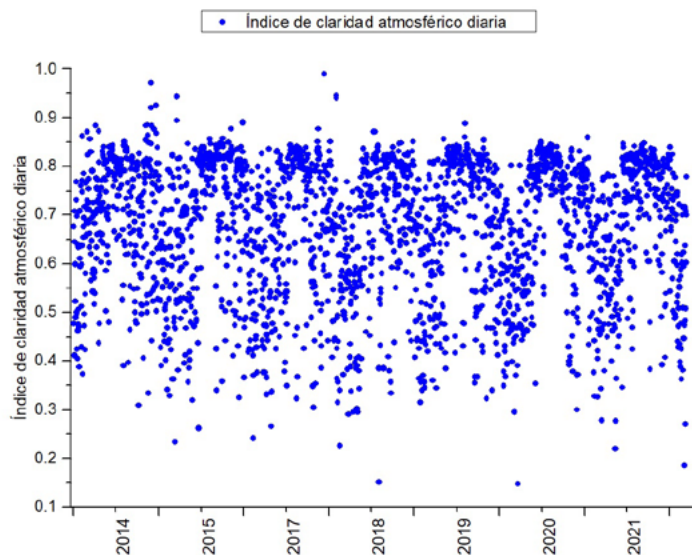


Figura 2. Índice de claridad atmosférica diario desde el 2014 hasta el 2021

El índice de claridad atmosférica diaria varió entre 0,310-0,972, 0,234-0,944, 0,226-0,990, 0,081-0,872, 0,324-0,889, 0,148-0,860, 0,186-0,849 en los años 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021, respectivamente, a partir de la escala de la **tabla 1** (Yousif *et al.*, 2013).

En la **figura 3** se ilustra el comportamiento del índice de claridad atmosférica y de la radiación solar global diaria durante el 2021. Como se observa, se comportan de forma opuesta, ya que cuando los valores de la radiación solar global son bajos, el índice de claridad es alta durante los meses de mayo, junio, julio y agosto, pues estos se caracterizan por la presencia de heladas debido a que la ausencia de nubes ocasiona que el calor se pierda hacia el espacio, provocando la disminución rápida de la temperatura hasta los 0 °C o menos. Asimismo, se presenta la temporada de sequía, con cielos muy despejados, disminución del recurso hídrico e incendios forestales en la zona altiplánica de la región de Puno.

El índice de claridad atmosférica y la radiación solar global se comportan de forma dispersa en el resto de los meses, ya que son lluviosos, con una alta porción de componentes difusos como la presencia de nubes, que nos abrigan manteniendo el calor y vapor de agua los cuales favorecen el crecimiento y producción de productos agrícolas tales como la papa, la quinua, y las habas, entre otros.

Además estudios realizados por **Quispe** (2023) para el año 2021 obtuvo resultados del porcentaje de condiciones de cielo del 36,164 %, 27,945 %, 35,342 % y 0,548 % para días muy soleados, soleados, parcialmente nublados y nublados respectivamente. También es relevante mencionar que en el mes de julio se registró el 84 % de días fue muy soleado, es decir sin presencia de nubes, por lo tanto, el índice de claridad atmosférico en la ciudad de Puno varía según la época del año.

Según **Okogbue et al.** (2008), por ejemplo, las condiciones del cielo fueron predominantemente nubosas y los cielos estuvieron nublados aproximadamente el 88 % del tiempo durante todo el año en la estación de Ile-Ife, Nigeria, debido a la dispersión molecular del haz de radiación por los aerosoles y las nubes que mantuvieron el cielo turbio y nublado la mayor parte del tiempo.

En la **tabla 2** se muestran los intervalos de variación del índice de claridad atmosférica en diferentes condiciones de cielo: muy soleado, soleado, parcialmente nublado y nublado, desde enero del 2014 hasta diciembre del 2021. En los días muy soleados se obtuvo un

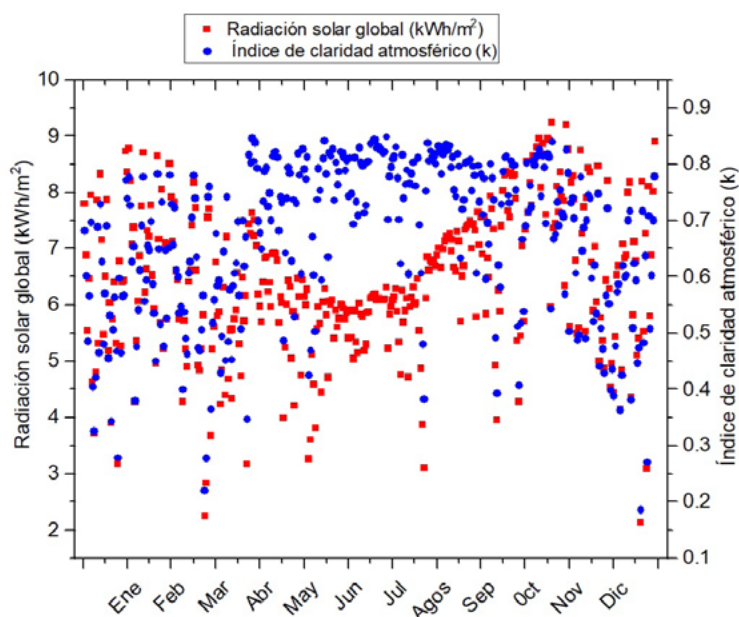


Figura 3. Índice de claridad atmosférica y radiación solar global diaria durante 2021

valor máximo de 0,990 y uno mínimo de 0,745; en los días soleados un máximo de 0,754 y un mínimo de 0,645; en los días parcialmente nublados un máximo de 0,644 y un mínimo de 0,263, y en los días nublados un máximo de 0,242 y un mínimo de 0,081.

La **figura 4** ilustra el porcentaje de condiciones del cielo en la ciudad de Puno desde el 2014 hasta el 2021. Los días muy soleados representaron entre el 37,3 y el 42,1 %; los soleados, entre el 20,3 y el 28,5 %; los parcialmente nublados entre el 31,5 y el 38,6 %, y los nublados entre el 0 y el 0,5 %. Estos resultados son de gran importancia para futuros estudios en proyectos de sistemas solares de aprovechamiento térmico o conversión directa de la radiación solar en electricidad.

En la **tabla 3** se registra un valor promedio máximo de índice de claridad de 0,695 en el 2014 y un valor promedio mínimo de 0,657 en el 2018. También se obtuvo un valor máximo de radiación solar global de 6,670 kWh/m² en el 2014 y uno mínimo de 6,214 kWh/m² en el 2018.

En la **figura 5** se muestra el porcentaje de los promedios de las condiciones del cielo en la ciudad de Puno desde el 1 enero del 2014 hasta el 31 de diciembre del 2021.

El porcentaje de días nublados se expresó como $0 < k_t \leq 0,2$ (presencia de nubes durante el día); el de días parcialmente nublados como $0,2 < k_t \leq 0,6$ (sol con presencia de nubes durante el día); el de días soleados como $0,6 < k_t \leq 0,75$ (sol con pocas nubes), y el de muy soleados como $0,75 < k_t < 1$ (sol sin nubes) (Yousif *et al.*, 2013).

Tabla 2. Variación anual del índice de claridad atmosférica

Año	Intervalos de condiciones de cielo			
	Nublado	Parcialmente nublado	Soleado	Muy soleado
2014	-	0,310-0,643	0,645-0,754	0,755-0,972
2015	0-0,234	0,263-0,644	0,645-0,751	0,755-0,944
2017	0-0,242	0,267-0,644	0,645-0,752	0,755-0,990
2018	0-0,152	0,291-0,644	0,646-0,754	0,755-0,872
2019	-	0,324-0,642	0,652-0,743	0,745-0,889
2020	0-0,148	0,296-0,644	0,645-0,754	0,755-0,860
2021	0-0,220	0,271-0,643	0,645-0,754	0,755-0,849

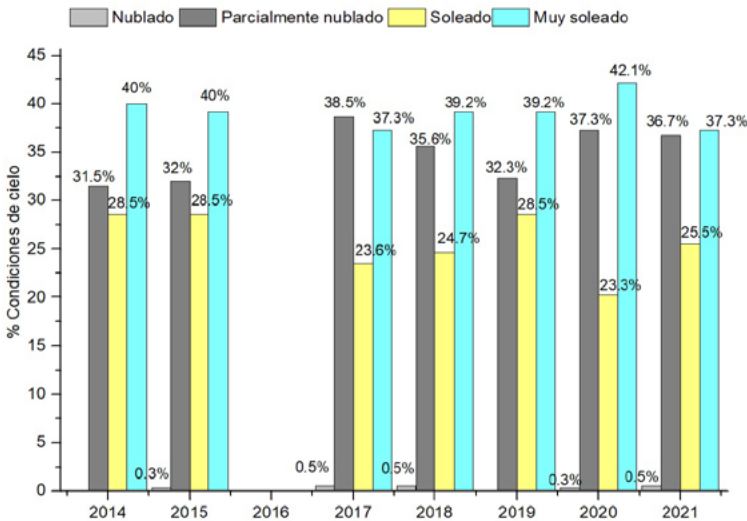


Figura 4. Porcentaje del índice de claridad atmosférica anual desde el 2014 hasta el 2021

Tabla 3. Promedios anuales de índice de claridad atmosférica y radiación solar global

Mes	Índice de claridad atmosférica promedio	Radiación solar global promedio en kWh/m²
2014	0,695	6,670
2015	0,680	6,596
2017	0,659	6,287
2018	0,657	6,214
2019	0,676	6,338
2020	0,678	6,466
2021	0,670	6,395
Promedio	0,674	6,424

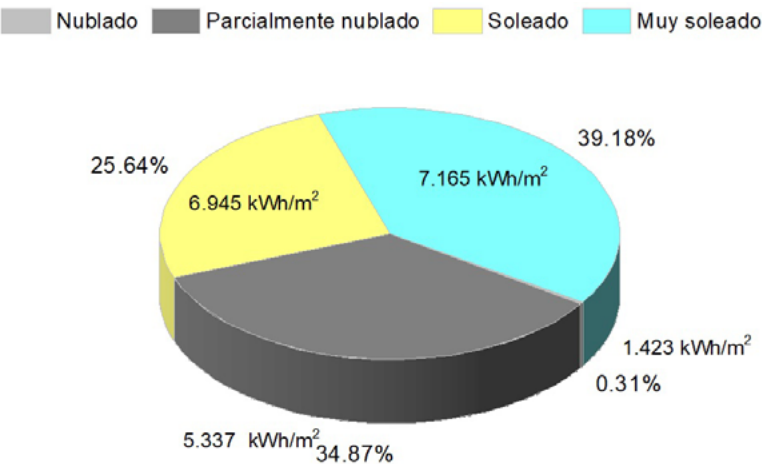


Figura 5. Porcentaje de las condiciones del cielo y la radiación solar global durante el periodo 2014-2021

En este sentido, en estudios realizados por **Fernando et al.** (2022) durante un año en la ciudad de Maputo, Mozambique, se observaron más días con condiciones de cielo despejado, 120 días en promedio, en tanto que las condiciones de cielo nublado fueron las de menor frecuencia, con un promedio de 48 días. La frecuencia de las condiciones de cielo parcialmente nublado y parcialmente despejado fue de 85 y 112 días, respectivamente.

Según estudios realizados por **Forero et al.** (2008) y **Rodríguez et al.** (2015) a partir de datos de radiación solar global obtenidos en la Universidad Distrital, el valor medio mensual de índice de claridad atmosférica en Bogotá fue de 0,358 en el estudio del primero y de 0,330 en el del segundo, en tanto que el promedio anual fue de 0,674 en Puno (**Tabla 3**).

Por su parte, **Egeonu et al.** (2000) encontraron en su estudio que el índice de claridad atmosférica mínimo fue de 0,055 en la ciudad de Nsukka (entre 0,055 y 0,610), por encima del valor generalmente aceptado de 0,05 en condiciones de cielo nublado. Asimismo, **Njoku et al.** (2022) encontraron en el noroeste de Nigeria que el índice de claridad promedio mensual oscilaba entre 0,420 y 0,690, es decir, prevalecía la condición de cielo nublado, y observaron que agosto era el mes de peor aprovechamiento de la radiación solar en la zona. En Uganda, **Muhamad & Ndubuisi** (2020) observaron que el índice de claridad variaba en las diferentes regiones: en la región norte era de 0,5288 a 0,6077; en la región oriental de 0,5609 a 0,6077; en la región central de 0,5123 a 0,6224, y en la región

occidental de 0,5123 a 0,5893. En Puno, en cambio, osciló entre 0,081 y 0,990, con mayor concentración de nubosidad y presencia de lluvias en verano, en tanto que los días de cielo despejado prevalecieron en los días fríos y secos del invierno.

Conclusiones

El índice de claridad atmosférica varió durante los años de estudio: los días nublados se dieron en el intervalo entre 0 y 0,242; los parcialmente nublados entre 0,263 y 0,644; los soleados entre 0,645 y 0,754, y los muy soleados entre 0,755 y 0,990, según la escala de la **tabla 1**. De los 2.555 días analizados, 1.001 días (39,18 %) fueron muy soleados; 655 días (25,64 %) fueron soleados; 891 días (34,87 %) fueron parcialmente nublados, y ocho días (0,31 %) fueron nublados, con un potencial solar de 7,165, 6,945, 5,337 y 1,423 kWh/m², respectivamente (**Figura 5**), lo que confirma la gran cantidad de días despejados característica del clima del área de estudio.

Estos resultados son de gran importancia, ya que el índice de claridad atmosférica es un parámetro valioso para diseñar sistemas de fuentes de energías renovables y sistemas solares para la conversión directa de la radiación solar en electricidad, el uso térmico de calefacción pasiva o activa de ambientes, la aviación, y la física atmosférica, entre otros orientados al desarrollo de proyectos ambientales, energéticos, agrícolas y económicos en la región de Puno. Además, la radiación solar, debe aprovecharse en el área rural para generar energía destinada al bombeo de agua de riego y otros servicios en predios familiares (Montero, 2022).

Agradecimientos

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - Zonal Puno por los datos cedidos para la realización de este trabajo.

Conflicto de intereses

La autora declara no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Babatunde, E. B., Aro, T. O. (1995). Relationship between “clearness index” and “cloudiness index” at a tropical station (Ilorin, Nigeria). *Renewable Energy*, 6(7), 801-805. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)00087-M](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)00087-M)
- Ben Othman, A., Belkilani, K., Besbes, M. (2018). Global solar radiation on tilted surfaces in Tunisia: Measurement, estimation and gained energy assessments. *Energy Reports*, 4, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2017.10.003>
- Casagrande, M. S. G., Martins, F. R., Rosário, N. E., Lima, F. J. L., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Zarzur, M., Pes, M. P., & Pereira, E. B. (2021). Numerical assessment of downward incoming solar irradiance in smoke influenced regions—a case study in Brazilian Amazon and cerrado. *Remote Sensing*, 13(22), 1-30. <https://doi.org/10.3390/rs13224527>
- Da Silva Martins, P. A., Santos Querino, C. A., Marques Pavão, V., Albuquerque da Silva Querino, J. K., Gomes Machado, N., Sacardi Biudes, M. (2014). Verificação da turbidez atmosférica em Humaitá-Am. *Revista EDUCamazônia*, XII, 86-98.
- Danso, D. K., Anquetin, S., Diedhiou, A., & Adamou, R. (2020). Cloudiness information services for solar energy management in West Africa. *Atmosphere*, 11(8), 1-18. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11080857>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons Inc.
- Egeonu, D. I., Njoku, H. O., Enibe, S. O. (2000). Sky conditions at Nsukka as characterized by clearness index. *Solar Energy*, 69(1), 45-53. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00008-6)
- Fernando, D. M. Z., Calça, M. V. C., Noris, F. J., Raniero, M. R., Dal Pai, A. (2022). Classification of Sky Cover by the Clearness Index (Kt) in Maputo - Mozambique. *Research, Society and Development*, 11(6), e20611628887. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.28887>
- Forero, N. L., Mesa, W., Martínez, M. A., Caicedo, L. M., Gordillo, G. (2008). Estimación del valor medio mensual del índice de claridad atmosférico (K). *Revista Colombiana De Física*, 40(1), 167-169.

- Iqbal, M.** (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press.
- Kalogirou, S. A.** (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. Academic Press. <http://store.elsevier.com/>
- Liu, B. Y. H., & Jordan, R. C.** (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3), 1-19. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1)
- Maleki, S. A. M., Hizam, H., & Gomes, C.** (2017). Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Models re-visited. *Energies*, 10(1), 1-28. <https://doi.org/10.3390/en10010134>
- Montero-Martín, J., Antón, M., Vaquero-Martínez, J., Sánchez-Lorenzo, A.** (2020). Comparison of long-term solar radiation trends from CM SAF satellite products with ground-based data at the Iberian Peninsula for the period 1985-2015. *Atmospheric Research*, 236, 104839 <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104839>
- Montero-Torres, J.** (2022). Relación de la radiación solar con la producción de plantas agroproductivas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 9, 1-15.
- Muhamad, M. & Ndubuisi, S.** (2020). Algorithmized Modelling, Simulation and Validation of Clearness Index in Four Regions of Uganda. *Journal of Solar Energy Research*, 5(2), 432-452.
- Njoku, M. C., Isong, I. F., Njoku, A. N., Kennet, E. A., Neebani, T.** (2022). Solar Radiation Evaluation in North-East Geo-Political Zone of Nigeria. *Iconic Research and Engineering Journals*, 5, 140-151.
- Okogbue, E. C., Adedokun, J. A., Holmgren, B.** (2008). The impact of the positive Indian Ocean dipole on Zimbabwe droughts Tropical climate is understood to be dominated by. *International Journal of Climatology*, 2029, 2011-2029. <https://doi.org/10.1002/joc>
- Perpiñan Lamigueiro, O.** (2020). *Energía Solar Fotovoltaica*. <http://oscarperpinan.github.io/esf/>.
- Quispe-Huamán, L., Sotomayor-Alzamora, G.** (2022). Determinación y análisis temporal de la radiación solar global en el Altiplano de Puno. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 30(1), 69-81. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052022000100069>
- Quispe Huamán, L.** (2023). Índice de claridad atmosférico diaria en la ciudad de Puno. *Revista del Altiplano de Ciencias Básicas y Aplicadas*, 1(1), 75-84.
- Rimasilana, D. & Islami, M. I.** (2022). Seasonal Characteristic of Sky Conditions based on Clearness Index on Aceh Besar. *Buletin GAW Bariri*, 3(2), 32-40. <https://doi.org/10.31172/bgb.v3i2.76>
- Rodríguez-Patarroyo, D. J., Hernández, J., Simbaqueva, O.** (2015). Análisis estadístico del índice de claridad atmosférica para la ciudad de Bogotá. *Revista Científica*, 1(21), 65. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.rc.2015.21.a6>
- Santos, J. J. C. S., Palacio, J. C. E., Reyes, A. M. M., Carvalho, M., Freire, A. J. R., Barone, M. A.** (2018). Concentrating Solar Power. In *Advances in Renewable Energies and Power Technologies* (Vol. 1, pp. 373–402). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00012-5>
- Yousif, C., Quecedo, G. O., Santos, J. B.** (2013). Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain. *Renewable Energy*, 49, 203-206. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.031>

Ciencias de la Tierra

Artículo de revisión

Prehistoria del Observatorio Astronómico Nacional. Registros meteorológicos y astronómicos de José Celestino Mutis y Francisco José de Caldas entre 1772 y 1802

Prehistory of the National Astronomical Observatory. Meteorological and astronomical records of José Celestino Mutis and Francisco José de Caldas between 1772 and 1802

 Alberto Gómez-Gutiérrez

Instituto de Genética Humana, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

El primer observatorio astronómico americano que aún se conserva fue construido entre 1802 y 1803. El presente artículo refiere los momentos preliminares de su establecimiento entre 1760 y 1802 a partir de evidencias documentales primarias en torno a tres protagonistas principales de su historia: José Celestino Mutis, Francisco José de Caldas y Alexander von Humboldt.

Palabras clave: Astronomía; Meteorología; Siglo XVIII; Nuevo Reino de Granada.

Abstract

The first American astronomical observatory still extant was built between 1802 and 1803. This article refers to the preliminary moments of its establishment between 1760 and 1802 based on primary documentary evidence involving three main protagonists: José Celestino Mutis, Francisco José de Caldas, and Alexander von Humboldt.

Keywords: Astronomy; Meteorology; 18th Century; New Kingdom of Granada.

Introducción

En el 2023 se celebraron los 220 años del establecimiento del primer observatorio astronómico neogranadino, el cual pasó luego a ser nacional (Gómez, 2024). El edificio que lo alberga se construyó con fondos aportados por José Celestino Mutis entre 1802 y 1803. El presente artículo se centra en los momentos preliminares de su establecimiento formal, entre 1760, fecha de la llegada de Mutis a este territorio, y 1802, cuando se inició la obra arquitectónica, así como en tres de los protagonistas de su historia. El primer momento remite a los registros meteorológicos y astronómicos de José Celestino Mutis antes de 1802; el segundo, a los registros meteorológicos y astronómicos de Francisco José de Caldas entre 1796 y 1805, ya que sólo a finales de este año se integró al Observatorio, y el tercero, a la incidencia de Alexander von Humboldt en 1801 y 1802, años en tuvo un intercambio personal con Mutis y Caldas en torno a la iniciativa de construir el que llegó a ser el primer observatorio astronómico del continente americano.

José Celestino Mutis en el periodo de 1760 a 1802

La década inmediatamente anterior a la aprobación e implementación de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada en 1783, es tal vez el periodo neogranadino en la vida y obra de José Celestino Mutis que menos atención ha recibido hasta la fecha. Decenas de autores se han concentrado en las realizaciones del gaditano en el curso de esta

Citación: Gómez-Gutiérrez A.
Prehistoria del Observatorio
Astronómico Nacional. Registros
meteorológicos y astronómicos de
José Celestino Mutis y Francisco
José de Caldas entre 1772 y 1802.
Revista de la Academia Colombiana de
Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
48(186):178-194, enero-marzo de
2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2524>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**
Alberto Gómez-Gutiérrez;
alberto.gomez.gutierrez@gmail.com

Recibido: 26 de diciembre de 2023

Aceptado: 27 de febrero de 2024

Publicado en línea: 14 de marzo de 2024



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

expedición, y varios en España y Colombia han tratado sobre su formación y desarrollo peninsular entre 1732, año de su nacimiento en Cádiz, y 1760, cuando Pedro Messía de la Cerda lo vinculó en Madrid como su médico de cabecera al hacerse cargo del virreinato que le había sido asignado.

Previamente habíamos indagado sobre los pormenores de la vida y obra de Mutis en la década del 60 al 70 del siglo XVIII en varias obras: *A impulsos de una rara resolución: el viaje de José Celestino Mutis al Nuevo Reino de Granada 1760-1763* (Bernal & Gómez, 2010); *La extrema sutileza de don Jayme Navarro: fuentes para la historia de la vida y obra del compañero de viaje de José Celestino Mutis en el Nuevo Reino de Granada, 1760-1775* (Gómez & Bernal, 2022); la trilogía de *Medicina Científica Mutisiana* (Bernal & Gómez, 2008), *Filosofía Natural Mutisiana* (Ortiz et al., 2009) y *Academia Mutisiana* (Gómez et al., 2011), además del libro *Aproximación a la bibliografía mutisiana* (Gómez, 2022) que contiene más de 1.300 referencias sobre su vida y obra.

Sentadas las bases y las fuentes que permiten comprender la primera década de su residencia en el territorio neogranadino, puede abordarse la segunda década, de 1772 a 1782, cuando hubo en Mutis una transformación crucial que lo llevó a ocuparse de tres dimensiones complementarias, relativamente novedosas: de médico, botánico, matemático y minero, quiso pasar a ser sacerdote, zoólogo y meteorólogo. En conjunto, por lo menos siete personalidades en una, además de la que se podría postular como su octava dimensión, aquella por la que ha sobresalido en la historia del arte y la ciencia y por la que más se le recuerda hoy: la ilustración botánica. Debe destacarse, en consecuencia, la relación interdisciplinaria de saberes, técnicas y abordajes metodológicos que se fue estableciendo en la práctica científica de Mutis a lo largo de dos décadas en España y la Nueva Granada. Para 1770, Mutis disponía ya de una evidente capacidad de observación, registro e interpretación de fenómenos astronómicos y meteorológicos, que buscó aplicar en el territorio tropical neogranadino.

En su libro *La astronomía en Colombia*, Jorge Arias de Greiff se refiere a los trabajos astronómicos de Mutis en los períodos previos a la construcción del Observatorio, en lo que sería una novena dimensión de su actividad. Antes de referirse a la labor de Mutis, Arias de Greiff incluyó una serie de capítulos sobre los trabajos astronómicos previos en este territorio: primero, uno sobre la “Astronomía precolombina”, a la que ya se había aproximado en detalle en su obra *Etnoastronomías americanas*, escrita con Elizabeth Reichel (Arias & Reichel, 1978); segundo, uno sobre los principios astronómicos de la navegación y la cartografía europeas, y tercero, los casos específicos del Padre Feuillée, de Juan de Herrera, de Antonio de Ulloa y Jorge Juan, de Pierre Bouguer, de la Expedición de límites de Iturriaga, Alvarado y Solano, de las expediciones hidrográficas de la Armada Real y, en particular, de la que llamó Expedición de Fidalgo (Arias, 1993).¹

En cuanto a Mutis, su nombre aparece asociado, naturalmente, a la Expedición Botánica. Después de describir el origen de esta expedición, Jorge anotó, con una entrada muy característica de su juicio siempre iconoclasta, que, a pesar de haber sido nombrado el 1 de noviembre de 1783 como “primer Botánico y Astrónomo de la expresada expedición por la América Septentrional”, en realidad, “Mutis no era astrónomo”. Y precisa que habría de esperar 20 años, hasta el inicio formal de este programa financiado por la Corona española, para “cumplir cabalmente con el objetivo astronómico” (Arias, 1993). Una vez descrita la importancia de los trabajos botánicos de la expedición, Mutis planteó este objetivo en la representación hecha a Carlos III desde Santafé en junio 26 de 1764 en los siguientes términos:

Aún no se limitan a esta serie de trabajos [botánicos] mis pensamientos. A cada paso se me iría proporcionando la oportunidad de ejecutar muchas importantes observaciones que podrían merecer algún lugar en la relación histórica de mi viaje bajo sus correspondientes títulos de medicina, geografía, astronomía y algunos otros ramos de las ciencias matemáticas. Un seguido catálogo de observaciones meteorológicas y de las elevaciones del suelo por donde transita el viajero, de que resultan no pocas luces y conocimientos de las ciencias, no debería faltar en una historia natural. (Mutis citado en Hernández de Alba, 1968).

Diversos autores han estudiado la formación en astronomía adquirida por Mutis a mediados del siglo XVIII en Cádiz (**Arboleda**, 1986; **Quevedo**, 1985; **González de Posada**, 2009; **Molina**, 2020). Uno de ellos argumenta que el gaditano accedió a una formación newtoniana y astronómica básica como consecuencia de su participación libre en las sesiones de la “Asamblea amistosa literaria” establecida por Jorge Juan en 1755 (**Molina**, 2020). Por su parte, Federico González de Posada presenta una ordenada síntesis de las labores físicas y matemáticas de Mutis desde 1760 hasta 1808, las cuales lo condujeron a

unos haceres [...] harto significativos, realizados a lo largo de su vida americana, desde la llegada a Bogotá en 1761 hasta su muerte en 1808: desempeño de la cátedra de Matemáticas, adscripción total a la Filosofía de la Naturaleza de Newton comprometiéndose en su difusión y defensa, la consideración de la Matemática y de la Física como fundamentos de toda instrucción superior, su real comportamiento en su afición naturalista como físico experimental en meteorología, astrónomo y fundador-director de un Observatorio astronómico. (**González de Posada**, 2009).

La aprobación Real del proyecto sometido incluyó el mandato de que por cuenta de la Corona se compraran en Inglaterra y se le enviaran a Santafé los libros e instrumentos que había pedido. Los instrumentos relacionados con la astronomía y la meteorología fueron reportados en 1911 por el historiador español Federico Gredilla, director en ese entonces del Real Jardín Botánico de Madrid:

Seis docenas de tubos de vidrio, de 34 a 36 pulgadas de largo y de 1 a 3 líneas de diámetro; dos termómetros bien acondicionados; cuatro agujas magnéticas bien finas, un cuarto de círculo, con su micrómetro, para observar latitudes; dos lunetas acromáticas para observaciones astronómicas, un reloj de péndula, dos relojes de faldriquera, con minutos y segundos; un grafómetro con lunetas y aguja. (**Gredilla**, 1911).

Más adelante se registró la enumeración de los instrumentos remitidos a Mutis por orden del Rey pagados con fondos del Real erario: “dos lunetas acromáticas de Dollond, con ejes polares, micrómetros filares y oculares celestes; dos teodolitos; un péndulo de compensación, con varillas de zinc y acero”. Con base en una nota publicada por el obispo de Ibarra (**González-Suárez**, 1905), Gredilla precisó que la Corona tuvo que adquirir dos veces estos instrumentos, por cuanto la primera compra en Londres naufragó “en 1785 en la costa de Huelva, y fue necesario adquirirlos de nuevo”. Arias de Greiff señala que los trabajos de astronomía y meteorología de Mutis previos a la construcción del Observatorio fueron “inicialmente escasos: una determinación de la latitud de Santafé, una observación del eclipse de un satélite de Júpiter [...], lo que le permitió calcular la longitud. Se sabe del interés de Mutis por el tránsito de Venus delante del disco solar en 1769, de sus extensas observaciones diurnas [y nocturnas] del barómetro” (**Arias**, 1993), publicadas y comentadas por Caldas en el *Semanario del Nuevo Reyno de Granada* en el mes de febrero de 1808, tres meses antes del fallecimiento del gaditano.

La referencia de Caldas a la barometría mutisiana en el segundo número de su *Semanario*, quedó registrada en las Notas y la explicación de la Tabla antecedente, que correspondía a sus propias *Observaciones meteorológicas para el mes de enero de 1808* [...]:

En la columna octava hemos puesto los puntos lunares del mes por que la Luna tiene un influjo directo sobre las variaciones diarias del barómetro. Este bello descubrimiento se debe a la sagacidad y a la constancia del célebre Mutis. Este sabio infatigable ha llevado una serie de observaciones barométricas por el dilatado espacio de 46 años consecutivos, y ha sido recompensado con las verdades importantes que ha descubierto, y con los hechos que ha comprobado de diferentes modos. Si a Godin se debe el primer conocimiento sobre la variación diurna y periódica del barómetro, a Mutis debemos la nocturna. (**Caldas**, 1808).

En este mismo número, Caldas comentó las “bellas ideas sobre las mareas atmosféricas” que el gaditano había expuesto someramente, por escrito, en el *Papel Periódico de Santa Fé de Bogotá* el viernes 7 de febrero de 1794, en los siguientes términos:

Las mareas atmosféricas, de que hemos hecho un estudio particular en estas regiones con la esperanza de poderlas tal vez demostrar algún día por las observaciones del barómetro, y en la persuasión de que este instrumento no puede regir fuera de los trópicos para denotar sus esenciales variaciones periódicas, merecen toda la atención de los médicos aplicados a instruirse en la ciencia meteorológica (Mutis, 1794).²

Por último, Arias de Greiff resaltó la participación de Mutis en polémicas religiosas e ideológicas, a las que fue llevado por la enseñanza del modelo formal heliocéntrico de Copérnico, ya enseñado por los jesuitas en función de lo que Jorge calificó, para esos años, de “ciencia nueva”. La ciencia de los jesuitas en esos días fue ya expuesta en la obra de 2008 que titulamos *Scientia Xaveriana*. Al finalizar su exposición sobre la ciencia copernicana, Jorge pasa al capítulo de Caldas. Antes de hacer lo mismo, veamos algo más de la astronomía y meteorología mutisianas en los últimos 30 años del siglo XVIII.

Para iniciar el comentario de estas tres décadas, hay que decir que no es fácil saber lo que ocurría en el día a día entre 1770 —fecha del regreso de Mutis a Santafé proveniente de las minas de la Montuosa, cuyo laboreo colonial fue revisado por Pérez (2014)—, y 1772, el año de su ordenación sacerdotal. Los epistolarios publicados por Guillermo Hernández de Alba contienen muy pocas referencias a este periodo. Tampoco es fácil saber qué sucedía cotidianamente entre 1772 y 1777, puesto que este mismo historiador sólo publicó en sus *Diarios de observaciones* las páginas correspondientes al diario de Mutis entre 1777 y 1782 (Hernández de Alba, 1957).

Estas páginas han sido generalmente desatendidas, y prácticamente todas las relaciones históricas asociadas a Mutis se han concentrado en los años de la Real Expedición Botánica a partir de 1783, con la notable excepción de dos trabajos historiográficos sobre la zoología mutisiana, uno español (Blanco, 2008) y uno colombiano (Amat & Agudelo, 2020), y un muy completo estudio de José Antonio Amaya sobre los vínculos de Mutis con los naturalistas suecos (Amaya, 2005) a partir de los años 60 del siglo XVIII. En este, por ejemplo, se registraron rigurosamente todos y cada uno de los especímenes biológicos descritos u observados por Mutis entre 1761 y 1808, y se reportan 72 descripciones y 21 observaciones botánicas asociadas al periodo de residencia en el Sapo, entre enero de 1777 y el año de 1782, complementadas por una sección que contiene un total de 33 aves remitidas a Suecia (Amaya, 1999).

La década de los 70 del siglo XVIII estuvo signada por el sacerdocio y la zoología, pero también por la meteorología, ciencia en la cual Mutis tenía la formación teórica en astronomía ya mencionada. Convivían en Mutis tres facetas complementarias, siempre en torno a la medicina, la botánica y la matemática, así como una incipiente relacionada con la astronomía y la minería. Esta última fue, precisamente, la que lo llevó a un lugar que incluso hoy es un enclave muy apartado en las estribaciones de la cordillera Central, sobre el valle del río Magdalena, en el cerro del Sapo, en donde se había establecido años atrás una explotación que Mutis quiso atender con Pedro de Ugarte y otros socios cuando ya el virrey Messía de la Cerda había regresado a la España peninsular y Jayme Navarro, su exsocio minero y compañero de viaje y materia médica desde Madrid hasta la Montuosa, andaba muy lejos, ejerciendo su cargo de gobernador en lo que hoy es el Chocó, sobre el río Atrato, en la vertiente occidental de la cordillera Occidental.

En 1772, Mutis viajó de Santafé al valle del río Magdalena por el valle de Tena y pasó nuevamente por Honda, casi 12 años después de haber arribado a este puerto fluvial por primera vez a finales de 1760, como se puede establecer gracias a uno de los tres (3) documentos inéditos que aquí se presentan como ejes centrales: los dos primeros con las mediciones atmosféricas hechas en enero y febrero de 1772 entre Santafé y el Real de Minas del cerro del Sapo, cerca de Ibagué. Estos dos documentos se conservan en el Real Jardín Botánico de Madrid, y en ellos puede confirmarse que Mutis había tenido ya la oportunidad de viajar a este Real de Minas en 1772, cinco años antes de instalarse allí por espacio de un lustro a partir de 1777, periodo en el que redactó un manuscrito muy especial, absolutamente desconocido hasta la fecha y pleno de anotaciones meteorológicas, el cual reposaba en silencio en el fondo de un archivo del Gimnasio Moderno de Bogotá.

El autor encontró este manuscrito de manera inesperada al acceder en esta biblioteca al “Fondo Soledad Acosta de Samper”, tía de José María Samper Brush y Tomás Samper Brush, fundadores de esta institución en 1914, conjuntamente con Ricardo Lleras Codazzi, Tomás Rueda Vargas y Agustín Nieto Caballero, su propulsor.

Estos registros meteorológicos manuscritos en 33 folios recto verso por José Celestino Mutis en 1777 se refieren a la localidad del Real de Minas de Nuestra Señora del Rosario en el cerro del Sapo, al oriente del valle de San Juan. De acuerdo con un trabajo preliminar de la Universidad del Tolima, este Real de Minas hacía parte de los

Reales de Minas en la Nueva Granada [los cuales] operaron como una estrategia expansiva de la Conquista. Los reales de minas se establecieron como puestos de avanzada al interior de territorios poblados por grupos indígenas no sometidos y en los cuales también se encontraban minas (Carvajal & Velandia, 2019).

La explotación de estas minas en la segunda mitad del siglo XVIII fue vinculada a Mutis por estos mismos autores:

El primer documento etnohistórico sobre el Real de Minas del Sapo, corresponde a Don Santiago Bonilla, fechado en el año de 1749, vecino de la ciudad de Ibagué, quien manifiesta que por más de veinte años ha buscado la mina y después de muchas exploraciones halló la mina del Sapo o del Capo, una de plata y otra de oro, la cual fue abandonada por los diferentes hostigamientos de los indios pijaos (AHI, s.f.). Don Pedro de Ugarte, regidor y empresario minero, quien conoció a Mutis en Montuosa Baja, Norte de Santander, como director y mayordomo, le propuso emprender una empresa de minería en el Real de Minas del Sapo. A principios del mes de enero de 1772, se da comienzo a su nueva empresa en busca del Dorado (*auri sacra fames*) (Pérez Arbeláez, 1954, p. 60) [...]. A la muerte de Ugarte, los derechos de propiedad de la mina fueron repartidos entre su esposa Doña María Josefa Franqui y Lombana y sus sobrinos Nicolás y José Antonio Ugarte. Mutis reclamó sus derechos a la inversión, los que ascendían a unos diez mil pesos, dejando de lado su participación (Carvajal & Velandia, 2019).

Más allá de la minería, es evidente por este manuscrito inédito del Fondo Acosta de Samper, que Mutis se dedicó esencialmente a sus tareas naturalistas, referidas en detalle en el *Diario de observaciones* de esos mismos días transcrito por Hernández de Alba a partir de los documentos que se conservan en el Real Jardín Botánico de Madrid bajo el descriptor “Fondo documental José Celestino Mutis”, y que aprovechaba sus viajes y estancias en Santa Fe para atender la cátedra de matemáticas del Colegio del Rosario, la cual hubo de delegar progresivamente a sus alumnos. Pero, como se verá a continuación, Mutis se dedicó también a observar el cielo.

Sus registros diarios del estado del tiempo incluyen variables como el viento (fuerte: ráfagas / recio-medio: fresco-suave), la nubosidad (alta-media: entrecubierta-escasa-descubierta: clara), los truenos (próximos-distantes; frecuentes-escasos; grandes-sordos), la lluvia (intensa: paramón-media: aguas mansas-escasas), y muy particularmente el grado de “serenidad” del ambiente nocturno y, en un comienzo, la evolución diaria de la Luna en el meridiano. Todos estos dan cuenta de su carácter paciente y, diríamos, casi poético, inclinado a la observación y al detalle. En medio de esta dedicada contemplación, se manifiesta también un espíritu positivista que intenta matematizar la naturaleza y sistematizar sus fenómenos con el mayor rigor posible. Ciencia, pero también estética: así se preparaba el gestor de las láminas más apreciadas entre todas las de las expediciones europeas de los siglos XVIII y XIX.

En esos mismos días, 36 cartas escritas y recibidas por Mutis entre 1772 y 1782 muestran el fundamento de sus actividades naturalistas. A estas deben añadirse tres cartas del año 83, las dos primeras del mes de marzo, con la correspondencia de ida y vuelta con el virrey Antonio Caballero y Góngora, que fue esencial para su regreso a Santafé y el subsecuente establecimiento de la Real Expedición Botánica, y una tercera, escrita por Mutis en diciembre de ese mismo año, en la que da cuenta a Gustav von Pajkull, ornitólogo y entomólogo sueco, de sus trabajos zoológicos en los años en que vivió en las minas del cerro del Sapo.

Sin embargo, ninguna de estas cartas habla en detalle de sus impresiones meteorológicas. Esta dimensión de su ciencia (y de su arte) no era aún comunicable. Caía como un rocío que irrigaba su alma de artista y que solo llegó a expresarse plenamente en la representación a la vez natural y matematizada de las plantas que clasificó siempre a medias. Quien lea las observaciones meteorológicas del documento inédito del Gimnasio Moderno podrá comprobar por sí mismo el tono y el ritmo tan particular que hace recordar el *Bolero* de Ravel, aparentemente monótono, pero muy rico en matices. Solo que, a diferencia de este, en el manuscrito de Mutis no hay progresión ascendente: solo los ritmos del día a día usual, con los tonos grises que aporta el ciclo de las aguas.

Mutis se trasladó en 1783 a Santafé, gracias al apoyo del arzobispo- virrey Antonio Caballero y Góngora³, para ocuparse de la Expedición Botánica que lo haría pasar a la historia, dejando atrás la sonoridad, la luminosidad, las especies y una naturaleza únicas, síntesis de una vida apacible que no volvería a tener al encargarse de un grupo cada vez más grande de aprendices y colaboradores en el dominio de las ciencias y las artes, lo que lo sacaría de su refugio íntimo y lo proyectaría a la historia universal.

Con este preámbulo, demos ahora la palabra al propio Mutis para que refiera lo que vio y lo que sintió en ese lugar, en esos días entre los años 72 y 82 (**Figura 1**)⁴:

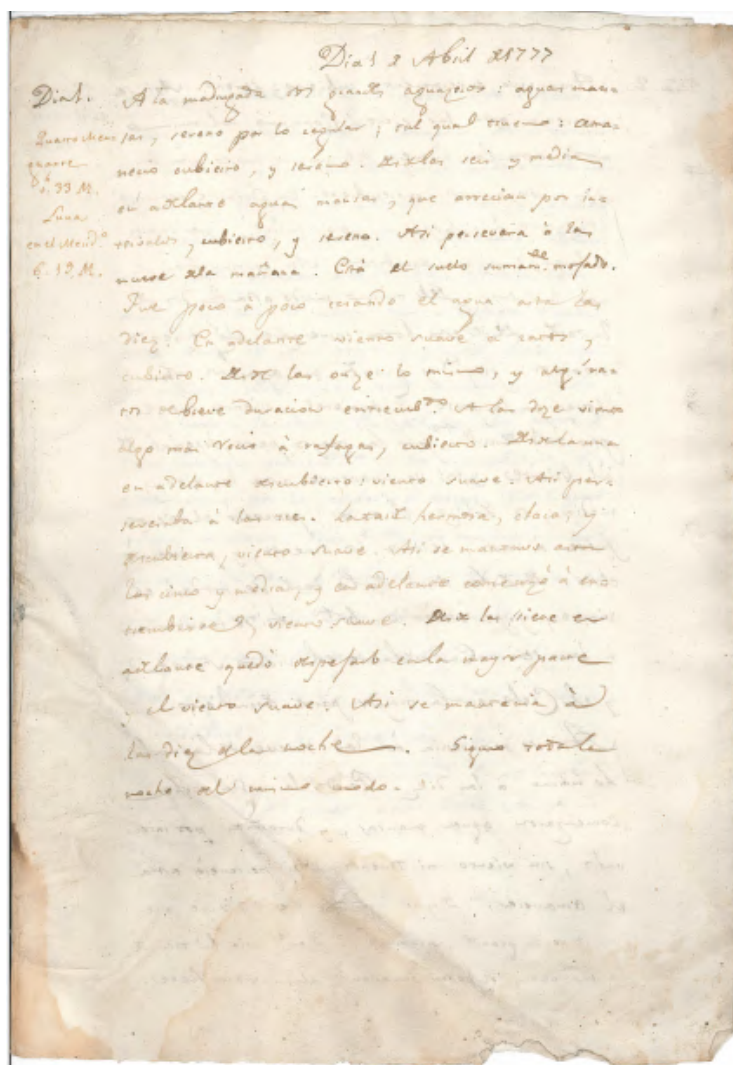


Figura 1. Observaciones meteorológicas de Mutis hechas en 1777

Día 1 de abril de 1777 [Al margen: Cuarto Menguante [...] – Luna en el Meridiano 6.19 M⁵]

A la madrugada dos grandes aguaceros: aguas mansas, sereno por lo regular; tal cual trueno: amaneció cubierto, y sereno. Desde las seis y media en adelante aguas mansas, que arrecian por intervalos, cubierto, y sereno. Así persevera a las nueve de la mañana. Está el suelo sumamente mojado. Fue poco a poco cesando el agua hasta las diez. En adelante viento suave a ratos, cubierto. Desde las once lo mismo, y algunos [ratos] de breve duración entrecub[ierto]. A las doce, viento algo más recio a ráfagas, cubierto. De la una en adelante descubierto: viento suave. Así perseveraba a las tres. La tarde hermosa, clara, y descubierta, viento suave. Así se mantuvo hasta las cinco y media, y en adelante comenzó a entrecubrirse, viento suave. Desde las siete en adelante quedó despejado en la mayor parte y el viento suave. Así se mantenía a las diez de la noche. Siguió toda la noche del mismo modo.

Día 2 [Al margen: Luna en el Meridiano 7.14 M]

Amaneció enteramente cubierto; sereno. Así se mantenía a las siete. Continuó del mismo modo hasta las nueve. Del mismo modo hasta las diez, pero a ratos entrecubierto. En adelante comenzó el viento a ráfagas un poco fuerte, y por ratos de larga duración descubierto. Así continuaba hasta las doce. Del mismo modo hasta las dos de la tarde. Desde esta hora comenzaron algunos truenos próximos, frecuentes y grandes con aparatos⁶ al llover por la parte del poniente, viento fuerte, pero [todo] descubierto por la mayor parte, especialmente al Oriente. Así se mantuvo hasta las tres y media; se deshizo el agua; perseveró el viento fuerte a ratos, cesaron los truenos, y perseveró claro. Desde las cinco de la tarde se moderó el viento, y perseveró descubierto. Así se mantenía a las seis. En adelante el viento suave, y el cielo, en la mayor parte, descubierto. Así se mantenía a las nueve de la noche. Lo mismo a las diez. Pasada la medianoche comenzaron aguas mansas, y duraderas por intervalos, sin viento ni truenos. Así perseveró hasta el amanecer. Después me informé, y supe que hubo truenos grandes, próximos, y frecuentes hacia las tres de la mañana, de poca duración: algún viento fuerte.

Día 3 [Al margen: Luna en el Meridiano 8.9 M]

Amaneció lloviendo aguas mansas, y cubierto: viento suave. Así perseveró hasta las ocho de la mañana. De ocho y media a nueve y media, nieblas pasajeras; cubierto, y viento suave. En adelante perseveraba del mismo modo. A las doce cubierto, y un poco de viento comenzó a moverse; pero duró poco, y después sereno. Desde la una entrecubierto a ratos, y viento suave. Así perseveró hasta las dos. Después cubierto hasta las tres, y viento suave. Desde las tres entrecubierto hasta las cuatro, viento suave. En adelante descubierto, viento suave y hermosa tarde. Así se mantenía a las seis. En adelante viento suave, y descubierto hasta las siete. Después comenzó a entrecubrirse, hasta quedar enteramente cubierto; el viento perseveró suave. Así se mantenía a las diez de la noche. Perseveró toda la noche serena, sin aguas, viento ni truenos, pero enteramente cubierta (**Mutis**, *manuscrito inédito*, Archivo, Gimnasio Moderno, Bogotá).

Esta era su prosa en los tres primeros días de los nueve meses que registró en esa localidad y de los que quedó evidencia, como digo, aún inédita. Son 71 días en total, con 10 a 12 registros diarios: del 1 al 20 de abril, del 15 de junio al 11 de julio, del 28 de julio al 16 de agosto, del 30 de octubre al 1 de noviembre y del 14 y el 15 de ese mismo mes. Como se puede observar en la **tabla 1** y en la **figura 2**, esta serie de observaciones meteorológicas puede transformarse en un recurso cualitativo en función de acrónimos preliminares, con un formato de cuadro o de gráfica que demuestre su rigor, más allá de su tono literario.

La rigurosa periodicidad de estas mediciones de Mutis en el año 1777 seguramente permitiría a un meteorólogo contemporáneo desagregar los datos y tomarlos como referencia histórica para compararlos con registros actuales y sacar algunas conclusiones en su disciplina.

Para terminar este apartado sobre las mediciones y los registros de Mutis en el dominio de la astronomía y la meteorología antes del Observatorio, debe hacerse referencia a dos de los “escasos” reportes de Mutis al respecto: las determinaciones de la longitud y la latitud de Santafé. El astrónomo Gregorio Portilla me preguntó hace algunos meses si yo sabía de las “medidas de latitud y longitud de Santafé antes de la llegada de Humboldt o de la inclusión de Caldas en la Expedición Botánica”. Me hizo la pregunta porque él tenía entendido que el valor de latitud cercano al real, del orden de 4 grados 35 minutos, solo fue posible con Humboldt y luego con las medidas de Caldas, pero en un estudio que estaba haciendo

Tabla 1. Registros meteorológicos de José Celestino Mutis en el mes de abril de 1777

Abril 1 de 1777		Abril 2 de 1777		Abril 3 de 1777	
Meteorología	Hora	Meteorología	Hora	Meteorología	Hora
ams-t	5	ec-s	5	am-c-vs	5
Cs	6	ec-s	7	np-c-vs	8
am-cs	6,5	ec-s	9	np-c-vs	9,5
am-cs-sm	9	ec-s	10	c-v-s	12
vs-c	10	vrf-dc	12	ec-vs	13
vs-ec	11	vrf-dc	14	ec-vs	14
vrr-c	12	tp-r-vf-dc	15,5	ec-vs	15
vs-d	13	tp-r-vf-dc	17	dc-vs	16
vs-c	15	vf-dc	18	dc-vs	18
vs-ec	17,5	vs-dc	21	dc-vs	19
vs-d	19	vs-dc	22	ec-c-vs	22
vs-d	22	am	24	c-v-s	24
vs-d	24				

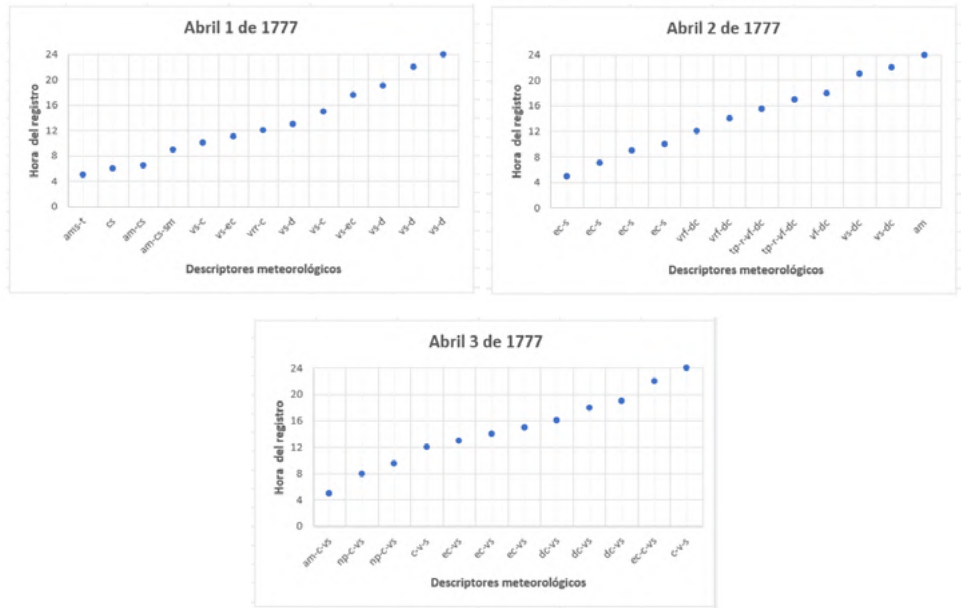


Figura 2. Frecuencia diaria de los registros meteorológicos de José Celestino Mutis

infería que ya para el año de 1791 se sabía que Santafé tenía ese valor de latitud, y no se le ocurría quién habría podido realizar esa medición. No pude responderle, y espero que él mismo la pueda comentar en un artículo ulterior.

Francisco José de Caldas en el periodo entre 1796 y 1805

Trataré ahora sobre Caldas en los años previos a su llegada al Observatorio, que ya había sido construido en Santafé, pero llevaba más de dos años de inactividad. Las *Obras completas* del payanés, publicadas por la Universidad Nacional a mediados del siglo XX, incluyeron 50 textos que hoy, después de una revisión actualizada de todos los hallazgos en fuentes primarias y secundarias, he podido compilar para un total preliminar

de 115 textos, sin contar sus trabajos iconográficos y sus epístolas que, en algunos casos, podrían tener la categoría de “transacciones filosóficas”, como las que se venían publicando en las *Philosophical Transactions* de Londres desde el siglo XVII. Entre las obras relacionadas con la astronomía y la meteorología, mencionaré a continuación una selección de treinta y nueve (39) documentos que sirven al propósito de esta reflexión, producidos entre 1796 y 1805, año en el que Caldas se radicó en Santafé antes de iniciar sus trabajos en el Observatorio.

- 1- Observaciones diversas hechas en [1797, 1798 y] 1799
- 2- Observaciones sobre la verdadera altura del cerro de Guadalupe (1801)
- 3- Observaciones de la elevación del mercurio en el barómetro en diferentes lugares del virreynato de Santafé: 1796 y 1801 (1802)
- 4- Memoria sobre el origen del sistema de medir las montañas y sobre el proyecto de una expedición científica (1802)
- 5- Memoria sobre el plan de un viaje proyectado de Quito a la América Septentrional presentada al célebre director de la Expedición Botánica de la Nueva Granada, don José Celestino Mutis (1802)
- 6- Apuntes manuscritos de Francisco José de Caldas (1802):
 - a- Catálogo de 560 estrellas principales visibles en París [par]a el 1º de enero de 1800 según las últimas observaciones por Michel Lefrançois Lalande
 - b- [Medidas y conversiones]
 - c- Advertencias sobre el Catálogo
 - d- Tabulación para calcular la anulación en ascensión recta y declinación de las estrellas p[ar] a un tiempo dado, tomada del Atlas celeste de Bode, Quito, Feb[rer]o 7 de [1]802
 - e- Tabulación de las diferencias de meridianos en tiempo y en grados entre el Observatorio de París y los principales lugares de la Tierra, con sus latitudes, tomada del Conosim[iento] (sic) de los tiempos, año de [1]800
 - f- Oblicuidad de la eclíptica - Oblicuidad aparente de la eclíptica
 - g- Calendario republicano francés
 - h- Noticias astronómicas tomadas de la Guía de Navegantes de M. Leveque
 - i- Posición de Cádiz
 - j- Posición del Observatorio en la Ysla de León, al occidente del Observatorio Nacional de Francia - Diferencia de Meridianos entre Cádiz, Greenwich y París
 - k- Ensayo de una memoria sobre un nuevo método de medir las montañas por medio del termómetro y el agua hirviendo, seguida de un apéndice
- 7- Diario de viajes (1802-1803):
 - a- Relación del viaje hecho a Cotacache, La Villa, Imbabura, Cayambe, etc., comenzado el 23 de julio de 1802
 - b- Viaje a Mojanda
 - c- Viaje a Cuicocha
 - d- Monumento de los antiguos peruanos
 - e- [Viaje al m]onumento de Agato
 - f- Quito
 - g- Viaje de Ibarra a Inta
 - h- Apéndice del viaje a Malbucho e Inta
 - i- Viaje de Quito a Malbucho
- 8- Cuaderno de viajes y observaciones (1802-1807):
 - a- Relación de un viaje a Ibarra y demás pueblos circunvecinos al Nordeste de Quito hecho en 1802

- b- Viaje a las pirámides y base de Yaruquí
 - c- Viaje a Pichincha
 - d- Viaje al Panecillo
 - e- Determinación del término de la nieve perpetua en las cercanías del ecuador
 - f- Determinación del término de la vegetación en las cercanías del ecuador
 - g- Trabajos geodésicos sobre Imbabura
- 9- Memoria sobre la nivelación de algunas plantas que se cultivan en la vecindad del ecuador (1803)
 - 10- Viaje de Quito a las costas del Océano Pacífico, por Malbucho hasta la embocadura del río Santiago y bahía de San Lorenzo, hecho en julio y agosto de 1803 (1803)
 - 11- Carta del camino de Malbucho desde Ibarra hasta la embocadura del río Santiago y bahía de San Lorenzo, levantada en julio y agosto de 1803 (1803-1804)
 - 12- Viaje al corazón de Barnuevo - Viajes al sur de Quito (1804)
 - 13- Viaje de Paute (1804)
 - 14- Cuenca (1804)
 - 15- Viaje de Quito a Popayán (1805)

A partir de 1806, Caldas inició una productiva tarea astronómica y meteorológica en el Observatorio con énfasis en la geografía, dejando aparentemente de lado sus trabajos botánicos a causa del protagonismo y jerarquía en este dominio de los Mutis, Rizo y Matis, principalmente.

Entre las obras de Caldas destacaré aquí solo las tres primeras de las 39 que he seleccionado para el periodo de 1796 a 1805, puesto que la astronomía caldasiana fue tratada en bloque por **Portilla** (2020). En el “Apéndice B” de ese trabajo aparece, por ejemplo, un cuadro con la totalidad de los “Eclipses de Luna y de Sol en el periodo 1792-1816”, en el que se refiere que Caldas registró tres eclipses totales de Luna y dos de Sol entre 1797 y 1804: *Total de Luna* (03-12-1797); *Total de Luna* (30-03-1801); *Total de Luna* (22-09-1801); *Total de Sol* (21-02-1803); *Total de Sol* (05-08-1804) (**Portilla**, 2020).

Por mi parte, me concentraré en la relación de los trabajos de Caldas con la astronomía humboldtiana, tercera y última sección de este artículo. Estos son: a) sus *Observaciones diversas hechas en [1797, 1798 y] 1799*; b) sus *Observaciones de la elevación del mercurio en el barómetro en diferentes lugares del virreynato de Santafé: 1796 y 1801*, y c) sus *Observaciones sobre la verdadera altura del cerro de Guadalupe en 1801*. Las primeras dos corresponden a originales que Caldas le entregó personalmente a Humboldt y que se conservan en el fondo Alexander von Humboldt de Berlín. La tercera corresponde a la versión impresa en el *Correo Curioso de Santafé de Bogotá* en los meses de julio y agosto de 1801.

a) *Observaciones diversas hechas en [1797, 1798 y] 1799* (**Figura 3**)

El documento completo y original manuscrito de 19 folios se puede consultar directamente en el portal digital de la Staatsbibliothek (**Caldas**, 1999).

Las mediciones de Caldas de la latitud de Popayán fueron publicadas por Humboldt y el astrónomo Jabbo Oltmanns en su obra *Recueil d'observations astronomiques* para complementar sus propias mediciones, con la siguiente mención:

“M. Caldas, americano de nacimiento, observó igualmente la latitud de esta ciudad en Popayán, por medio de gnómones; él la encontró entre 2° 26' 8'' y 2° 29' 50''. Para determinar la longitud, él había observado el 22 de diciembre de 1798 (sic), la emersión del primer satélite de Júpiter a las 7^h 1' 30¼'' tiempo verdadero, observación que le hizo hallar la longitud de Popayán en 5^h 15' 0'' al Oeste de París. El Sr Caldas, de quien no se sabría alabar lo suficiente su celo por los progresos de la geografía, se sirvió, para tomar las alturas correspondientes del sol, de un cuarto de círculo de madera. [Este] observador se vio obligado a construir él mismo sus instrumentos, según las descripciones incompletas que encontró en las obras de astronomía” (**Oltmanns**, 1810).

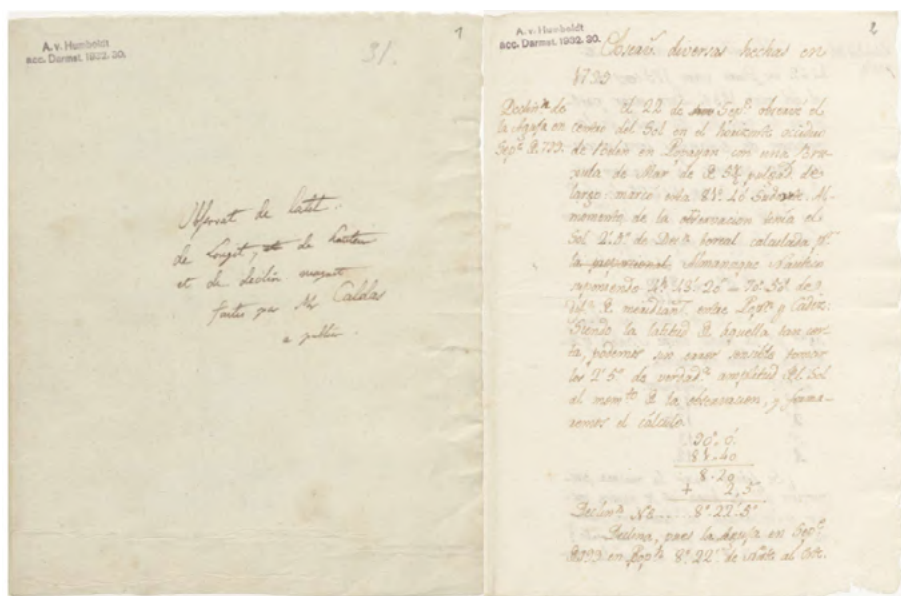


Figura 3. Observaciones diversas de Caldas hechas en [1797, 1798 y] 1799

A continuación, en la misma página, Humboldt incluyó una tabla con las observaciones registradas por “Don José Caldas” para determinar la latitud de Popayán con base en la altura del sol, con fechas de [...] 21 y 22 de diciembre de 1799, a mediodía [...]; para cada día cada una de estas mediciones se acompaña de su medición para la “Líneas de la base [...]”. La última medición tiene la siguiente observación: “Hecha con la mayor precisión” y, a pie de página, Humboldt especifica que el “El Señor Caldas concluyó la altura del centro del sol a partir de la altura de sus bordes superior e inferior, recibiendo la imagen del sol por una pequeña obertura”.

b) Observaciones de la elevación del mercurio en el barómetro en diferentes lugares del virreynato de Santafé: 1796 y 1801 (Figura 4)

Este manuscrito (Caldas, 1796-1801) corresponde a otro folio entregado personalmente por Caldas a Humboldt en su convivencia del primer semestre de 1802 en Quito, y contiene notas del prusiano en el margen derecho, y en el izquierdo, de Oltmanns (1810), quien, como dije, colaboró con Humboldt en los cálculos y la redacción de los dos tomos de las observaciones astronómicas, operaciones trigonométricas y medidas barométricas hechas durante su viaje a las regiones equinocciales del Nuevo Continente entre 1799 y 1803.

La prueba de que este folio fue entregado personalmente por Caldas a Humboldt está registrada en la página 374 del primer tomo de la obra conjunta de Humboldt y Oltmanns, en donde en su artículo “[Sobre la altura absoluta de varios lugares del continente]”, este dice: “Añadí dieciséis puntos medidos por el Sr. Caldas, e indicados en un manuscrito que este joven sabio americano había comunicado al Sr. Humboldt durante su estadía en Quito. Como los observadores no registraron la temperatura del aire en el momento de sus mediciones barométricas, tuve que suplir este faltante con suposiciones fundadas en simples analogías” (Vol. 1, p. 376) (Oltmanns, 1810).

c) Observaciones sobre la verdadera altura del cerro de Guadalupe en 1801 (Figura 5)

Este estudio fue publicado en los números 23, 24 y 25 del *Correo Curioso de Santafé de Bogotá* correspondientes al 21 y 28 de julio y 4 de agosto de 1801, y es, sin lugar a duda, el texto que proyectó al payanés en la esfera científica (Caldas, 1801). Su importancia radica en que fue publicado en un lenguaje novedoso para la época y que fue inmediatamente reconocido por Alexander von Humboldt, por cuanto el día de su publicación en Santafé el prusiano se alojaba en la casa de José Celestino Mutis y allí tuvo acceso directo a este.

Observaciones de la elevación del Barómetro en diferentes lugares del Virreinato de Santafé.

Lugares	Elevación del Barómetro	Altitud
1796 Guadalupe	15. 6,00	225,2
Santafé	20. 7,33	227,2
La Alcaza	24. 2,00	
Castillo	26. 2,00	
Excmo		
1797 Pácor	25. 2,00	
1801 Popayan	22. 10,30	(274,7)
La Ermita	22. 7,33	
1798 Poblacion	21. 6,80	
1799 Buenavista	21. 1,15	223,17
La Alcaza	20. 2,40	
1799 Catedral	20. 7,00	
1799 Poblacion	16. 11,60	
1799 Catedral de Santa Fe	12. 6,00	
1799 Las Tumbas	21. 3,00	
1800 La Ermita	17. 4,00	172
1801 La Alcaza	25. 0,00	

Lugares Alt. del Barómetro

La Ermita	23. 11,55
La Alcaza	22. 11,50
La Ermita	20. 10,25
La Ermita	20. 7,30
La Ermita	19. 9,35
La Ermita	23. 7,20
La Ermita	21. 6,72
La Ermita	20. 3,24

Figura 4. Observaciones barométricas de Caldas en el virreynato de Santafé: 1796-1801

Núm. 23. CORREO CURIOSO DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ. Martes 21 de Julio de 1801. OBSERVACIONES SOBRE LA verdadera altura del Cerro de Guadalupe que domina esta Ciudad, dirigidas a los Editores del Correo Curioso.

MUY SS. misos: déxos a los literatos el cuidado de examinar si Vds. han visitado las leyes que la razón y el buen gusto han dictado sobre el Apologos si es ó no suficiente que supiere Guadalupe, y Monasterio discursos; y en fin si se concluye algo en el número 4 del Correo Curioso. Yo me limito ahora a averiguar si Vds. han hecho gigantes, ó enanos a estos viejos, si les han dado origen Patagones, ó he-choles descender de los Quinos de Madagascar.

Estos cerros (dicen Vds. en una nota del Núm. 4) en cuya falda está situada la Ciudad tienen de altura el prim. 418 varas, y el segun- do 431; pero no hemos comprobado esta medida. Las palabras de esta nota suponen que se ha hecho alguna, y seguramente de las mas im- perfectas, pues le quita casi la mitad de su verdadera elevación a Gua- dalupe. Los hechos en que fundo esta asercion son los siguientes.

En un MS. intitulado *Relacion de un viaje de Santa Fe de Bogotá de Popayan hecho en 1796 por N. de la Cruz* dos lugares relativos al asunto presente. El primero es el siguiente: «Mi primer cuidado fué llenar el Barómetro con todas las precauciones que me fué posible practi- car. Despues de una larga serie de observaciones que hice en él, hallé que la mayor elevación de mercurio en Santafé era de 20 pulgadas, 8 líneas; y la menor de 20 pulgadas 6, a zero. lin (6) que por con- siguiente»

(*) Nota de los Editores. Por defecto de caracteres ó signos que demue- stran las fracciones numericas, se pone en letras lo que no se ha podido expresar en aquella forma comun.

Núm. 24. CORREO CURIOSO DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ. Martes 28 de Julio de 1801. CONTINUACION DEL N. ANTECEDENTE.

Si de la altura establecida de Guadalupe quitamos la que tiene Santa Fe sobre el mar, el residuo 330, 17 varas, ó 796, 616 varas cas- tellanas será la elevacion de aquel sobre la Ciudad, ó mas brevemente el nivel de la casa en que hice mis observaciones del Barómetro, que se halla situada (*) algunas varas sobre la plaza mayor de Santafé.

Y como los lugares de la *Relacion del Viaje*, que he citado a Vms. en que se establece la altura de Guadalupe de 418 varas, es decir 338 mas que las que le da el Núm. 4.º del Correo Curioso.

Persuadido que mi nombre es desconocido en el mundo literario que mis observaciones son de ningún valor, he acompañado a la *Relacion de mi Viaje*, un Apéndice en donde manifiesto los elementos y los cál- culos de cuyos resultados me he servido, para consultar en la con- fianza de los que le lean. He aquí lo que he hallado en dicho Apéndice relativo al asunto presente.

Cálculo 1.º de la altura de Santafé y Guadalupe sobre el nivel del mar, y la de este sobre aquella.

Lugares	Alturas del mercurio
Caraburá. 21. p. 2. 21 = 1019	Santafé. 20 p. 1 = 245
Pitchechica. 15. p. 11 = 191	Guadalupe. 19 p. 0. 21 = 165

(*) En la Calle de la Fátiga arriba del Coliseo, Manz. 4 Casa N. 16.

Figura 5. Observaciones de Caldas sobre la verdadera altura de Guadalupe

La evidencia de que Humboldt leyó este artículo prínceps de Caldas aparece en sus diarios de viaje de manera explícita: “Durante mi estadía en Santa Fe me insistieron mucho para que midiera la altura de esta montaña sobre la cual se tenían muchas dudas. En un papel público (*Correo Curioso*) se le atribuían 431 varas mientras que el señor Caldas de Popayán encontró 769 varas. Yo tenía bastante confianza en esta última medida debido a la armonía que encontré entre mi observación de la altura de Santa Fe y la de este joven físico” (Arias, 1982).

Una carta de Caldas a Santiago Arroyo, firmada en Quito el miércoles 21 de enero de 1802, permite constatar el impacto de este artículo en su vínculo disciplinar con Humboldt, puesto que Caldas le comentó que había comparado sus alturas del barómetro con las de Barón hechas en Guadalupe, Santafé, Popayán, Pasto, Chota, Ibarra y Quito, y [habían] hallado una conformidad prodigiosa.

Además, Caldas ya había merecido el honor de que en Santafé Humboldt preguntara por la casa en que hizo sus observaciones en 1796, y se transportara a ella con su barómetro para compararlas con las suyas. Tanta fue la confianza que le merecieron sus trabajos. Además de esto, le refirió su encuentro en detalle:

Así que llegamos a Ibarra comí con él, y públicamente se volvió a mí y me dijo: He visto los preciosos trabajos de usted en astronomía y geografía. Me los han enseñado en Popayán. “He visto alturas correspondientes tomadas con tal precisión, que la mayor diferencia no pasa de cuatro segundos”. Después que abrió sus cofres, me mostró el manuscrito de observaciones astronómicas: me hizo notar la que había hallado de Popayán con su famoso cronómetro, y luego me dijo: “el padre de usted, sin su consentimiento, me ha enseñado un libro manuscrito, en que hallé una observación de la inmersión del primer satélite de Júpiter, calculada; y da la misma longitud que mi cronómetro: lea usted”. He visto un elogio en francés que no merezco [...].

Después de referir su observación del cronómetro añade: “el doctor Caldas ha hecho en tanto una bella observación del primer satélite de Júpiter: él ha hallado 5^h 14’ 16” y yo 5^h 14’ 13”. *Il est étonnant que ce jeune américain* se haya elevado hasta las más delicadas observaciones de la astronomía por sí mismo, y con unos instrumentos hechos de sus manos; con otro montón de cosas que no quiero referir [...].”

Así escribió en Popayán por una simple observación aislada, que dejé por casualidad en esa ciudad. Es preciso que le haya tocado más una serie de ellas que le he presentado, en que las diferencias de altura correspondientes no pasan de un segundo; con mi cuarto de círculo de madera dividivi que conoce Miguel. En esta colección de observaciones astronómicas que le he dado, está la del eclipse de luna de 1797, y un número grande de latitudes en la parte alta del Magdalena, hechas con el sol y diferentes estrellas. Le enseñé mi carta de Timaná y otro trozo que levanté en 1796 de Tocaima a Neiva; de modo que unidos estos materiales a los del Barón, tenemos ya una carta de todo el Magdalena. Este sabio me ha pedido un ejemplar de todo, y lo ha añadido a la gran carta del Reino. ¡Qué honor para mí el ver mis primeros trabajos al lado de los de un hombre grande! (Caldas, citado en Bateman & Arias, 1978).

Ese mismo día, Caldas comentó también a otro pariente y amigo suyo en Popayán, Antonio Arboleda, la importancia de su colaboración con el prusiano en la cartografía del Magdalena: “¡Qué impresión le ha hecho a este sabio que pudiese llegar al grado de perfección que ha visto con un cuarto de círculo de madera hecho en Popayán! Ha dicho en una tertulia aquí que mis observaciones están mejor ejecutadas que las de Jorge Juan, y que nunca habría creído que en América hubiera ido la astronomía tan adelante”. (Caldas, citado en Bateman & Arias, 1978).

El intercambio de datos y mediciones dio fruto, puesto que condujo a que se publicara en París en 1814 la primera obra cartográfica formal de Caldas en conjunto con Humboldt, José Manuel Restrepo y Joaquín Francisco Fidalgo, en lo que debería citarse como el *Mapa del río Magdalena de Humboldt, Caldas, Restrepo y Fidalgo*, y no solo como el *Mapa del río Magdalena de Humboldt*. La mayoría de los mapas son palimpsestos, en cuanto son producciones colectivas simultáneas, o bien sucesivas. Para una revisión historiográfica del manuscrito original caldasiano que corresponde a este recuadro impreso, pueden acudir a un artículo reciente del historiador **Mejía Macía** (2022) en la *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.

Para terminar, me referiré brevemente al vínculo tripartito que se configuró en dos encuentros personales sucesivos de Humboldt: el primero con Mutis, entre julio 7 y septiembre 8 de 1801 en Santafé, y el segundo con Caldas, entre diciembre 31 de 1801 y junio 9 de 1802 en los territorios de la Audiencia de Quito. Una aproximación más extensa

y detallada a los trabajos científicos del prusiano en nuestro territorio, y de los pormenores de sus encuentros e intercambios con neogranadinos y colombianos entre 1800 y 1859, podrá consultarse en la obra *Humboldtiana neogranadina*, impresa en seis tomos en 2018 con el apoyo de seis universidades, que hoy se encuentra disponible con acceso libre en el portal de la Biblioteca Nacional de Colombia (Gómez, 2018). Para lo relativo a la cartografía y la astronomía, se recomienda consultar en particular el tomo III.

Es clara, entonces, la incidencia de Alexander von Humboldt en los años en los que interactuó con Mutis y Caldas (1801 y 1802) en torno a la iniciativa de construir el que llegó a ser el primer observatorio astronómico del continente americano: Mutis encontró un astrónomo gracias a Humboldt, quien lo validó con conceptos elogiosos aún antes de conocerlo personalmente. En una carta firmada en Popayán en noviembre de 1801 (de la que se conserva solo un fragmento), Humboldt le habría comunicado a Mutis lo que registró en su diario:

Evidentemente, [Caldas] es un prodigio a maravilla en astronomía; desde hace años trabaja aquí en la oscuridad de una ciudad remota. Él mismo ha arreglado sus instrumentos para las medidas y observaciones: ora trazó meridianos, ora mide latitudes. ¡Cuánto podría realizar semejante hombre en un país donde se le proporcionara más apoyo! Hay, pues, por esta Sur América una (sic) ansia científica completamente desconocida en Europa, y habrá aquí grandes transformaciones en lo porvenir. (Caldas, citado en Schumacher, 1986).

Humboldt también elogió a Mutis en múltiples ocasiones. Pero no todo fueron alabanzas entre estos tres naturalistas: como dijo Arias de Greiff, hubo al menos un comentario desobligante sobre el gaditano. Se trata del concepto personal que el prusiano refirió a Caldas cuando convivía con él en la Audiencia de Quito sobre una serie específica de mediciones mutisianas, lo que fue reportado por Caldas en una carta a su amigo Santiago Arroyo escrita el 21 de marzo de 1802:

De Mutis, el sabio Mutis, ¡qué elogios no hace este sabio! Este sí es hombre, éste sí merece nuestro respeto: vaya reservado. Las observaciones del barómetro de este sabio, me ha dicho, son de lo más defectuoso; yo he leído su diario, y he visto que el barómetro de Mutis es un termómetro de Ammotons (sic), que ha engañado a este sabio treinta años, y que sus inmensos trabajos son inútiles absolutamente.

Como anotó Arias de Greiff, “este asunto de los trabajos barométricos de Mutis es uno que requiere estudiarse a juzgar por el desobligante comentario de Humboldt en su diario”. Humboldt fue un hombre paradójico: es necesario cuidarse de tomar al pie de la letra muchos de sus comentarios y, sobre todo, tener en cuenta a quién y cuándo se los expresaba. Ahí queda esa tarea.

Conclusión

Como puede verse con estas evidencias del periodo 1760-1805, la astronomía y la meteorología no se iniciaron en nuestro territorio en el Observatorio astronómico motivo de la pasada efemeride en 2023, dos siglos y dos décadas después de haber sido construido.

Lo que se hizo después en su interior, mirando o no al exterior, será materia de sucesivos trabajos, y la aproximación a lo que he calificado de la “prehistoria” de la astronomía y la meteorología en este mismo lugar, podrá ser revisada por otros autores con base en las fuentes presentadas.

Agradecimientos

El autor agradece la apertura de las autoridades y funcionarios del Gimnasio Moderno en Bogotá, así como las observaciones personales del académico Jorge Arias de Greiff sobre el vínculo entre Humboldt y Caldas. Las revisiones críticas de tres evaluadores anónimos de la revista de la Academia, y sus sugerencias de forma y fondo, enriquecieron particularmente el presente artículo.

Referencias

- Amat-García, G. & Agudelo-Zamora, H. D.** (2020). Las tareas zoológicas de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada (1783-1816). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(170), 194-213. <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1016/2707>
- Amaya, J. A.** (2005). *Mutis, apóstol de Linneo: historia de la botánica en el virreinato de la Nueva Granada (1760-1783)*. Bogotá: ICANH.
- Amaya, J. A.** (1999). *Mutis, apôtre de Linné en Nouvelle Grenade. Histoire de la botanique dans la vice-royauté de la Nouvelle-Grenade (1760-1783)*. Barcelona: Institut Botànic. <https://bibdigital.rjb.csic.es/viewer/12149/#page=155&viewer=picture&o=bookmarks&n=0&q=>
- Arboleda, L. C.** (1986). Mutis, entre las matemáticas y la historia Natural. *Historia Social de las Ciencias. Sabios, médicos y boticarios*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Arias de Greiff, J.** (Comp.). (1982). *Alejandro de Humboldt. Extractos de sus diarios*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. <https://www.banrepcultural.org/humboldt/diario/20.htm>
- Arias de Greiff, J.** (1993). *La astronomía en Colombia*, p. 46. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Arias de Greiff, J. & Reichel, E.** (Comp.). (1987). *Etnoastronomías americanas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bateman, A. & Arias de Greiff, J.** (Comps.). (1978). *Cartas de Caldas*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Bernal-Villegas, J. E. & Gómez-Gutiérrez, A.** (2010). *A impulsos de una rara resolución: el viaje de José Celestino Mutis al Nuevo Reino de Granada 1760-1763*. Pontificia Universidad Javeriana / Universidad del Rosario.
- Bernal-Villegas, J. E. & Gómez Gutiérrez, A.** (2008). *Medicina Científica Mutisiana*. Pontificia Universidad Javeriana / Academia Nacional de Medicina de Colombia.
- Blanco-Villero, J. M.** (2008). Mutis y la Zoología. *Anales Real Academia de Medicina y Cirugía de Cádiz*, 1, 1-29. <https://bibdigital.rjb.csic.es/viewer/1526027/?offset=#page=1&viewer=picture&o=bookmarks&n=0&q=>
- Caldas, F. J.** (1796-1801). Observaciones de la elevación del mercurio en el barómetro en diferentes lugares del virreinato de Santafé. En A. Humboldt, *Verschiedene Notizen*. https://digital.staatsbibliothek-berlin.de/werkansicht?PPN=PPN826363326&PHYSID=PHYS_0013&DMID=DMDLOG_0001&view=picture-double
- Caldas, F. J.** (1799). Observaciones diversas hechas en 1799. http://digital.staatsbibliothek-berlin.de/werkansicht?PPN=PPN770941168&PHYSID=PHYS_0001&DMDID=DMDLOG_0001
- Caldas, F. J.** (1801). Observaciones sobre la verdadera altura del Cerro de Guadalupe que domina esta ciudad. *Correo Curioso de Santafé de Bogotá*, 23, 89-92. https://catalogoenlinea.bibliotecanacional.gov.co/client/es_ES/search/asset/120764/5
- Caldas, F. J.** (1808). *Semanario del Nuevo Reyno de Granada*, 7, 51-57. https://catalogoenlinea.bibliotecanacional.gov.co/client/es_ES/search/asset/132614
- Carvajal-Fernández, J. & Velandia-Silva, C.A.** (2019). Arqueología colonial en el Real de Minas de Nuestra Señora del Rosario, Valle de San Juan, Tolima. En C. A. Velandia Silva (coord.), *Hábitat, paisaje y territorio del Tolima. Diez años de investigación de Rastro Urbano*, Unibagué. https://www.researchgate.net/publication/336267338_Arqueologia_colonial_en_el_Real_de_Minas_de_Nuestra_Senora_del_Rosario_Valle_de_San_Juan_Tolima
- Gómez-Gutiérrez, A., Uribe-Ángel, J. T., Ortiz-Valdivieso, P., Bernal-Villegas, J. E.** (2011). *Academia Mutisiana*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana / Academia Nacional de Medicina de Colombia.
- Gómez-Gutiérrez, A.** (2018). *Humboldtiana neogranadina*. Cesa / Pontificia Universidad Javeriana / Universidad de los Andes / Universidad del Rosario / Universidad Eafit / Universidad Externado de Colombia. <https://bibliotecanacional.gov.co/es-co/colecciones/biblioteca-digital/humboldtiana/Documents/index.html#book/>
- Gómez-Gutiérrez, A. & Bernal-Villegas, J. E.** (2022). *La extrema sutileza de don Jayme Navarro: Fuentes para la historia de la vida y obra del compañero de viaje de José Celestino Mutis en el Nuevo Reino de Granada: 1760-1775*. Academia Colombiana de Historia / Universidad del Sinú.
- Gómez-Gutiérrez, A.** (2023). *Aproximación a una bibliografía mutisiana*. Universidad Minuto de Dios. https://portalweb-uniminuto.s3.amazonaws.com/activos_digitales/Comision_Mutis/Publicaciones/Aproximacion_Bibliografias_Mutisianas.pdf

- Gómez-Gutiérrez, A.** (2024). Registros meteorológicos y astronómicos de José Celestino Mutis y Francisco José de Caldas: 1772-1802. *Revista eSPECTRA*, 2(1), 72-78. <https://drive.google.com/file/d/1RlcN0JoUJo-9V4gcdbQ3eznkSovmagg6c/view>
- González de Posada, F.** ([2008] 2009). José Celestino Mutis, Apóstol Físico-Matemático. En: Ribas Ozonas, B (coord.). *Homenaje a José Celestino Mutis en el Bicentenario de su fallecimiento*. Real Academia Nacional de Farmacia. <https://core.ac.uk/reader/230318528>
- González-Suárez, F.** ([1888] 1905). *Memoria histórica sobre Mutis y la Expedición Botánica en Bogotá en el siglo pasado (1782-1808)*. Imprenta del Clero. <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/10434>
- Gredilla, F.** (1911). *Biografía de José Celestino Mutis*. Fortanet.
- Hernández de Alba, G.** (Comp.). (1968). *Archivo epistolar del sabio naturalista don José Celestino Mutis* (tomo I, p. 41). Instituto Colombiano de Cultura Hispánica.
- Hernández de Alba, G.** (Ed.). (1957). *Diario de observaciones de José Celestino Mutis (1760-1790)*. Bogotá: Instituto Colombiano de Cultura Hispánica. <https://bibdigital.rjb.csic.es/viewer/16236/?offset=#page=229&viewer=picture&o=bookmark&n=0&q=>
- Mejía-Macía, S. A.** (2022). El Mapa de Timaná: versión de puño y pluma de Francisco José de Caldas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46 (179), 496-513. https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/el_mapa_de_timana_version_de_puno_y_pluma_de_francisco_jose_de_c/el_mapa_de_timana_version_de_puno_y_pluma_de_francisco_jose_de_c
- Molina-Betancur, S.** (2020). Newtonian medicine and its influence in Jose Celestino Mutis's General Plan for Medical Studies. *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, 75 (3), 245-269. <https://dx.doi.org/10.1093/jhmas/jraa018>
- Mutis, J. C.** (1777). Manuscrito sin firma atribuido a José Celestino Mutis (sin signatura). Fondo Soledad Acosta de Samper, Biblioteca, Gimnasio Moderno, Bogotá.
- Mutis, J. C.** (1794). Fragmentos útiles a la historia de la nueva práctica de la quina. *Papel Periódico de Santa Fé de Bogotá*, 128, 597-600. https://web.archive.org/web/20131023112903/http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/historia/papel-periodico-de-santa-fe-de-bogota/v3/Papel%20periodico_no128_baja.pdf
- Oltmanns, J.** (1810). *Recueil d'observations astronomiques, d'opérations trigonométriques et de mesures barométriques, faites pendant le cours d'un voyage aux régions équinoxiales du Nouveau Continent, depuis 1799 jusqu'en 1803, par Alexandre de Humboldt* (p. 273). Schoell. https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb10868686_00664.html
- Ortiz-Valdivieso, P., Bernal-Villegas, J. E., Gómez-Gutiérrez, A.** (2009). *Filosofía Natural Mutisiana*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Pérez-Riaño, P. F.** (2014). La minería colonial en el páramo de Santurbán, el caso de las Montuosas, Vetas y Páramo Rico. *Boletín de Historia y Antigüedades*, CI (859), 517-573. <https://academiahistoria.org.co/bha-859/>
- Portilla-Barbosa, J. G.** (2020). *Firmamento y atlas terrestre: la astronomía que practicó Francisco José de Caldas* (pp. 299-300). Universidad Nacional. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/80656/Astronomia_de_Caldas.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Quevedo, E.** (1985). La Ilustración y la enseñanza de la Medicina en la Nueva Granada. En J. L. Peset (coord.). *La ciencia moderna y el nuevo mundo*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas / Sociedad Latinoamericana de Historia de las Ciencias y la Tecnología.
- Schumacher, H. A.** (1986). *Caldas: un forjador de la cultura*. (pp. 10-11). Ecopetrol.

NOTAS

1 Como bien lo refiere un evaluador anónimo del presente texto al considerar esta cita de Arias de Greiff: “Todavía queda mucho por decir de las lecturas que hizo Mutis de estos y otros autores, y su influencia en su enseñanza y actividad científica. Para el caso de la práctica específica de la década de 1770 que nos ocupa, todavía no hemos explorado la lectura mutisiana de trabajos meteorológicos de autores cuyas obras aparecen en su biblioteca o que son frecuentemente citados por él como Jorge Juan y Ulloa, tanto en las “Observaciones astronómicas” como en la “Relación histórica del viaje a América meridional”. Otras lecturas están asimismo pendientes de estudio: las investigaciones de Bouguer sobre la dilatación del aire en la atmósfera, y las de De Luc sobre las modificaciones de la atmósfera. En cuanto al Padre Feuillée, no sabemos en qué sentido aprovechó la lectura de su *Journal des observations physiques, mathématiques et botaniques*, con las observaciones y registros meteorológicos de su expedición por la costa occidental de América del Sur y el Caribe. Con respecto a catálogos astronómicos y meteorológicos europeos, nos falta verificar la hipótesis de que por esos años consultaba *La Connaissance du temps* de París, antes de que se publicara el *Almanaque náutico* de Cádiz”.

2 Debe considerarse, como lo anota el evaluador anónimo citado, que “la mención de Caldas de un manuscrito de los trabajos de Mutis desde 1762 sobre las variaciones nocturnas del barómetro y las mareas atmosféricas [...] muestra el interés de Mutis en la relación entre astronomía y meteorología desde su llegada a la Nueva Granada o antes. En los años 1770 este interés pudo haberse objetivado en términos científicos en su estudio de las mareas en los *Principia* de Newton, vía su traducción de esta obra en la Cátedra del Rosario. En esta obra Newton postula que las fuerzas gravitacionales del sol y la luna provocan variaciones en el flujo y reflujo del mar y del aire en las partes más altas de la atmósfera. Antes de los años 1770 (está por determinarse si en España o en la Nueva Granada), Mutis leyó la *Theorica verdadera des mares conforme á philosophia do incomparable cavalhero Isaac Newton*, del médico Jacob de Castro Sarmento, publicada en Londres en 1737”.

3 De acuerdo con el relato propio de Mutis en su *Diario de observaciones*, en medio de su “Viaje a Llanogrande”, al llegar a Upito el viernes 23 de marzo recibe un emisario con la solicitud del arzobispo de “pasar al pueblo de Coello, donde estaba Su Ilustrísima” al cual habría llegado “a las cinco de la tarde”. Su estadía con Caballero y Góngora se prolongó una semana. En palabras de Mutis: “Allí nos mantuvimos, sábado, domingo y lunes. [El día] 27, martes, bajamos por el río a la Vega, hacienda del Teniente de Tocaima don Juan Félix de Arellano. Llegamos en hora y media. Nos mantuvimos allí martes, miércoles, jueves y viernes, y el sábado salió Su Ilustrísima por el Santuario para Santafé, y yo por el camino de tierra desde la Vega a Coello (orilla occidental)”.

4 El documento completo y original manuscrito de 33 folios se puede consultar en el Fondo Soledad Acosta de Samper, en la Biblioteca del Gimnasio Moderno de Bogotá (**Mutis**, 1777).

5 Esta “M”, en ambos casos en este corchete, podría referirse a la “Mañana”, puesto que más adelante, en el Día 8, Mutis la reemplazó por una “T”, después del mediodía, que podría referirse a la “Tarde”.

6 Resplandores y fragores.

Matemáticas

Artículo de revisión invitado

Algunos elementos históricos específicos sobre la evolución de la Educación matemática como disciplina de investigación

Some specific historical elements on the evolution of 'Mathematics Education' as a research discipline

 Bruno D'Amore

Accademia delle Scienze di Bologna, classe di Matematica; Doctorado en Educación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia; Grupo de investigación Nucleo di Ricerca in Didattica della Matematica, Departamento de Matemática, Universidad de Bolonia, Italia

Resumen

En el mundo universitario italiano la denominada Educación matemática forma parte del área científica disciplinaria "MAT 04" y sus cursos se imparten en todas las universidades en distintos niveles académicos: en las facultades de ciencias y las carreras de formación de profesores de escuela primaria, así como en las maestrías y doctorados de investigación. En este artículo se trazan las líneas de la evolución histórica de la disciplina a nivel internacional y se da cuenta de sus antecedentes, en un intento por explicar cuáles son sus condiciones actuales.

Palabras clave: Educación matemática; Historia de la educación matemática; Educación matemática como campo matemático; Educación matemática como teoría científica.

Abstract

The discipline "Mathematics Education" is part, in the Italian university world, of the "MAT 04" disciplinary scientific area; courses in this discipline are held in all Italian universities at various academic levels: Faculty of Science, degree courses for the training of primary school teachers, masters and research doctorates. In this conference the international lines of the historical evolution of this discipline are traced, with its antecedents, in an attempt to explain what the current conditions are.

Keywords: Mathematics Education; History of Mathematics Education; Mathematics Educations as Mathematics field; Mathematics Education as scientific theory.

Introducción

Aunque es muy joven en el panorama de las disciplinas pertenecientes a la gran familia de la Matemática, hasta el punto de que todavía mucha gente la desconoce o la confunde con otra cosa, la Educación matemática ha alcanzado un estatus científico internacional que le permite ser objeto de investigaciones específicas y, por lo tanto, tema de congresos, evaluaciones, revistas y análisis de expertos, a la par de tantas otras ramas de la Matemática. Como es usual al presentar otras disciplinas relacionadas con este campo, nos pareció oportuno esbozar una breve historia de la Educación matemática, subrayando su controvertido nacimiento y su desarrollo.

El interés de los matemáticos por el problema de la enseñanza y el aprendizaje de la Matemática

El interés de los matemáticos profesionales por el problema del aprendizaje de la Matemática siempre ha existido; basta recordar la leyenda según la cual Euclides (siglos siglo -IV – -III) expulsó al faraón Ptolomeo I (-367 – -283) de su clase porque este esperaba aprender geometría rápidamente y sin esfuerzo. Si avanzamos en el tiempo hasta

Citación: D'Amore B. Algunos elementos históricos específicos sobre la evolución de la educación matemática como disciplina de investigación. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):195-204, enero-marzo de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.2571>

Editor: Fernando Zalamea

Correspondencia:

Bruno D'Amore; bruno.damore@unibo.it

Recibido: 22 de febrero de 2024

Aceptado: 26 de febrero de 2024

Publicado en línea: 19 de marzo de 2024



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

el siglo XVIII, encontramos en la *Encyclopédie* algunas preguntas relativas a la cuestión: ¿Qué significa “sencillo de entender”? ¿Es lo “sencillo” un hecho absoluto o relativo? ¿Lo “sencillo” es lo mismo para el científico que para un niño que aprende? ¿O existe alguna diferencia? Si es así, ¿cuál es? A estos interrogantes intentaron responder incluso Jean-Baptiste Le Rond D'Alembert (1717–1783) y Denis Diderot (1713–1784), especialmente en sus artículos *Analysis (Analyse)*, *Synthesis (Synthese)*, *Method (Methode)* y *Elements of science (Elemens des sciences)*, que, en nuestra opinión, constituyen una aproximación temprana al estudio de una didáctica específica, que difiere de los intereses generales de la Pedagogía y tiene la especificidad propia del objeto de conocimiento involucrado. Nos parece extraño e interesante cómo este debate didáctico hace pasar a D'Alembert de una posición enteramente cartesiana a una lockeana, y cómo luego intenta conciliar las dos: «Las ideas simples pueden reducirse a dos especies: una de ideas abstractas (...) La segunda especie de ideas simples está contenida en las ideas primitivas que adquirimos a través de nuestras sensaciones».

La comisión Lichnerowicz, la “matemática moderna” y el triunfo del lenguaje de conjuntos

Ya en nuestros tiempos, el 12 de abril de 1961, durante la misión Vostok 1, Yuri Gagarin (1934-1968) dio por primera vez en la historia una vuelta alrededor de la Tierra, con lo que el mundo entero tuvo que reconocer la evidente superioridad rusa a nivel tecnológico y científico. Como consecuencia inmediata de este evento, muchos países decidieron renovar radicalmente sus currículos escolares, especialmente en lo que se refería a la Matemática. En dicho contexto, en 1967 el famoso matemático y físico de ascendencia polaca André Lichnerowicz (1915-1998) fue invitado por el gobierno francés a presidir una comisión cuya tarea era reformular desde cero, no sólo el sistema nacional de currículos escolares de Matemática, sino también los temas y los métodos de su enseñanza. La comisión, conocida como la comisión Lichnerowicz, integró a 18 profesores de Matemática elegidos entre los nombres sugeridos por las distintas comunidades locales. Tras unos meses de trabajo, la comisión hizo varias recomendaciones, entre las que se destacaba la propuesta de un currículo basado enteramente en la enseñanza de la teoría de conjuntos, lo que permitía una introducción a las estructuras matemáticas desde el inicio de la escuela primaria. Dicha concepción, conocida con el nombre de “nuevas matemáticas”, fue aceptada en muchos otros países alrededor del mundo.

La inspiración matemática detrás de estas sugerencias provenía del llamado movimiento Bourbaki, activo en Francia, con gran éxito científico, desde 1935 hasta 1983, lo que, aunado al gran prestigio del presidente de la comisión, desembocó en la aceptación inmediata de sus recomendaciones por parte de los profesores de Matemática franceses y del Ministerio de Educación Nacional de aquel país. Así, la idea de cambiar radicalmente la enseñanza de la Matemática a partir de la escuela primaria se extendió por Europa y varios otros continentes. Este cambio sustancial se centró en una teoría de conjuntos “ingenua”, que concebía un conjunto como una “colección” de elementos similares en un sentido estrictamente concreto. En realidad, esta “carrera por los conjuntos” era sólo la arista ostensible de una visión más amplia de la Matemática básica que se denominó de diversas maneras según los países: “nuevas Matemáticas” o “Matemáticas modernas”, entre otras.

Esta carrera por los conjuntos en la Matemática escolar tuvo la buena fortuna de acompañarse de numerosos materiales, los así llamados “materiales estructurados” y, además, de las teorías del matemático Zoltan Dienes (1916-2014) y el psicólogo Jerome Bruner (1915-2016). En su libro *Hacia un teoría de la instrucción* (Bruner, 1966), este último sostiene que la estructura misma del conocimiento debe desarrollarse en la mente de los estudiantes y que en la Matemática en particular no hay que centrarse sólo en las habilidades mecánicas o algorítmicas, ni limitarse a dar información simple: hay que estructurar la mente exactamente como se estructura la Matemática para así poder incorporar las piezas individuales en esa estructura ya existente.

La proliferación de herramientas para la enseñanza de la Matemática

Como ya se mencionó, el surgimiento de las Matemáticas modernas impulsó a muchos autores a crear herramientas consideradas efectivas, indispensables e infalibles para su enseñanza. Entre las más famosas y difundidas pueden mencionarse los bloques lógicos de Zoltan Dienes para la enseñanza de la lógica de conjuntos; las regletas de colores de Georges Cuisinaire (1891-1975), que Caleb Gattegno (1911-1988) desarrollaría plenamente y difundiría como elementos básicos de la aritmética; el minicomputador de Georges Papy para el cambio automático de base diez a base dos; el instrumento musical de cuatro cuerdas de Zoltan Dienes para “experimentar el álgebra con acciones corporales”, y muchos otros que siguen elaborándose —a veces con efectos ilusorios y a menudo con errores matemáticos—.

En este sentido, vale la pena repasar algunas notas críticas generales que fueron recogidas entre los años 1975 y 1986 en los estudios de Guy Brousseau. Por ejemplo, los bloques lógicos de Dienes están formados por figuras geométricas elementales de diferentes formas, tamaños y colores. Supongamos que un estudiante aprende que la intersección entre el conjunto de bloques amarillos y el de bloques redondos conforma el conjunto de bloques amarillos redondos. Ello no significa que haya aprendido lógica, ni siquiera el concepto de intersección entre conjuntos, lo que puede comprobarse fácilmente al cambiar los bloques por números, objetos concretos u otra cosa: el estudiante no reconoce la situación, que para el adulto es obviamente análoga, pues ha aprendido la intersección en *ese contexto dado*, pero no sabe cómo generalizarla ni utilizarla en otras circunstancias. Como en su momento anotaron profesores experimentados y críticos, el niño aprende “en una cámara sellada”, mejor dicho, la transferencia cognitiva no ocurre automáticamente, porque el verdadero aprendizaje conceptual requiere el cambio del aprendizaje abstracto en determinadas condiciones a la conceptualización general, lo que se logra gracias a la competencia didáctica del docente.

Los inventores de estos juegos creen, por el contrario, que el cambio hacia la generalización es espontáneo, como podría serlo en el caso de un adulto. El maestro mismo queda desplazado, no sabe exactamente qué se espera de los estudiantes y de su aprendizaje, así, sigue los consejos del célebre y famoso educador matemático y no sabe reconocer los aprendizajes que han tenido lugar, o, peor aún, termina aceptando las palabras y comportamientos que sabe que son los esperados como si fueran un aprendizaje genuino, sin siquiera saber por qué.

Dienes inventó el lema de *la mathématique vivante*, con el cual abogaba por llevar a los estudiantes a “hacer” (Dienes, 1972), pues, en su opinión, al actuar de manera física, corporal, estos asimilaban y aprendían, incluso sin querer, sin darse cuenta. En este contexto, Dienes había creado un instrumento musical de cuatro cuerdas con el que creaba estructuras algebraicas que el niño aprendía y hacía suyas con juegos, acciones y movimientos apropiados. Este instrumento, según él, garantizaba la formación tácita de habilidades y conocimientos que luego podrían ser utilizados en la práctica escolar. A ello respondió Guy Brousseau denunciando la inanidad de tales aseveraciones y creando la investigación moderna en Educación matemática. Unos años después de esta primera reacción, afirmaría que “no hay aprendizaje sin conciencia, sin voluntad explícita de aprender”.

George Cuisinaire, por su parte, creó regletas de colores que Caleb Gattegno desarrolló como bonitos prismas partiendo de un cubo unitario blanco, que representaba la unidad (1), hasta un prisma unitario de color marrón claro, que representaba el 10, y se obtenía superponiendo sendos cubos de otros colores. En los primeros años de la escuela primaria, en lugar de trabajar con los números mismos (denunciados como “demasiado abstractos”), el pequeño estudiante trabajaba directamente con estos objetos coloridos y atractivos. El creer que es más fácil entender la operación “verde más amarillo es igual a marrón” que $3+5=8$, sigue siendo un misterio, pero semejante sinsentido invadió el mundo entero y durante décadas los niños jugaron con estos objetos de color. Por

supuesto, ningún cubo o prisma pequeño podía representar el cero, que, así, quedaba excluido de la aritmética de los números naturales, de manera que, por ejemplo, era imposible restar 5 de 5.

Georges Papy se hizo famoso internacionalmente por sus reglas cromáticas para dibujar los óvalos con los que se representan los conjuntos. Los profesores y los niños quedaba encantados de poder jugar con colores y seguir aquellas reglas tan fáciles de entender, pero alejadas de cualquier sentido semiótico o matemático. Papy también fue famoso por la minicalculadora que llevaba su nombre, la cual permitía hacer cálculos en base binaria recurriendo únicamente a un pequeño cuadrado de cartón dividido por las medianas en cuatro cuadrados más pequeños de cuatro colores diferentes. Esta herramienta lúdica transformaba fácilmente escritos en base diez en escritos en base dos mediante puras transformaciones automáticas de la escritura sin que se comprendiera su significado. Dienes y Papy viajaron por todo el mundo presentando triunfalmente sus divertidas creaciones y difundiendo la “matemática moderna”.

El rechazo de importantes matemáticos a la “matemática moderna”

A partir de 1970 comenzaron a hacerse evidentes las críticas a estas hipótesis didácticas. En ese año se publicó el célebre artículo *Les mathématiques modernes: une erreur pédagogique et philosophique?* del matemático **René Thom** (1970), quien en 1958 había ganado la prestigiosa Medalla Fields, por lo que las repercusiones de su incursión en este campo no fueron en absoluto despreciables. En su breve artículo hacía un análisis muy crítico, que reavivó el interés de los matemáticos por los problemas de la Educación matemática, y cuyos planteamientos reiteró con vehemencia en 1972 durante el II Congreso Internacional sobre Educación Matemática celebrado en Exeter, Inglaterra (**Thom**, 1973). Un nuevo y duro golpe provino de otro personaje famoso, el historiador estadounidense de la matemática **Morris Kline** (1973). Su obra *Why can't Johnny add?* tenía un subtítulo explícito: *The failure of the New Mathematics*. Tras el ataque de los matemáticos vino también el de los psicólogos, que no consideraban en absoluto convincente la teoría de los números de Piaget, tenida por muchos como la base de las matemáticas modernas.

En oposición a las “nuevas matemáticas”, a mediados de los años 80 surgieron en el mundo diversos proyectos educativos basados en una nueva visión de la investigación en la enseñanza de la aritmética y los números. La idea de ordinal y del número dentro de la recursión, cobró nueva vida, así como del número pensado como término del lenguaje para nombrar, el número en sus significados temporales, en el uso del dinero, etc. Tales planteamientos fueron incorporados al reformularse los planes de estudio nacionales de aritmética, especialmente los de las escuelas primarias, en varios países. En la escuela italiana, por ejemplo, en el currículo nacional de 1985, en lugar de conjuntos se plantea lo siguiente con respecto a la aritmética: “El desarrollo del concepto de número debe estimularse aprovechando al máximo las experiencias previas de los alumnos en el conteo y el reconocimiento de símbolos numéricos elaborados en el contexto del juego y de la vida familiar y social. Hay que tener en cuenta que la idea de número natural es compleja y, por lo tanto, requiere de un enfoque que haga uso de diferentes puntos de vista (ordinalidad, cardinalidad, medida, etc.); su adquisición tiene lugar en niveles cada vez más altos de internalización y abstracción a lo largo de todo el curso de la escuela primaria y más allá” (traducción del autor) (**Decreto del Presidente della Repubblica-D.P.R. 104**). Es obvio que estas palabras se inspiraron en la historia que hemos resumido.

Lo mismo puede decirse del punto de inflexión histórico en los planes de estudios franceses (incluso los de 1985, que ya no están vigentes), los cuales giraban previamente en torno a la teoría de conjuntos, que ya no se menciona, como tampoco se hace referencia a los conjuntos en el currículo nacional británico de 1988, el cual incluía, sobre todo, indicaciones sobre los objetivos mínimos de aprendizaje.

Un caso específico: Italia y las matemáticas modernas

En 1974 el Ministerio de Educación italiano creó los institutos regionales de investigación educativa (IRRE), como expresión concreta del deseo y la necesidad de renovar todos los aspectos de la enseñanza en Italia, no sólo desde un punto de vista burocrático administrativo, sino también en lo que se refería a las disciplinas específicas. Los IRRE se concretaron en los institutos regionales de investigación, experimentación y actualización educativa (IRRSAE), uno de los cuales, el de la región de Emilia-Romaña, quedó bajo la dirección de Zoltan Dienes. Fue este un momento de gran euforia, que se extendió desde mediados de los años 80 hasta el 2005, periodo en que comenzaron a realizarse cursos de formación en todas las regiones y a crearse grupos experimentales con la intención de renovar radicalmente las prácticas de enseñanza de la Matemática desde todos los puntos de vista, lo que generó la necesidad de los llamados nuevos programas de escuela elemental, es decir, el nuevo currículo de la escuela primaria, emitidos en 1985. Gracias a experiencias y experimentaciones concretas, salieron a la luz varios proyectos específicos de formación de profesores de primaria totalmente novedosos, como el proyecto de Matemáticas escolares elementales, que se publicaron en varios volúmenes, especialmente entre 1986 y 1989.

El evento de Cognola y los primeros signos de la revuelta italiana contra las “matemáticas modernas”

En 1908, durante el Congreso Internacional de Matemáticos, se creó en Italia la Comisión Internacional de Educación Matemática (ICMI), la cual operó con ese nombre hasta 1955, cuando apareció la Comisión Italiana para la Enseñanza de la Matemática, cuya sigla, CIIM, fue oficialmente presentada en 1963 en el marco de la Unión Matemática Italiana (UMI), convirtiéndose en 1975 en una de sus comisiones permanentes. Esta cronología demuestra el interés real de los matemáticos y científicos por la escuela y la enseñanza de la disciplina y, aunque no fueron muchos los investigadores universitarios que decidieron abordar este tipo de problemas como objeto de su investigación científica, tampoco fueron pocos.

Para dar una señal de vitalidad y reforzar el interés en este campo, la Unión Matemática Italiana, presidida por el analista florentino Carlo Pucci (1925-2003), decidió celebrar en Cognola (Trento), del 7 al 11 de octubre de 1980, la conferencia internacional *Cognitive processes of mathematics at the primary school level*, la cual fue financiada con fondos del Consiglio Nazionale delle Ricerche-CNR. Como ponentes fueron invitados los más famosos estudiosos extranjeros de los problemas educativos relacionados con la enseñanza de la Matemática, entre ellos Zoltan Dienes, George Papy, Frédérique Papy (1921–2005), Zofia Krygowska (1904–1988) y Efraim Fischbein (1920–1998), así como jóvenes matemáticos italianos dedicados a la investigación en Matemática en las universidades, pero interesados, o al menos intrigados, por el tema de su enseñanza en las escuelas, quienes asistieron no sólo como oyentes, sino también para presentar sus reportes.

En esa ocasión Dienes y Papy evidenciaron sus debilidades científicas y metodológicas como investigadores ante la posición crítica de los jóvenes científicos. Por el contrario, Efraim Fischbein impresionó a todos los participantes, hasta el punto de que, durante años, colaboró con numerosos centros italianos de investigación educativa en la realización de investigaciones muy apreciadas. Fischbein había fundado el International Group for the Psychology of Mathematics Education (PME) en 1976 durante el *International Congress on Mathematical Education* (ICME-3) en Karlsruhe, después de concebir, construir y proponer como campo de investigación específicamente didáctico la fascinante y convincente teoría de los conceptos figurativos a principios de los años 60. Esta se había publicado en rumano en 1963 (Fischbein, 1963), pero fue ignorada por el mundo académico de entonces y sólo 30 años después fue traducida al inglés (Fischbein, 1993), momento en que obtuvo el éxito internacional que merecía.

Como ya se mencionó, en 1908 se fundó en Roma la Comisión Internacional de Educación Matemática, cuyo primer presidente fue Felix Klein (1849-1925), en tanto que el Congreso Internacional nació en 1969 por iniciativa del presidente de la ICME Hans Freudenthal (1905-1990), quien tenía un notable interés en la enseñanza de la Matemática en la escuela. En otras palabras, la atención de los matemáticos hacia la enseñanza de esta disciplina en la escuela siempre ha existido, aunque sin la orientación actual de considerarla también como un dominio de investigación científica dentro de la propia Matemática.

En ese sentido, el congreso nacional *Incontri con la Matematica 6*, celebrado en Castel San Pietro Terme (Bologna) del 13 al 15 de noviembre de 1992, tuvo como únicos ponentes a Efraim Fischbein y Gérard Vergnaud (1933-2021), otro gran estudioso de la Educación matemática, lo que puede considerarse como una señal de cuánto habían cambiado las cosas en el campo de la investigación en Educación matemática desde los tiempos de la “matemática moderna”: finalmente se podía hablar de una investigación científica real.

Guy Brousseau y el nacimiento de la Educación matemática

Desde los primeros años de las llamadas nuevas matemáticas, el maestro de escuela primaria francés Guy Brousseau, estudiante de Matemática y luego profesor universitario de esta materia en Burdeos, luchó vigorosamente contra esa concepción distorsionada que se había impuesto en el mundo. En efecto, Brousseau propuso la posibilidad de una investigación científica matemática seria en el campo educativo escolar. Con el paso de los años, mediante sus estudios y publicaciones, la idea se concretó en diversos grupos de investigación que poco a poco fueron formándose en el mundo y, por esa vía, interesó a los docentes. Aquí se ha expuesto sobre todo lo que pasó en Italia, pero la situación fue similar en muchos otros países. El que en nuestra opinión es su texto más significativo y definitivo, *Recherches en Didactique des Mathématiques* (Investigaciones en Educación matemática), publicado por **Brousseau** en 1986, lleva el nombre de la disciplina que concibió.

Brousseau fue indudablemente el creador de las tesis que, respaldadas principalmente por los resultados de investigaciones empíricas, constituyeron el fundamento de la disciplina científica que actualmente se denomina Educación matemática, la cual no debe confundirse con cuestiones orientadas meramente por un supuesto sentido común, o por ideas personales relacionadas con la enseñanza y sus nuevos caminos, o por la creación de juguetes para dicha enseñanza, y otros planteamientos de esta suerte. La diferencia y la relación entre la enseñanza y el aprendizaje son ahora un dominio enteramente compartido por investigadores rigurosos que no se limitan a proponer ideas basadas en sus intuiciones u opiniones. No sería apropiado tratar de resumir los profundos y revolucionarios resultados de la investigación de Brousseau en unas pocas líneas, nos limitamos aquí a hacer una lista de los principales temas en los que se basó su investigación científica en esta disciplina: la teoría de situaciones, los obstáculos, el modelo del triángulo didáctico, la transposición didáctica, la ingeniería didáctica, y otros. Cientos, incluso miles de investigadores en Educación matemática en todo el mundo han trabajado sobre los asuntos presentados por Brousseau, confirmándolos y profundizándolos, como los pilares de la estructura básica de la investigación actual, lo que garantiza a los evaluadores de las revistas, enlaces y referencias para emitir valoraciones que no sean sólo expresión de pensamientos y juicios personales. El legado de Brousseau obtuvo un merecido reconocimiento en la concesión que en el 2003 le hiciera la Comisión Internacional de Educación Matemática de la primera Medalla Felix Klein en este campo.

La decadencia definitiva de las ideas de Dienes, Papy y la “matemática moderna”

En 1970 George Papy creó y dirigió hasta 1991 un grupo de estudio e investigación, el Groupe International de Recherche en Pédagogie de la Mathématique (GIRP), con sede oficial en Walferdange (Luxemburgo). Durante la conferencia de 1991 en Locarno, se eligió otro presidente y en 1994 el grupo se disolvió.

Por otra parte, la fama de Dienes aún persistía a principios de los 90 en diversas zonas de Italia, especialmente en Romaña, gracias, sobre todo, a un grupo de directores de educación que había sido formado por él en la región. El 8 de mayo de 1993 estos organizaron en Forlì un encuentro-debate entre el propio Dienes y un exponente de las nuevas ideas de Educación matemática surgidas en Francia, pero que entonces ya se habían difundido en todo el mundo. En aquella ocasión el propio Dienes reconoció la decadencia de sus ideas. Así desaparecieron, después de un efímero auge, tanto la teoría de conjuntos para enseñar la matemática desde la escuela primaria hasta la llamada “matemática moderna”. Sin embargo, todavía muchos profesores creen en la eficacia de sus trucos ilusorios y siguen apareciendo supuestos expertos que los crean y los comercializan. El CIIM y otras organizaciones científicas de gran importancia han criticado estas artimañas engañosas, a menudo llenas de errores matemáticos, pero aquellos profesores que nunca han tomado cursos serios de formación en Educación matemática son presa fácil de estas ilusiones insustanciales.

Otras entidades y eventos en Italia

Financiadas inicialmente por el CNR y posteriormente también por el MIUR, se crearon en Italia las unidades de investigación en Educación matemática (*Nucleo di Ricerca*, NRD) a principios de la década de 1980, como parte de los departamentos de Matemática de las universidades. La idea era crear vínculos de análisis e investigación entre los matemáticos que enseñaban en universidades y los maestros de escuela de todos los niveles interesados en la investigación y no sólo en la experimentación. La idea fue acogida con notable entusiasmo como una excelente oportunidad para poner en conocimiento de los profesores de las escuelas italianas y extranjeras los resultados de la investigación de la ya consolidada disciplina de Educación matemática, en claro contraste con las banalidades que hemos comentado. En este contexto, se destacan los muchos encuentros entre núcleos que se organizaron en toda Italia para el intercambio de información sobre los resultados de la investigación, los cuales contaron con una gran participación de profesores universitarios y docentes de las escuelas.

Muchas de las actividades llevadas a cabo en esta área se publicaron como estudios científicos con resultados concretos. Además, en el seno de los NRD nacieron revistas de investigación en este campo específico que siguen activas en la actualidad, entre ellas, *L'insegnamento della matematica e delle scienze integrate*, activa desde 1970 (aunque inicialmente con otro nombre muy similar), y *La matematica e la sua didattica*, creada en 1986. Asimismo, se organizaron varios congresos nacionales con el objetivo de dar a conocer los resultados de las investigaciones de los núcleos y discutir los hallazgos de experimentos docentes exitosos, no sólo entre los investigadores universitarios, sino entre todos los profesores de Matemática. Entre estos vale la pena mencionar los congresos nacionales *Incontri con la Matematica* (Encuentros con la Matemática) que comenzaron a convocarse en 1986, siendo el primero en Bolonia y el último, el XXXVII, en 2023 en Castel san Pietro Terme, y han constituido una oportunidad para presentar ante el público de profesores italianos a los investigadores internacionales más prestigiosos e interesantes. La proliferación internacional de actividades, revistas y congresos ha sido muy notable a partir de los años 80, hasta el punto de que hoy son innumerables.

Por otro lado, los cursos de posgrado de dos años convocados entre 1999 y 2010 con el nombre de *Schools of Specialization for Secondary Education* (SSIS) fueron vehículos formidables y exitosos de la formación de los futuros profesores de Matemática para las escuelas secundarias, en tanto que los futuros profesores de educación preescolar y primaria comenzaron a formarse en carreras de cinco años que incluían cursos específicos de Matemática en el marco de las facultades de ciencias de la educación de las universidades italianas. Estos dos programas lograron los mejores resultados cuando los profesores universitarios responsables de las clases eran expertos en Educación matemática.

A pesar de todo lo anotado, algunos colegas ignoran la historia que hemos trazado aquí y confunden la investigación en Educación matemática con sus propias ideas, certezas y cándidas intuiciones, sin enterarse de que existen investigaciones científicas reales en

este ámbito, lo que los lleva a confundir la Educación matemática con la divulgación de la matemática, que si está bien hecha y es seria, no hace daño, pero sin tenerla por lo que no lo es.

Breves notas sobre los estudios de Brousseau como base para entender la Educación matemática en tanto teoría científica

Si se puede dar un nombre único pero significativo a las investigaciones iniciadas por Brousseau, este sería el de “teoría de las situaciones”. Se trata de una teoría múltiple muy compleja, que evolucionó lentamente hacia formas y direcciones novedosas hasta consolidarse en la disciplina que hoy conocemos como Educación matemática, denominación cuyas variaciones de significado no detallamos aquí (*Didactique des Mathématiques*, *Didattica della Matematica*, *Educación matemática*, *Matemática educativa*, *Educação matemática*, *Mathematikdidaktik*, etc.).

Estamos más que convencidos de que hoy la Educación matemática debe ser aceptada cabalmente como una teoría científica que reúne todos los requisitos para serlo, especialmente en la investigación. Ahora bien, no vamos a abordar aquí la pregunta sobre las características que debe tener una teoría para considerarse “científica”, nos limitaremos a referenciar a autores célebres y sus ideas más conocidas: el paradigma y las revoluciones, de **Thomas Kuhn** (1957); la ciencia como sistema específico de conocimiento, de **Mario Bunge** (1960); el programa de investigación, de **Imre Lakatos** (1978); la ciencia como expresión de una sociedad específica coherente, de **Thomas Albert Romberg** (1983), y la ciencia como un conjunto coherente de principios, preguntas de investigación y metodología, de **Luis Radford** (2021), entre otros.

Recordemos que en la lista de disciplinas matemáticas universitarias de Italia la Educación matemática aparece en el área científica disciplinaria “Mat 04 Matemáticas complementarias”, la cual también incluye la historia de la Matemática y las Matemáticas elementales. Hemos observado que las aproximaciones construidas a partir de la teoría de situaciones, a menudo tienen objetivos diferentes, lo que, a pesar de haber sido aceptadas con interés y curiosidad en el panorama internacional de la investigación, ha impedido que reemplacen las teorías anteriores. En nuestra opinión, las relaciones entre las teorías o investigaciones que resaltan analogías o contrastan los resultados de las investigaciones empíricas, es uno de los temas más fascinantes de las investigaciones actuales (**D'Amore & Fandiño-Pinilla**, 2017).

La Educación matemática como matemática aplicada

La Educación matemática es, por lo tanto, una disciplina perteneciente al vasto dominio de la Matemática y, en nuestra opinión, uno de los muchos componentes de la llamada “Matemática aplicada”, es decir, una rama de esta disciplina que se ocupa del estudio de las técnicas matemáticas utilizadas en la aplicación del conocimiento matemático a otros campos científicos y técnicos, lo que para muchos constituye una confirmación más del poder y el éxito de la Matemática aplicada, como lo ha manifestado el físico y matemático húngaro naturalizado estadounidense Eugene Paul Wigner (1902-1995) en su famoso y valioso libro de divulgación publicado por primera vez en 1960 con el significativo título de *The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences* (**Wigner**, 1960). También sugerimos, para confirmar nuestra posición, la lectura esclarecedora de la muy breve historia de la Matemática aplicada de **Stolz** (2002).

Un buen ejemplo del reconocimiento oficial de esta visión de los investigadores en Matemática aplicada fue, en nuestra opinión, la reunión conjunta UMI-SIMAI/SMI-SMF bajo el título *Mathematics and its applications*, celebrada en el Departamento de Matemática de la Universidad de Turín en julio de 2006. La brillante idea, seguramente debida a Ferdinando Arzarello, de dedicar un espacio específico de ese encuentro a las aplicaciones de la Matemática a la Educación matemática, despertó mucha curiosidad e interés entre los participantes. Los textos de las conferencias y seminarios impartidos por

los distintos invitados, se publicaron íntegramente en el número 1 del volumen 21 de la revista trilingüe *La matematica e la sua didattica* (abril de 2007) (D'Amore & Fandiño-Pinilla, 2007).

En todo este tiempo, se han desarrollado numerosos estudios teóricos basados en los resultados de las muchas investigaciones empíricas, estudios y análisis específicos orientados a resaltar las diferencias entre estas teorías. De todas maneras, las nuevas teorías nacen con objetivos precisos, no sólo para absorber o incluir las anteriores, sino también para estudiar factores que estas pasaron por alto, o hechos que no eran de su interés (D'Amore, 2007).

Conclusión

Son muchos los aspectos de la Educación matemática que podrían detallarse a partir de las numerosas contribuciones a la investigación en este campo, provenientes de universidades y centros de investigación de todo el mundo, pero ello sería objeto de un trabajo mucho más extenso, que destacara, por ejemplo, las características de las diferentes líneas evolutivas aparecidas. Aquí, sin embargo, se trató de hacer sólo un resumen alentado por el deseo de resaltar las características del nacimiento de una teoría que primero tuvo que lidiar con premisas acientíficas, basadas en intuiciones y opiniones más que en reflexiones analíticas científicas.

Referencias

- Brousseau, G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en Didactiques des Mathématiques*, 7(2), 33-115.
- Bruner, J. S. (1966). *Towards a Theory of Instruction*. Cambridge University Press.
- Bunge, M. (1960). *Science, its method and its philosophy*. Eudeba.
- D'Amore, B. (2007). Mathematical objects and sense: how semiotic transformations change the sense of mathematical objects. *Acta Didactica Universitatis Comenianae*, 7, 23-45.
- D'Amore, B. & Fandiño-Pinilla, M. (2007). How the sense of mathematical objects changes when their semiotic representations undergo treatment and conversion. *La matematica e la sua didattica*, 21(1), 87-92. [Proceedings of the Joint Meeting of UMI-SIMAI/SMI-SMF: *Mathematics and its Applications*. Panel on Mathematics Education. Department of Mathematics, University of Turin. July 6, 2006].
- D'Amore, B. & Fandiño-Pinilla, M. (2017). Reflexiones teóricas sobre las bases del enfoque ontosemiótico de la Didáctica de la Matemática. En J.M. Contreras, P. Arteaga, G.R. Cañadas, M.M. Gea, B. Giacomone y M.M. López-Martín (Eds.), *Actas del II Congreso Internacional Virtual sobre el Enfoque Ontosemiótico*. Granada, March 23-26, 2017. Proem Editora. <http://enfoqueontosemiotic.ugr.es/civeos.html>
- Decreto del Presidente della Repubblica 12 02 1985, n. 104 (D.P.R. 104). (1985). Approvazione dei nuovi programmi didattici per la scuola primaria. p. 24 *Gazzetta ufficiale*, 76. https://www.edscuola.it/archivio/norme/decreti/dpr104_85.pdf
- Dienes, Z. (1972). *La mathématique vivante*. OCDL.
- Fischbein, E. (1963). *Conceptele Figurale*. Editura Academiei RPR.
- Fischbein, E. (1993). The Theory of Figural Concepts. *Educational Studies in Mathematics*, 24(2), 139-162.
- Kuhn, T. S. (1957). *The Copernican revolution. Planetary astronomy in the development of western thought*. Harvard University Press.
- Kline, M. (1973). *Why Johnny Can't Add: The Failure of the New Math*. St. Martin's Press. <https://doi.org/10.1177/019263657405837820>
- Lakatos, I. (1978). *Philosophical Papers*. Cambridge University Press.
- Radford, L. (2021). *The theory of objectification. A Vygotskian perspective on knowing and becoming in mathematics teaching and learning*. Brill/Sense. <http://dx.doi.org/10.1080/10986065.2021.1984070>
- Romberg, T. (1983). Toward "normal science" in some mathematics education research. *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik*, 15(8), 89-92.
- Stolz, M. (2002). The History of Applied Mathematics and the History of Society. *Synthese*, 133(1), 43-57. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020823608217>

- Thom, R.** (1970). Les mathématiques modernes: une erreur pédagogique et philosophique? *L'Age de la Science*, 3(3), 225-242.
- Thom, R.** (1973). Modern mathematics: does it exist? En A. Howson (Ed.), *Developments in Mathematical Education* (194-210). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139013536.011>
- Wigner, E.** (1960). The unseasonable effectiveness of Mathematics in the Natural sciences. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13(1), 1-14. <https://doi.org/10.1002/cpa.3160130102>

Nota

La versión en inglés del precedente texto fue publicada en la revista *Annales, organo dell'Accademia delle scienze di Bologna*. Licence Agreement CC/BY 4.0, <https://Annalesaccademia.it/sito/category/class-of-physical-sciences/volume-1-2023-ps/>

D'Amore, B. (2023). Some specific historical elements on the evolution of 'Mathematics Education' as a research discipline. *Annales Accademia delle Scienze di Bologna*, 1(1), 23-34. <https://doi.org/10.30682/Annalesps2301c>.

Nota del editor

La Educación matemática, lejos de constituirse en un conjunto de buenas intenciones y prácticas pedagógicas, se ha convertido desde hace unas décadas en una rama del conocimiento científico, adecuadamente reconocida en congresos especializados, y a la que se le dedican anualmente decenas de trabajos de tesis de magister y doctorado.

En este artículo, Bruno D'Amore traza con precisión, distancia y adecuada ironía, la historia de la situación. Marca los inicios del tratamiento científico de la cuestión en la obra de Guy Brousseau, en los años ochenta, pero olvida mencionar que en los últimos veinte años es, entre otros, al nombre de D'Amore a quien se le deben asignar algunos de los avances mayores y la consolidación definitiva de la disciplina. Bruno D'Amore, crítico de arte, ensayista, historiador, matemático, doctor en Educación matemática, puede considerarse como un verdadero *humanista integral* de nuestra época. Recién sublimado en la *Accademia delle scienze di Bologna* y ahora radicado en Colombia, D'Amore sirve de magnífico puente entre esa excelsa Academia y la nuestra. Es un placer y un honor contar con su contribución en este número de la *Revista*.

Fernando Zalamea
Académico honorario
Editor Asociado

Club de revistas

Reseña sobre el artículo

Quiroga, D. E., Currie, C. A.,
Pearse, J. (2024). Lithosphere
Removal in the Sierra Nevada de
Santa Marta, Colombia. *Journal
of Geophysical Research: Solid
Earth*, 129(1), e2023JB027646.

La Sierra Nevada de Santa Marta, una topografía dinámica

The Sierra Nevada de Santa Marta, a dynamic topography

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es un macizo rocoso aislado de la cordillera de los Andes. Su topografía comienza en la costa del mar Caribe hasta alcanzar una altura de más de 5.500 m s.n.m., cubriendo casi todos los pisos térmicos. ¿Qué procesos geológicos permitieron que la SNSM tenga estas características? ¿Qué hace que este macizo mantenga su altura tan cerca a la costa?

La parte más superficial del planeta Tierra está conformada por dos capas. La capa más externa, la litósfera, es una capa elástica, fría, sobre la cual estamos parados. Debajo de la litósfera está una capa más densa, la astenósfera, que se comporta de forma dúctil por el aumento de la temperatura y presión, por lo cual las rocas pueden fluir. En la práctica, la litósfera (10-100 km de espesor) se comporta como un material elástico. Cuando se le aplica un esfuerzo se deforma, pero vuelve a su forma original, como la tabla de una mesa o una regla. Si el esfuerzo supera cierto límite, se rompe de forma frágil y genera terremotos. La astenósfera (50-200 km de espesor), en cambio, responde fluyendo lentamente al sentir un esfuerzo y su resistencia a la deformación es mucho menor que la de la litósfera.

Debido a su peso, la litósfera ejerce una fuerza gravitacional sobre la astenósfera y dada su menor densidad, tiene flotabilidad. Puesto que puede fluir, la astenósfera siempre está buscando el equilibrio entre peso y flotabilidad, lo que se conoce como equilibrio isostático. Si la litósfera se hace más gruesa, o más densa, o se acumula una gran cantidad de sedimentos en una cuenca, la astenósfera responderá permitiendo un reacomodamiento para que el equilibrio se mantenga.

Aunque la analogía no debe ser tomada literalmente, puede emplearse el ejemplo de un bloque de madera que flota en un vaso de agua (**Figura 1**). El peso del bloque ejerce un esfuerzo sobre el agua, pero su menor densidad hace que flote. El equilibrio se da cuando el 25 % del bloque está por debajo del nivel del agua y el 75 % por encima. Si ponemos un peso adicional al bloque de madera, por ejemplo una montaña de plastilina, el 60 % del bloque queda por debajo del agua. Ese exceso de madera en el agua (35 % adicional) es lo que llamamos la raíz de la montaña; dicha raíz soporta el peso adicional de la montaña, lo que se manifiesta en una anomalía gravimétrica negativa de Bouguer.

Al sentir ese esfuerzo adicional, el agua que está debajo del bloque fluye permitiendo que el bloque se “hunda” un poco (**Figura 1C**). La diferencia con la astenósfera es que su viscosidad es 23 órdenes de magnitud mayor que la del agua. Es decir que la búsqueda del equilibrio puede tardar miles o millones de años en la Tierra en vez de los pocos segundos que se toma en el vaso de agua.

Volviendo a la SNSM, ¿cuál es el problema científico? La SNSM tiene una altura máxima de más de 5.500 m s.n.m., pero los datos geofísicos, con una anomalía positiva de Bouguer de >100 mGal, muestran que la montaña no tiene la raíz que esperaríamos. En otras palabras, no está en equilibrio isostático. Entonces, ¿cómo podemos explicar su altura?

Una posibilidad es que la densidad de la columna de rocas de la SNSM sea menor que la típica corteza continental (Montes *et al.*, 2005; Villagomez *et al.*, 2011). Otra posibilidad es que la SNSM sí haya tenido una raíz, pero que esta fuera removida desde la base de la litósfera (Decelles *et al.*, 2015). Cualquiera que sea el mecanismo que resuelva la pregunta científica, debe poder explicar lo que actualmente observamos (altura y anomalía de Bouguer) y debe ajustarse a los procesos dinámicos de la astenósfera en su intento por mantener el equilibrio.

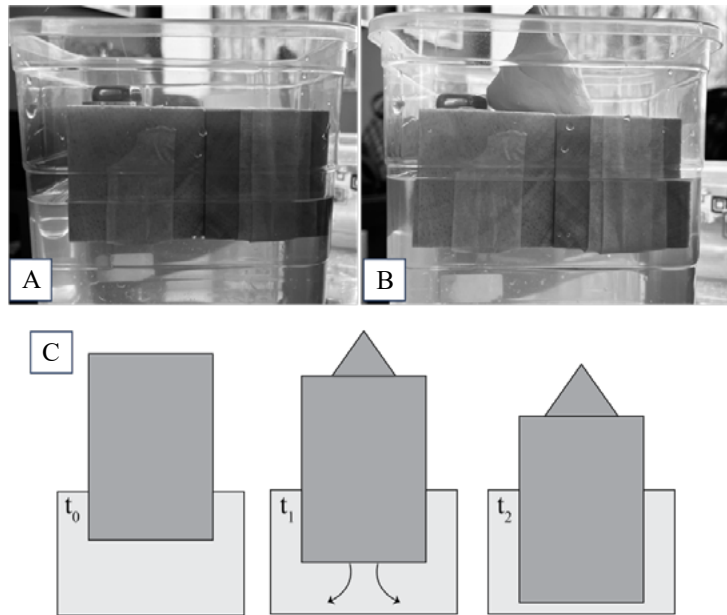


Figura 1. Experimento análogo del proceso isostático de la litósfera (madera) y la astenósfera (agua). **A)** Bloque de madera en equilibrio sobre el agua. **B)** Bloque de madera con una montaña de plastilina en equilibrio sobre el agua. **C)** La respuesta de la astenósfera a un exceso de peso (montaña de plastilina) en un tiempo t_1 es fluir permitiendo que la litósfera (madera) se hunda hasta llegar a un equilibrio en tiempo t_2 . El tiempo entre t_1 y t_2 depende de la viscosidad de la astenósfera (agua).

El trabajo de **Quiroga et al.** (2024) busca explicar a partir de modelos numéricos cómo pudo haber evolucionado el comportamiento de la litósfera y la astenósfera para así tener, al mismo tiempo, la altura de la SNSM y la anomalía positiva de Bouguer. En el primer experimento numérico se propone una SNSM soportada por una raíz en el manto (similar a la **Figura 1B**), lo cual generaría una anomalía de Bouguer negativa. Con el paso del tiempo, la raíz empieza a erosionarse sin efecto apreciable en la topografía, pero, insuficiente para que la anomalía de Bouguer se vuelva positiva.

Este primer resultado sugiere que la erosión de la raíz debe ser más profunda, es decir, que incluya el manto litosférico y parte de la corteza inferior. El problema es que una vez una cadena montañosa pierde su raíz, la topografía debe empezar a hundirse como respuesta al equilibrio isostático, algo que debe ocurrir en cuestión de unos pocos millones de años. Por lo tanto, este proceso de erosión de la raíz debió ocurrir recientemente, o la SNSM debe estar soportada por una litósfera fuerte o un flujo dinámico del manto. Los autores hicieron múltiples variaciones de los modelos para estudiar la influencia de la composición de la corteza y la litósfera, los efectos de la temperatura y la fusión de las rocas, incluso la influencia de fallas regionales alrededor de la SNSM, y replicar así, en lo posible, la configuración actual.

Aunque los diferentes modelos estudiados por Quiroga y sus colegas no son concluyentes en torno a si hubo una erosión de la raíz, y cuándo tuvo lugar, sí muestran que la erosión de la raíz es necesaria para explicar las observaciones. Los modelos evaluados tienen limitaciones. Tal vez la mayor dificultad es que no tienen en cuenta los posibles efectos de la subducción de la placa del Caribe por debajo del norte de Suramérica, un proceso sobre el que cada día hay más evidencia (**Vargas et al.**, 2020; **Corntwhite et al.**, 2021).

Es importante resaltar que todos los modelos estudiados permiten hacer una predicción de observaciones geofísicas (gravimetría, sismología, flujo de calor, etc.) que se esperarían si en el futuro se llevan a cabo campañas de geofísica de campo que puedan descartar

algunos de los modelos propuestos. Es decir, este tipo de modelos pueden contrastarse con nuevos datos en el futuro, de manera que no se tendría únicamente una hipótesis de la evolución de la SNSM sino también una idea de la dinámica de la litósfera y la astenósfera, lo que implica una comprensión más completa de la geología de nuestro país que combine la información geológica, la geofísica y los modelos.

Germán A. Prieto

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

Referencias

- Cornthwaite, J., Bezada, M. J., Miao, W., Schmitz, M., Prieto, G. A., Dionicio, V., Niu, F., Levander, A.** (2021). Caribbean slab segmentation beneath northwest South America revealed by 3-D finite frequency teleseismic P-wave tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(4), e2020GC009431. <https://doi.org/10.1029/2020gc009431>
- DeCelles, P. G., Carrapa, B., Horton, B., McNabb, J., Gehrels, G. E., Boyd, J.** (2015). The Miocene Arizaro basin, central Andean hinterland: Response to partial lithosphere removal? *Geological Society of America Memoir*, 212, 359-386. [https://doi.org/10.1130/2015.1212\(18\)](https://doi.org/10.1130/2015.1212(18))
- Montes, C., Bayona, G., Jaramillo, C., Ojeda, C., Molina, M., Herrera, F.** (2005). Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar- Rancheria valley: Rigid-beam pivot model. Sixth International Symposium of Andean Geodynamics (January) (pp.520-523).
- Quiroga, D. E., Currie, C. A., Pearse, J.** (2024). Lithosphere Removal in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(1), e2023JB027646.
- Vargas, C. A.** (2020). Subduction geometries in Northwestern South America. In J. T. Gómez & A. O. Pinilla-Pachón (Eds.), *The geology of Colombia*, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.11>
- Villagómez, D., Spikings, R., Mora, A., Guzmán, G., Ojeda, G., Cortés, E., Lelij, R. V. D.** (2011). Vertical tectonics at a continental crust - Oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Tectonics*, 30(4), TC4004. <https://doi.org/10.1029/2010TC002835>

Ensayo/Assay

Un espacio propio compartido

A Shared Space of One's Own

Cuando en el año 1928 se le pidió a la autora británica Virginia Woolf que hablara sobre la mujer y la ficción, intervención publicada luego como ensayo con el título *Una habitación propia*, ella concluyó que para escribir una mujer necesita dinero y una habitación propia. Sólo así tiene la libertad de trabajar sin la interrupción de las labores consideradas típicamente femeninas. Esta autonomía, poco frecuente en la época y menos aún en décadas anteriores, permitiría a las mujeres contribuir libremente al crecimiento intelectual que hasta ese momento había sido dominado por los hombres. En esencia, se necesita tiempo, espacio y capital para poder escribir o, como nos concierne a nosotros, investigar y publicar.

Varias décadas más tarde, en el mismo siglo XX, y pese a haber conquistado nuevas oportunidades laborales y educativas, la mujer todavía estaba relegada a un segundo plano en un área dominada por hombres: la ciencia. Muchas mujeres científicas han sido marginadas, ignoradas u olvidadas, pese a contribuciones cruciales, una omisión que algunos consideran sistemática (Lamm, 2023). Este es el caso de la microbióloga Esther Lederberg. Esther nació en 1922 en Nueva York, Estados Unidos, y completó sus estudios en bioquímica, a pesar de las advertencias sobre las dificultades que tendría al seguir una carrera en la ciencia. No obstante, ella no cejó y contribuyó con ideas fundamentales en torno a procesos celulares tan importantes como la regulación génica y la recombinación y el intercambio de material genético en bacterias. La pregunta entonces es, ¿por qué no reconocemos su nombre ni su legado?

Esther Lederberg comenzó su carrera a mediados del siglo XX, cuando todavía era inusual que una mujer trabajara en ciencia. Después de graduarse en bioquímica en Hunter College, Nueva York, obtuvo una maestría en Genética en la Universidad de Stanford en 1946 bajo la dirección de George W. Beadle y Edward L. Tatum, investigadores reconocidos por descifrar la conexión entre genes y características bioquímicas, en este caso requerimientos nutricionales, usando mutantes del hongo *Neurospora* (Strauss, 2016). Poco tiempo después contrajo matrimonio con el científico Joshua Lederberg, conocido ya por su trabajo sobre conjugación, proceso en el cual los plásmidos transfieren material genético entre células bacterianas. Juntos llegaron a la Universidad de Wisconsin en Madison donde Esther obtuvo su doctorado en Genética microbiana en 1950. Fue durante estos años que ella hizo avances fundamentales en el campo de la genética bacteriana.

Esther descubrió el bacteriófago lambda (λ), un virus capaz de infectar a la bacteria *Escherichia coli*, que fue fundamental para estudios de genética bacteriana (Lederberg, 1951; Lederberg & Lederberg, 1953). A diferencia de otros fagos que ya se conocían, el fago λ podía infectar la célula hospedera sin causar necesariamente su muerte. Ella demostró que en su ciclo de vida el fago λ podía multiplicarse y romper las células para liberar una progenie de nuevas partículas virales (fase lítica), o permanecer de forma silenciosa como profago integrado en el genoma (fase lisogénica). Bajo ciertas condiciones, este profago se sale del genoma para entrar en fase lítica y producir partículas virales que luego infectan otras células. Junto con su marido Joshua mostró que el fago λ ocasionalmente transfería genes bacterianos contiguos al sitio de integración en el genoma, un fenómeno conocido como transducción especializada. Gracias al conocimiento detallado del ciclo de vida del fago λ , este sirvió de herramienta para entender fenómenos moleculares y genéticos en años posteriores.

El trabajo de Esther también condujo al descubrimiento del plásmido F, llamado inicialmente factor de fertilidad (factor F). Sus experimentos mostraron que algunos cruces entre células de *E. coli* que portaban marcadores genéticos conocidos, no generaban los

recombinantes, o cruces, anticipados. Ella postuló que se debía a la pérdida de lo que llamó un “factor de fertilidad” (**Lederberg et al.**, 1952a). En conjunto con el genetista italiano Luca Cavalli y Joshua, propuso que el factor F era una secuencia bacteriana – después identificada como un plásmido que puede existir de forma libre en el citoplasma celular o integrado en el genoma – capaz de donar ADN a una célula receptora a través de la conjugación. Este plásmido fue también importante para el desarrollo de *E. coli* como organismo modelo en el laboratorio y para avances fundamentales sobre la genética, la evolución y la fisiología bacterianas.

En búsqueda de una estrategia eficiente para replicar bacterias, Esther y su marido desarrollaron una técnica, innovadora en el momento, denominada *replica plating*. Al presionar un terciopelo sobre una placa de Petri con bacterias, ellos lograron recoger las células y transferirlas en la misma configuración a medios con diferentes condiciones de crecimiento. Con esta técnica Esther y su marido confirmaron que las mutaciones ocurrían de forma previa a una presión selectiva, como los antibióticos, y, por lo tanto, eran espontáneas en lugar de generarse en respuesta a una señal o cambio en el ambiente (**Lederberg & Lederberg**, 1952b).

Mientras que Joshua Lederberg fue reconocido con un premio Nobel en 1958, junto con Beadle y Tatum, Esther Lederberg pasó desapercibida. Como ella, muchas investigadoras han sido ignoradas u olvidadas en la historia de la ciencia (<https://www.lostwomenofscience.org>). Esther, a pesar de esta omisión, continuó su carrera científica. Después de su divorcio en 1966, y hasta su jubilación, ocupó un cargo como profesora de Microbiología médica en la Universidad de Stanford, contribuyendo al campo aun sin tener una posición con *tenure*, es decir, titularidad, lo que implica estabilidad, reconocimiento y prestigio en el sistema académico estadounidense. Quizás una muestra más del trato desigual entre mujeres y hombres en la ciencia.

La ciencia es una actividad esencialmente colaborativa donde emergen espacios de creatividad colectiva y discusión de ideas, incluso de aquellas que retan los paradigmas establecidos. El conocimiento se construye a partir de los resultados obtenidos previamente y avanza gracias a múltiples contribuciones, lo cual dificulta determinar el origen preciso de una idea o innovación. Con tenacidad y perseverancia las mujeres han demostrado que es posible derrotar prejuicios y asegurar espacios de trabajo y reconocimiento antes inimaginables en campos científicos tradicionalmente dominados por los hombres. Hoy la actividad científica enfrenta nuevos retos en nuestras sociedades, como la indiferencia, la desinformación, inclusive la desconfianza. Superar tales dificultades es difícil pero no imposible, como lo han probado las mujeres una y otra vez.

✉ **María Mercedes Zambrano, Ph. D.**

Miembro correspondiente de la Academia

Editora asociada

Referencias

- Lamm, L.** (2023). The Matilda Effect: How Women Are Becoming Invisible in Science. En: Lost Women of Science - <https://www.lostwomenofscience.org>.
- Lederberg, E.** (1951). Lysogenicity in *E. coli* K-12. *Genetics*, 36, 560.
- Lederberg, J., Cavalli, L.L., Lederberg, E.M.** (1952a). Sex compatibility in *Escherichia coli*. *Genetics*, 37, 720-730.
- Lederberg, J., Lederberg, E.M.** (1952b). Replica Plating and Indirect Selection of Bacterial Mutants. *Journal of Bacteriology*, 63(3), 399-406. <https://doi.org/10.1128/jb.63.3.399-406.1952>
- Lederberg, E.M., Lederberg, J.** (1953). Genetic Studies of Lysogenicity in *Escherichia coli*. *Genetics*, 38(1), 51-64. <https://doi.org/10.1093/genetics/38.1.51>
- Strauss, B.** (2016). Beadle and Tatum and the origins of molecular biology. *Nature Review of Molecular Cell Biology*, 17, 266. <https://doi.org/10.1038/nrm.2016.42>

Enlaces de importancia

<https://asm.org/Articles/2023/October/Esther-Lederberg-Microbial-Genetics>

<https://schaechter.asmblog.org/schaechter/2014/07/esther-lederberg-pioneer-of-bacterial-genetics.html>

Ensayo/Assay

Repensando la gestión de incendios forestales en Suramérica: un enfoque integrado en la era del cambio climático

Rethinking forest fire management in South America: an integrated approach in the era of climate change

El 2024 comenzó con una serie de incendios forestales en Suramérica que han alcanzado escalas y cifras de mortalidad sin precedentes en el continente, con efectos particularmente devastadores en Chile, Colombia y Argentina que, a finales de febrero, se extendieron al noreste de Venezuela y al estado septentrional de Roraima en Brasil. La destrucción de hábitats, la pérdida de biodiversidad, la emisión de grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), y las consecuencias directas sobre las poblaciones locales por la pérdida de sus hogares y medios de vida, son evidentes. La combinación de varios factores críticos, globales y regionales, incluido el impacto del fenómeno climático de El Niño, catalizan el avance inexorable del cambio climático, exacerbando tanto la frecuencia como la intensidad de estos eventos catastróficos.

El cambio climático, un proceso a largo plazo, incrementa la temperatura global y modifica los patrones de precipitación, alargando las temporadas secas y provocando sequías más extremas, lo que, en consecuencia, lleva a un aumento de la cantidad e intensidad de los incendios forestales. Esta alteración climática afecta la resiliencia de los ecosistemas dado que los bosques de zonas templadas y tropicales enfrentan no solo alteraciones en sus condiciones ambientales, sino también cambios en la composición de las especies, la estructura de los ecosistemas y los procesos ecológicos de regeneración natural, que incrementan su vulnerabilidad frente a las perturbaciones (Stevens-Rumann *et al.*, 2018).

En contraste, El Niño, un fenómeno de variabilidad climática a corto plazo, provoca alteraciones regionales y locales en las precipitaciones, tormentas más intensas en algunas regiones y sequías en otras. Esto altera los ciclos de crecimiento y las tasas de evapotranspiración de la vegetación, que resulta en muchos casos en una desecación de material vegetal vivo y muerto, y facilita las condiciones óptimas para la ignición del mismo (Macías-Fauria *et al.*, 2011). Así como el cambio climático altera las condiciones base de los ecosistemas, aumentando su propensión a los incendios en el largo plazo, el fenómeno del Niño actúa como un catalizador a corto plazo que facilita la iniciación y propagación de aún un mayor número de incendios forestales.

El clima es condicionante pero hay, además, ciertas actividades humanas que inciden fuertemente sobre la ocurrencia de incendios; entre estas cabe mencionar el incremento de actividades ilícitas que fomentan la deforestación y el cambio de los usos del suelo, particularmente en la Amazonia. En las últimas tres décadas, la aparición de incendios en esa región se ha correlacionado con la pérdida de bosques por la agricultura, la ganadería y los cultivos ilegales, así como el acaparamiento de tierras (Armenteras & Retana, 2012a). El uso de fuego asociado a estas actividades ha desembocado en la alteración de los regímenes de incendios, con una tendencia que indica un aumento en el inicio del 2024. Se estima que las emisiones de los incendios forestales pueden llegar a superar las causadas por la deforestación y llegar a alcanzar los 6,0 pg para el año 2050 (Brando *et al.*, 2020).

Asimismo, el fuego no sólo tiene un papel crucial en los procesos de deforestación sino que causa degradación, especialmente en bosques tropicales del continente, donde un único evento puede desencadenar su transformación a bosques degradados u otros tipos de coberturas, incrementando exponencialmente la vulnerabilidad de estos ecosistemas a futuras perturbaciones (Armenteras *et al.*, 2021a). El impacto de estos incendios

sobre la biodiversidad es también significativo, pues resulta en cambios dramáticos en la composición y estructura de los bosques, así como en la pérdida de especies de flora y fauna que, incapaces de adaptarse o sobrevivir a estos eventos, se ven inmersas en una cascada de efectos de reducción de los procesos ecológicos e.g. la dispersión de semillas, la depredación y la coexistencia, entre otros (**Doherty et al.**, 2022; **Armenteras et al.**, 2021b; **González et al.**, 2022). El aumento de incendios nos lleva, en cualquier caso, a la necesidad de entender cómo estos afectan a las especies y cómo estas responden a las nuevas condiciones que enfrentan. Investigar estos aspectos ayuda no sólo a preservar la biodiversidad sino a mitigar y a adaptarnos al cambio climático mediante la gestión y procesos de restauración de hábitats que promuevan la resiliencia de los ecosistemas.

A los factores anteriores debe sumarse la falta de apropiación social del conocimiento y la tardía atención política a la problemática que ha agudizado la frecuencia y la intensidad de estos desastres naturales (**Kurvits et al.**, 2022). Es necesario un control más riguroso de las fuentes de ignición de incendios, pues, aunque algunos son producto de causas naturales y por ello difíciles de prevenir, en Latinoamérica la mayoría resulta de acciones humanas. Las causas, ya sean accidentales, debidas a fallas o mantenimiento deficiente de las líneas eléctricas, o por negligencia, como en las quemas agrícolas o de basuras descontroladas, o el descuido con cigarrillos, o bien las provocadas intencionalmente por razones de lucro o venganza, tienen origen antrópico. Es por ello, que más allá del llamado a las autoridades a adaptarnos al cambio climático y a la necesaria mejora en el control y vigilancia de las fuentes de ignición, creemos que es también necesario enfrentar la falta de implementación de acciones efectivas para evitar la degradación y pérdida de los bosques nativos.

En diversos paisajes del continente, la proliferación de plantaciones de especies exóticas como eucaliptos y pinos, y de especies invasoras como el retamo espinoso, de una alta afinidad con el fuego, ha convertido los paisajes en áreas altamente inflamables con alto riesgo de incendios (**Figura 1**). Hoy, es ya imposible negar el papel de este tipo de especies no nativas en el agravado riesgo de incendios en la región. Por otro lado, la expansión urbana hacia zonas de plantación incrementa la vulnerabilidad de las ciudades ante estos desastres. En Chile se ha evidenciado cómo la proximidad de las urbes a áreas forestales incrementa significativamente el peligro para las poblaciones (**Armenteras & de la Barrera**, 2023). Estos retos señalan la necesidad en muchos de nuestros países de repensar la gestión de la vegetación y las estrategias de planificación territorial para mitigar los riesgos asociados a incendios, que, combinados con condiciones climáticas extremas y el persistente número de fuentes de ignición, facilitan la combustión del material inflamable y complican enormemente la extinción del fuego por parte de los organismos de emergencia (**Kurvits et al.**, 2022). Además, en muchos casos estamos viendo incendios recurrentes en áreas donde en el pasado no se hizo el adecuado manejo posterior a los eventos y se dejó acumular una mayor cantidad de combustible, con lo que se retroalimentó el riesgo de nuevos incendios (**Figura 2**). Recordemos que el combustible de un incendio forestal incluye todo material inflamable en el bosque, o sea, cualquier material orgánico que pueda arder, como hojas secas, ramas, madera muerta, pero también vegetación viva, como arbustos y árboles. Los combustibles finos, como las hojas secas, pueden encenderse rápidamente, propagando el fuego a gran velocidad. Por otro lado, los combustibles gruesos, como troncos caídos, son los que sostienen el fuego durante horas o incluso días. Lo más importante es que existen acciones que se pueden implementar para manejar las cargas y la continuidad del combustible en zonas de alto riesgo mediante diferentes mecanismos adaptados a la necesidad de cada ecosistema (remoción manual, quemas prescritas, barreras cortafuego, barreras verdes, etc.).

Agregando a lo anterior, estamos viendo que los métodos tradicionales de supresión de incendios ya no son suficientes para proteger los ecosistemas y las comunidades de sus efectos devastadores, esto debido en gran parte a su creciente frecuencia e intensidad. Si a esto se le suma la simultaneidad de incendios, y algunas veces la ocurrencia de megaincendios, la capacidad para atender las emergencias de muchos países se ve



Figura 1. Paisaje cerca de Penco con remanentes de bosques nativos no quemados (arriba). Regeneración posterior al fuego en plantaciones forestales en Vichuquén (abajo). Chile, abril 2022. @D.Armenteras, cortesía Ecolmod

desbordada. En cuanto a los costos, aunque a nivel global y regional se han aumentado los recursos para apagar incendios, paradójicamente el financiamiento para abordar sus causas fundamentales se ha estancado o es insuficiente. Se estima que el costo de gestión por hectárea de paisaje para la prevención de incendios puede ser hasta diez veces menor que lo que se gasta en su extinción, y ni hablar de cuánto cuesta la restauración de ecosistemas que pueden tardar décadas en recuperar su estado previo. La decisión de intervenir inmediatamente o permitir una recuperación natural debe basarse en una evaluación cuidadosa de la capacidad de resiliencia del ecosistema y la magnitud de los daños, y para ello se necesita conocimiento previo. Por ejemplo, cuando el incendio en un ecosistema de páramo es de baja intensidad, usualmente se consume toda la biomasa sobre el suelo, dejando un terreno carbonizado que es recolonizado por brotes de sistemas radiculares que sobreviven y por semillas que resisten el fuego o que llegan después del incendio. Sin embargo, dados los rasgos adaptativos de especies como los eucaliptos y los pinos, que pueden dominar rápidamente un paisaje después de un incendio y aumentar la probabilidad de futuros eventos, es esencial una gestión proactiva.



Figura 2. Consecuencias y regeneración tras incendios en una formación de pinos. Estas fotografías del Cerro del Cable documentan la resiliencia después del fuego evidente en los rebrotes en troncos jóvenes con marcas de incendios recientes y la descomposición de árboles maduros afectados por fuegos anteriores. Este patrón indica la repetición de incendios y sus efectos persistentes en la estructura forestal, reflejando una gestión forestal previa inadecuada y la necesidad de implementar prácticas más eficaces de manejo posteriores al incendio. Febrero 2024 @D.Armenteras, cortesía Ecolmod

Más allá de culpar al cambio climático, la realidad es que sabemos que es posible alterar activamente el comportamiento de los incendios. Para ello se requiere utilizar el mejor conocimiento científico disponible, los mejores pronósticos y alertas tempranas y, por supuesto, gestionar el paisaje para reducir el combustible potencial que alimenta los incendios. Es por esto que creemos que se necesita con urgencia la implementación de medidas de adaptación y estrategias de gestión del paisaje basado en la ciencia.

Este panorama revela la urgente necesidad de repensar y transformar nuestras estrategias de gestión de incendios hacia un enfoque más holístico e integrado que esté a la altura de los grandes desafíos que nos impone el cambio climático y las realidades ecológicas y sociales contemporáneas. La implementación de las 5 R: revisión y análisis, reducción del riesgo, preparación (*readiness* en inglés), respuesta, y recuperación, se perfila como un marco estratégico clave en este sentido (Kurvits *et al.*, 2022). Este enfoque integral no sólo aboga por una reevaluación profunda de nuestras prácticas actuales de manejo de tierras y planificación urbana, destacando la importancia de adoptar una visión científica moderna que tome en cuenta tanto la deforestación inducida por actividades ilícitas, sino que también enfatice la importancia de reducir los riesgos a través de la promoción de una gestión sostenible del paisaje. La necesidad imperiosa de orientar las inversiones hacia medidas preventivas es hoy una realidad innegable, sobretodo para evitar más repercusiones catastróficas que amenazan a poblaciones vulnerables, especialmente en la intersección entre áreas urbanas y paisajes forestales (Armenteras & de la Barrera, 2023). La preparación de las comunidades mediante la educación sobre los riesgos, la implementación de sistemas de alerta temprana, el reconocimiento de prácticas culturales relacionadas con el fuego, además de planes de evacuación claros y accesibles, son fundamentales. Se requiere, asimismo, una respuesta coordinada entre las diversas agencias

y sectores, así como una recuperación enfocada en la restauración de ecosistemas y el apoyo a las comunidades afectadas, integrando prácticas de manejo sostenible del suelo y reforestación con especies nativas.

Con lo que hemos visto en la interfaz periurbana, en el futuro ya no se tratará solamente de gestionar incendios en áreas remotas o de proteger los ecosistemas boscosos, especialmente aquellos sensibles al fuego como los del trópico, sino su biodiversidad, los recursos naturales y la salud humana de las poblaciones. Para ello la investigación para el desarrollo y la adopción de modelos de comportamiento del fuego puede mejorar la adopción de decisiones críticas en la gestión de incendios. A ello debe sumarse la promoción del conocimiento y de sistemas de autoprotección entre la población como pasos esenciales en la adaptación a los megaincendios (Armenteras & de la Barrera, 2023), o a los incendios de alta intensidad y de magnitudes gigantescas que ya están ocurriendo en otros lugares (Castellnou & Nebo, 2023). Estas medidas no sólo protegen la interfaz urbano-forestal, sino que apuntan a una gestión estratégica que salvaguarde la infraestructura y a las poblaciones humanas vulnerables.

Solo mediante un compromiso global y local sostenido, que combine el conocimiento de respaldo de la gestión, la implementación de políticas efectivas y la participación comunitaria, podremos mitigar los riesgos asociados a los incendios forestales y avanzar hacia la resiliencia ecológica y social en nuestra región. En este momento crítico, el conocimiento, la prevención, la preparación y la acción concertada son las herramientas más poderosas para enfrentar y superar este desafío.

 **Dolors Armenteras^{1,*}, Tania Marisol González²**

¹ Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

² Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

*darmenterasp@unal.edu.co

Referencias

- Armenteras, D. & de la Barrera, F. (2023). Landscape Management Is Urgently Needed to Address the Rise of Megafires in South America. *Community Earth Environment*, 4, 305. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00964-6>
- Armenteras, D., Dávalos, L.M., Barreto, J.S., Miranda, A., Hernández-Moreno, A., Zamorano-Elgueta, C., González-Delgado, T.M., Meza-Elizalde, M.C., Retana, J. (2021). Fire-Induced Loss of the World's Most Biodiverse Forests in Latin America. *Scientific Advances*, 7, 33. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3357>
- Armenteras, D., Meza, M.C., González, T.M., Oliveras, I., Balch, J.K., Retana, J. (2021b). Fire Threatens the Diversity and Structure of Tropical Gallery Forests. *Ecosphere*, 12, 1. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3347>
- Armenteras, D. & Retana, J. (2012). Dynamics, Patterns and Causes of Fires in Northwestern Amazonia. *PLoS One*, 7, e35288. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035288>
- Brando, P.M., Soares-Filho, B., Rodrigues, L., Assunção, A., Morton, D., Tuchsneider, D., Fernandes, E.C.M.M., Macedo, M.N., Oliveira, U., Coe, M.T. (2020). The Gathering Firestorm in Southern Amazonia. *Scientific Advances*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1632>
- Castellnou, M. & Nebo, E. (2023) Catalonia: Understanding the Fire-Generation Concept. *Wildfire Quarter* 4, 28-31.
- Doherty, T.S., Geary, W.L., Jolly, C.J., Macdonald, K.J., Miritis, V., Watchorn, D.J., Cherry, M.J., Conner, L.M., González, T.M., Legge, S.M., Ritchie, E.G., Stawski, C., Dickman, C.R. (2022). Fire as a Driver and Mediator of Predator–Prey Interactions. *Biological Reviews*, 97, 1539-1558. <https://doi.org/10.1111/brv.12853>
- González, T.M., González-Trujillo, J.D., Muñoz, A., Armenteras, D. (2022). Effects of Fire History on Animal Communities: A Systematic Review. *Ecology Processes* 11, 11. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00357-7>

- Kurvits, T., Baker, E., Thygesen, K., Sevaldsen, P.** (2022). Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. United Nations Environment Programme.
- Macias Fauria, M., Michaletz, S.T., Johnson, E.A.** (2011). Predicting Climate Change Effects on Wildfires Requires Linking Processes across Scales. *WIREs Climate Change*, 2, 99-112. <https://doi.org/10.1002/wcc.92>
- Stevens-Rumann, C.S., Kemp, K.B., Higuera, P.E., Harvey, B.J., Rother, M.T., Donato, D.C., Morgan, P., Veblen, T.T.** 2018. Evidence for Declining Forest Resilience to Wildfires under Climate Change. *Ecology Letters*, 21, 243-252. <https://doi.org/10.1111/ele.12889>

Ensayo/Assay

El impacto de las mujeres colombianas en la Paleontología

The impact of Colombian women in Paleontology

La extraordinaria diversidad biológica de Colombia se ha moldeado a lo largo de millones de años mediante procesos evolutivos y transformaciones en el paisaje. El auge de la investigación paleontológica en el país es fundamental para la comprensión profunda de la dinámica de estos cambios al contribuir a la reconstrucción de la compleja historia geológica y biológica de nuestro territorio. En este contexto, el rol de las mujeres colombianas en la Paleontología tiene cada vez mayor relevancia y ha contribuido significativamente al avance científico del país. No obstante, persisten disparidades que merecen atención. En este artículo nos propusimos abordar las investigaciones llevadas a cabo por nuestro grupo de estudio, las cuales reflejan un continuo crecimiento de la participación femenina, y analizar el impacto de las mujeres colombianas en la Paleontología de nuestro país. Con esta reflexión se busca abordar la brecha de género para fomentar la equidad y la diversidad en la investigación paleontológica en Colombia.

Los mares del Cretácico de Colombia y sus faunas

La investigación del Cretácico de Colombia ilustra el notable crecimiento de la Paleontología en el país. En colaboración con mi grupo de estudio, nos hemos centrado en explorar los ecosistemas marinos del Mesozoico usando como modelo la secuencia marina de la Formación Paja (115-130 millones de años), la cual tiene una amplia exposición en Villa de Leyva (Boyacá). La riqueza paleontológica de esta región nos ha brindado la oportunidad de estudiar la complejidad de la estructura ecológica de uno de los ensamblajes marinos más ricos de Sudamérica, donde los depredadores marinos ocuparon niveles tróficos ausentes en los ecosistemas marinos modernos. El estudio de esta estructura ecológica proporciona una perspectiva única sobre la vida marina en el pasado (Cortés & Larsson, 2023).

La biodiversidad marina actual es el resultado de múltiples cambios ecológicos y evolutivos a lo largo de millones de años. Dicha biodiversidad se distribuye en diversos niveles ecológicos, desde las algas en la base de las cadenas alimentarias hasta los tiburones y ballenas depredadoras en su cúspide. En su conjunto, estas cadenas alimentarias abarcan hasta seis niveles tróficos, con las orcas y los grandes tiburones predadores en el tope. Comprender las diferencias entre los antiguos ecosistemas marinos y los actuales, así como los cambios en sus estructuras ecológicas, es esencial para una mejor comprensión y conservación de la vida marina vulnerable de hoy. Una vía para explorar estas preguntas es la reconstrucción de redes alimentarias ecológicas cuantitativas de ecosistemas marinos antiguos. En nuestra investigación, reconstruimos por primera vez la red alimentaria ecológica de la Formación Paja de Colombia.

La red ecológica de la Formación Paja alberga desde amonitas de pocos centímetros hasta pliosaurios de 10 a 12 metros de longitud, organizados en un conjunto complejo y diverso. Aunque aún no comprendemos completamente cómo esta red ecológica se volvió tan compleja, sabemos que estuvo dominada por depredadores marinos de gran tamaño, seguidos de aquellos de tamaño mediano en los niveles subyacentes, luego de peces y tiburones, hasta llegar a amonitas en los niveles medios y otros linajes de invertebrados que ocuparon los niveles inferiores. La reconstrucción cuantitativa de esta red ecológica se comparó y recalibró con redes de ecosistemas del Caribe bien estudiadas. Este análisis reveló que el ecosistema de la Formación Paja desarrolló un nuevo nivel trófico hasta alcanzar siete niveles en una estructura sin paralelo en ningún ecosistema extinto o existente que se conozca. La red ecológica de la biota de Paja representa la primera reconstrucción de sitio

para todo el Mesozoico. Además, las redes ecológicas de Paja ofrecen una comprensión más profunda de la dinámica ecológica a gran escala y la estabilidad de los ecosistemas marinos durante la Revolución Marina Mesozoica (*Mesozoic marine revolution*, MMR) que transformó los océanos. La biota de Paja puede considerarse como un clímax en la revolución marina del Mesozoico (Cortés & Larsson, 2023). Aunque este avance en la reconstrucción de redes ecológicas del Cretácico temprano es significativo, aún hay mucho trabajo por hacer en taxonomía, sistemática, filogenética y paleoecología en secuencias marinas de este y otros períodos de la historia de los océanos, para así reconstruir el origen y la evolución de los ecosistemas marinos mesozoicos hasta llegar a los diversos océanos modernos.

Hemos identificado nuevos grupos hasta ahora desconocidos en estos mares, incluido un teleosauroideo, un tipo de crocodiliforme que alcanzó casi los 10 metros de longitud, siendo el primero en su tipo descubierto en Sudamérica (Cortés *et al.*, 2019). Este espécimen, preservado en rocas del Cretácico inferior de Colombia, representa una evidencia irrefutable de la supervivencia de este linaje de reptiles marinos a la extinción masiva del Jurásico-Cretácico, una cuestión que había sido objeto de debate durante mucho tiempo en relación con este grupo.

La diversidad de gremios ecológicos en este ecosistema es notable. Un ictiosaurio de la Formación Paja demostró una capacidad excepcional para alimentarse de presas considerablemente grandes (Figura 1) (Cortés, 2023). Este ictiosaurio, denominado *Kyhytysuka*, cuyo nombre en lengua muisca significa ‘aquel que corta con algo afilado’, hace referencia a sus dientes letales. *Kyhytysuka* desarrolló zonas especializadas en sus dientes para



Figura 1. Ilustración de *Kyhytysuka* que muestra su capacidad para cazar presas de gran tamaño. Extracto del libro *Hace tiempo* (Jaramillo & Oviedo, 2023; Cortés, 2023). Guillermo Torres. Banco de Imágenes Ambientales (BIA), Instituto Alexander von Humboldt

funciones específicas como perforar, cortar y triturar (Cortés *et al.*, 2021; Maxwell *et al.*, 2019; Páramo-Fonseca, 1997). Las características distintivas de los dientes de *Kyhytysuka*, combinadas con otros detalles anatómicos de su cráneo, lo posicionan como el primer ictiosaurio hipercarnívoro del Cretácico. La abundancia de ictiosaurios en Colombia es significativa; actualmente estamos investigando nuevas especies que ofrecerán perspectivas únicas sobre la paleoecología, filogenia, diversidad y evolución de los últimos sobrevivientes de los ictiosaurios (en preparación).

Además de los ictiosaurios, destacan los colosales plesiosaurios en este ecosistema. Se dividen en dos grupos, los elasmosaurios de cuello largo, y los pliosaurios de cuello corto (Cortés, 2023). Los fósiles de los plesiosaurios en Colombia se encuentran entre los más grandes y mejor preservados a nivel mundial. Estos depredadores marinos, los reyes de los océanos mesozoicos, habrían tenido la capacidad de cazar orcas y grandes tiburones blancos si vivieran en los océanos modernos. Actualmente estamos describiendo un nuevo pliosaurio de esta secuencia, lo que promete brindar nuevas perspectivas sobre la anatomía que los convirtió en depredadores letales durante su dominio en los océanos del mundo (en preparación).

En las áreas costeras de los mares cretácicos de Colombia habitaron dinosaurios. Mediante escaneo en 3D y una descripción detallada, identificamos huellas de terópodo que se formaron en una zona intermareal húmeda. Estas huellas sugieren que el dinosaurio era de tamaño mediano y caminaba de manera digitigrada, similar a las aves. Calculamos la velocidad promedio del dinosaurio utilizando la longitud de la zancada y la regla de similitud dinámica. Estimamos una altura de la cadera de aproximadamente 84 cm, lo que está dentro del rango de tamaño de terópodos pequeños a medianos. Según estos datos, la velocidad máxima de este dinosaurio habría sido de aproximadamente 11 km/h, equivalente a una carrera lenta para un animal de este tamaño. Su velocidad más lenta fue aproximadamente un tercio de su velocidad máxima. En comparación con otros dinosaurios bípedos conocidos, este de Villa de Leyva se encontraba entre los caminantes más rápidos o los corredores más lentos. Por ejemplo, se estima que el *Tyrannosaurus rex* tenía una velocidad entre 10 y 14 m/s, y el *Velociraptor* entre 10,8 m/s y 15,15 m/s, siendo este último uno de los dinosaurios más rápidos conocidos (Cortés *et al.*, 2023, y referencias).

Las huellas fueron preservadas en el miembro estratigráfico de Lutitas Negras Inferiores de la Formación Paja, depositado probablemente en un ambiente de baja energía. La presencia de huellas en sus superficies acuosas indica que se realizaron en un entorno con un sustrato fluido que se llenó rápidamente una vez levantado el pie. Su sugiere que el sustrato estaba saturado de agua, como se evidencia por los canales superficiales en algunas huellas. Estas características y la posición de las huellas en una formación marina sugieren que se hicieron en lodos intermareales, lo que indica que el dinosaurio caminaba por una zona fangosa en lo que hoy en día es Villa de Leyva (Cortés *et al.*, 2023).

Cada nueva descripción produce una nueva y mejor visión de la evolución de cada grupo. Por ejemplo, ahora tenemos una mejor idea sobre los Brachypterygiidae (una nueva familia de ictiosaurios eregida en Colombia) (Cortés *et al.*, 2021) y la diversidad de modos tróficos de los ictiosaurios del Cretácico (Cortés & Larsson, 2023); estamos revelando un linaje completo de la radiación de los Thalathosuchia en Sudamérica (en preparación); y estamos empezando a comprender la radiación de los pliosaurios del Cretácico (en preparación).

La próxima etapa de esta investigación se centrará en entender los mares epicontinentales que garantizaron la permanencia de estos ensamblajes marinos junto con una red compleja de alimentación durante el Mesozoico. Una representación ilustrativa de estas faunas se encuentra en el capítulo de reptiles marinos del libro *Hace tiempo* (Jaramillo & Oviedo, 2023; Cortés, 2023).

Las mujeres colombianas en la Paleontología

La historia de la Paleontología en Colombia se ha ido forjando a lo largo del tiempo, desde sus inicios en el siglo XIX hasta la actualidad. A pesar de un crecimiento relativamente lento en comparación con otras regiones del mundo, las últimas décadas han sido testigo de un aumento notable en la producción científica impulsado por una nueva generación de

paleontólogos y por colaboraciones numerosas. Con más de 800 publicaciones científicas en más de un siglo, la Paleontología colombiana ya ha dejado su marca en la exploración y comprensión de los fósiles que yacen en nuestro territorio.

Sin embargo, este progreso no ha sido igual para todos, ya que la participación de las mujeres ha sido históricamente limitada, reflejando una tendencia global en la Paleontología y otras ciencias. El número de publicaciones es un indicador del impacto en la producción científica, pero muchas mujeres han sido relegadas a roles de apoyo, lo cual también afecta su contribución en este aspecto. En el contexto de las publicaciones, no fue sino en las últimas dos décadas que las mujeres comenzaron a hacerse un espacio en la Paleontología colombiana. Excluyendo trabajos no relacionados con la Paleontología nacional, la participación de las mujeres ha experimentado un crecimiento exponencial, con al menos 77 publicaciones que comenzaron a aparecer en 1994, desde el primer trabajo por M.E. Páramo-Fonseca en la Revista de la ACCEFYN (Páramo-Fonseca, 1994). Este aumento destaca el impacto creciente de las mujeres colombianas en la Paleontología del país, con un pico máximo en el 2023, cuando se registraron diez publicaciones por parte de primeras autoras o coautoras en diversos tópicos. En los últimos cinco años se ha generado más del 50 % del total de la producción científica con participación femenina desde sus inicios hace casi treinta años, lo que indica una tendencia en ascenso (**Figura 2, material suplementario**).

Aunque este panorama es alentador, aún persisten desafíos y disparidades de género dentro y fuera de la academia que obstaculizan la participación plena de las mujeres en la ciencia. Los prejuicios, las expectativas sociales, el sexismo y el racismo han sido algunos de los obstáculos significativos en la participación y progreso de las mujeres en la ciencia. A pesar de las mejoras recientes, la brecha salarial, la falta de representación, los estereotipos de género y los sesgos implícitos siguen siendo problemas persistentes que afectan la equidad de género en la Paleontología y la ciencia en general.

Uno de los desafíos más prominentes que enfrentan las mujeres en la academia es la conciliación entre la vida familiar y las demandas de una carrera científica. La necesidad de decantarse entre ser académicas y formar una familia es una realidad que muchas mujeres enfrentan en este y otros campos de las ciencias. Las responsabilidades de cuidado, combinadas con las altas expectativas de producción científica, crean una carga desigual que se acentúa para aquellas mujeres que inician una familia mientras buscan o mantienen posiciones académicas. Además, en posiciones de alto rango, la representación

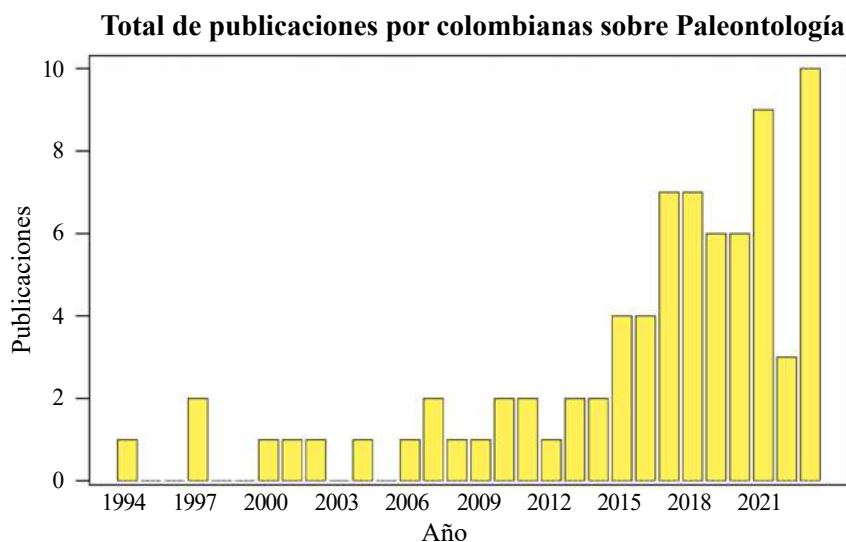


Figura 2. Histograma con el total de artículos científicos sobre Paleontología de Colombia con participación de mujeres colombianas desde la primera en 1994 hasta 2023

de las mujeres disminuye significativamente, creando un fenómeno de cuello de botella que dificulta la permanencia a largo plazo de las mujeres en la academia. Este fenómeno termina afectando a la ciencia en su totalidad.

Es crucial no sólo reconocer estos desafíos y sesgos en la academia, sino también abordarlos activamente para cerrar las brechas existentes. La falta de modelos y mentoras en la Paleontología colombiana puede ralentizar el progreso de las mujeres, sus actividades de campo o de laboratorio, y las investigaciones paleontológicas en general. Por lo tanto, es fundamental fomentar una cultura más justa, diversa, equitativa e inclusiva en la Paleontología y otras ramas de las ciencias. La promoción de oportunidades justas, la eliminación de sesgos, y la creación de redes de apoyo y mentoría son pasos esenciales que podemos implementar para garantizar el pleno desarrollo del potencial científico de las mujeres y asegurar un futuro más equitativo y diverso en la Paleontología colombiana.

La diversidad en nuestro campo implica abrir el espacio para grupos minoritarios, como las mujeres y otras comunidades, pero también ampliar las fronteras para el crecimiento y la evolución de la Paleontología colombiana. La integración de nuevas herramientas, métodos y líneas de investigación convierte a la Paleontología en una disciplina interdisciplinaria y multidisciplinaria. Facilitar la adopción de tecnologías emergentes e involucrar a diferentes grupos en el uso compartido de equipos, es otra faceta de la diversidad. La exploración de nuevos yacimientos con potencial paleontológico, especialmente en regiones marginadas del país, contribuirá al estudio equitativo de nuestra riqueza paleontológica. El aumento de las colaboraciones con científicos extranjeros, así como el fomento a los esfuerzos cooperativos internos, asegura que cada vez más colombianos participen en la investigación científica regional. Por último, la función de aquellos que se encuentran fuera de Colombia como anclaje para las generaciones actuales y futuras de estudiantes, es crucial para el progreso continuo de la Paleontología en nuestro país.

Este proceso ya está en marcha. Gracias al esfuerzo de las primeras generaciones de paleontólogos en Colombia, hoy contamos con una extensa red de profesionales dedicados a la Paleontología y con colecciones de fósiles notables, como la del Centro de Investigaciones Paleontológicas (CIP) y el Museo de La Tatacoa. Han surgido *hotspots* de investigación en todo el país y un centro de investigaciones especializado en preparación de fósiles (CIP). Este impulso ha generado un alud ya imparable. A medida que más colombianos se han ido capacitando en el extranjero, su regreso ha creado oportunidades para la formación de nuevos estudiantes, transformando la Paleontología de la posibilidad remota que era, en una opción viable sin necesidad de salir del país. Este cambio es esencial, ya que ahora la elección de estudiar Paleontología en el extranjero se presenta como una opción más y no como una obligación. Incluso si algunos mentores y mentoras no regresan sino esporádicamente, muchos continúan contribuyendo al desarrollo sin tregua del talento en Colombia y Latinoamérica.

En el 2018 llevamos a cabo la sexta edición del Congreso Latinoamericano de Paleontología de Vertebrados, lo que marcó un hito al ser la primera vez que se realizó en el extremo norte de Suramérica, específicamente en Villa de Leyva. Este congreso atrajo a más de 250 participantes de todo el continente y otras partes y proporcionó una perspectiva fresca sobre los estudios de las faunas vertebradas en Latinoamérica, creando, así, una oportunidad única para posicionar a Colombia en el panorama de la Paleontología de vertebrados latinoamericana con nuevas discusiones, perspectivas y colaboraciones que han integrado a los paleontólogos colombianos en una red más extensa de proyectos, publicaciones e investigadores. La organización de este congreso en Colombia sembró la semilla para la creación del Congreso Colombiano de Paleontología, que en su segunda edición, organizada en su mayoría por jóvenes, reunió a cerca de 100 estudiantes y profesionales. Asimismo, el CIP organizó el primer simposio colombiano de preparación de fósiles, encabezado por la primera mujer entrenada en preparación de fósiles en Colombia, M.L. Parra-Ruge (CIP). Este simposio ha despertado el interés de más estudiantes en estas técnicas y métodos, fundamentales para los estudios paleontológicos en el país. Es evidente que una nueva era de la Paleontología colombiana está en marcha y que su impulso abre el camino hacia un mismo objetivo a partir de diversos enfoques. Cada vez avanzamos

más en los estudios de Paleontología y Geología en el Neotrópico, agrupados en una red sólida y numerosa, que cuenta, entre otras, con Paleontrópica, liderada por Carlos Jaramillo (STRI). Ello ha sido un catalizador para la creación de nuevos grupos de investigación, oportunidades de financiación, aumento de la visibilización y una participación mayor de mujeres y otros grupos minoritarios. En la actualidad contamos con los recursos humanos y las capacidades logísticas necesarias para llevar a cabo expediciones paleontológicas extensas en Colombia, respaldados por la convicción fundamentada de que podemos hacer ciencia de alta calidad en el país.

En conclusión, a medida que las mujeres derriban barreras en la Paleontología colombiana, es fundamental seguir trabajando en el fortalecimiento de las redes de apoyo y la promoción de oportunidades para que copen los espacios que merecen. La diversidad de experiencias, visiones y enfoques enriquece nuestra investigación y contribuye a una comprensión más holística de la historia geológica y biológica del país. El compromiso continuo con la equidad de género no sólo potenciará la Paleontología colombiana, sino que inspirará a las próximas generaciones de científicas, motivándolas a dejar su huella en la historia científica del país. Aunque el futuro de las mujeres en la ciencia de Colombia es prometedor, no debemos cejar en potenciar nuestra participación en todos los ámbitos de las ciencias.

Material suplementario

Lista de publicaciones con participación de mujeres colombianas. Ver material suplementario en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2604/3985> y <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2604/3986>

Dirley Cortés

Redpath Museum, Biology Department, McGill University, Montréal, Canada; Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá, Panamá; Centro de Investigaciones Paleontológicas, Villa de Leyva, Boyacá, Colombia; Grupo de Investigación Biología para la Conservación, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia
dirley.cortes@mail.mcgill.ca; dirpaleo@gmail.com

Referencias

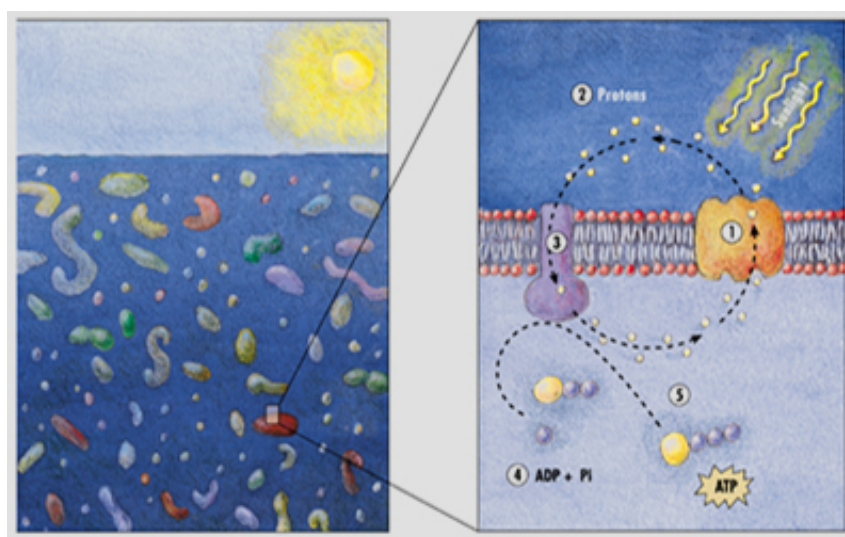
- Cortés, D., Larsson, H.C., Maxwell, E.E., Ruge, M.L.P., Patarroyo, P., Wilson, J.A. (2019). An Early Cretaceous teleosauroid (Crocodylomorpha: Thalattosuchia) from Colombia. *Ameghiniana*, 56(5), 365-379.
- Cortés, D., Maxwell, E.E., Larsson, H.C. (2021). Re-appearance of hypercarnivore ichthyosaurs in the Cretaceous with differentiated dentition: revision of '*Platypterygius sachicarum*' (Reptilia: Ichthyosauria, Ophthalmosauridae) from Colombia. *Journal of Systematic Palaeontology*, 19(14), 969-1002.
- Cortés, D. & Larsson, H.C. (2023). Top of the food chains: an ecological network of the marine Paja Formation biota from the Early Cretaceous of Colombia reveals the highest trophic levels ever estimated. *Zoological Journal of the Linnean Society*, p.zlad092.
- Cortés, D., Parra-Ruge, M.L., Parra-Ruge, J.D.D., Demers-Potvin, A., Smith, A., Hoai-Nam, B., Larsson, H. (2023). Theropod dinosaur footprints from the Early Cretaceous of Colombia: walking dynamics and paleoenvironmental implications. *Revista Facies*, 9, 1-17.
- Cortés, D. (2023). Reptiles marinos. En: Jaramillo, C. & Oviedo, L.H. (Eds.). 2023. *Hace tiempo. Un viaje paleontológico ilustrado por Colombia* (2da ed.). Instituto Alexander von Humboldt e Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales.
- Jaramillo, C., Oviedo, L.H. (Eds.). (2023). *Hace tiempo. Un viaje paleontológico ilustrado por Colombia* (2da ed.). Instituto Alexander von Humboldt e Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales.
- Maxwell, E.E., Cortés, D., Patarroyo, P., Ruge, M.L.P. (2019). A new specimen of *Platypterygius sachicarum* (Reptilia, Ichthyosauria) from the Early Cretaceous of Colombia and its phylogenetic implications. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 39(1), p.e1577875.
- Paramo-Fonseca, M. E. (1994). Posición sistemática de un reptil marino con base en los restos fósiles encontrados en capas del Cretácico superior en Yaguará (Huila). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 19, 63-80.
- Páramo-Fonseca, M. E. (1997). *Platypterygius sachicarum* (Reptilia, Ichthyosauria) nueva especie del Cretácico de Colombia. *Revista Ingeominas*, 6, 1-12.

Vida de la Academia

Ensayos académicos

Enlightened by Microbial Rhodopsins

Iluminados por las rodopsinas bacterianas



Frontispiece: A cartoon of planktonic bacteria in the ocean water column (left) and a simple view of one potential proteorhodopsin energy circuit (right). Source. <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.1000359>

Keywords: rhodopsins, light capture, photosynthesis, ocean microbes, pigments.

The cold and dark northern winter days evoke nostalgia for the comfort and warmth of sunshine. We may take the sun for granted or even shun its scorching rays in hot weather, but we seldom think about the complex process of building life from solar energy, the foundation of our existence. And it is only a selected few photosynthetic microbes, plants and algae that are endowed with the capacity to convert light from the sun into chemical energy, transforming CO_2 and water into organic compounds that are then channeled through the food web to all other organisms on Earth.

Microbes are responsible for about 50% of this primary production. But what is fascinating about microbes is that in addition to the well-known chlorophyll-based systems involved in photosynthesis, some have a very different mechanism for harvesting light: microbial rhodopsins, proteins that were briefly introduced by Merry in an early STC post from 2007. Much has happened in this exciting field since then!

Microbial rhodopsins are proteins that capture light through the pigment retinal and not the chlorophyll pigments found in cyanobacteria, algae and plants. Rhodopsin proteins are found both in eukaryotes and prokaryotes, and even in viruses. These membrane proteins all bind retinal and have seven transmembrane domains, but they differ in their amino acid sequences and functions. Animal rhodopsins, for example, are used for sensing light, while microbial rhodopsins are involved in a broad array of functions like sensory

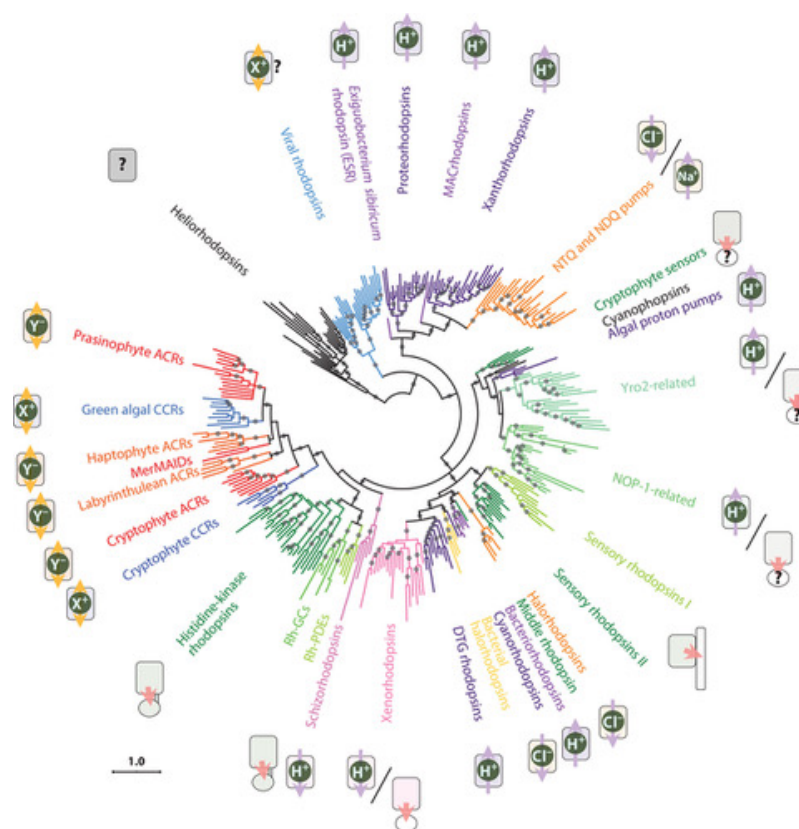


Figura 1. A phylogenetic tree of representatives of different families of microbial rhodopsins. Purple and orange arrows indicate active and passive transport of ions in pumps and channels, respectively. Pink arrows show the signal transduction from rhodopsins to either soluble or transmembrane transducer proteins. ACR, anion channelrhodopsin; CCR, cation channelrhodopsin; GC, guanylyl cyclase; MACrhodopsin, marine actinobacterial clade rhodopsin; MerMAID, metagenomically discovered, marine, anion-conducting, and intensely desensitizing channelrhodopsin; PDE, phosphodiesterase; Rh, rhodopsin. Source. <https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev-micro-031721-020452>

transduction and the use of ion pumps for cellular processes such as ATP synthesis and uptake of substrates (Fig. 1). The first microbial rhodopsin identified, bacteriorhodopsin, was found in the membrane of the halophilic archaeon *Halobacterium salinarum*, which also contains additional rhodopsins such as heliorhodopsin. Many years later, the analysis of metagenomic data uncovered the presence of proteorhodopsins in bacteria, a discovery that has upended our notions of energy capture and productivity on our planet.

The gene for proteorhodopsin, identified based on similarity to the already-known archaeal bacteriorhodopsin gene, was found in metagenomic data of uncultured marine gammaproteobacteria. This protein was then validated functionally in *Escherichia coli* as a light-dependent proton pump. This discovery – more than 20 years ago – of a novel photosystem capable of harnessing energy from the sun has since expanded our understanding of phototrophy. Microbial rhodopsins have been subsequently identified in various microbes from both marine and freshwater environments. Among these, proteorhodopsins are the most abundant. But what is their role and ecological relevance in ocean ecosystems?

To address this question, Gómez-Consarnau and colleagues looked at ocean water samples collected from locations with distinct characteristics: low-nutrient oligotrophic environments, sites close to the coast, and in the open ocean. They first quantitated rhodopsins, as well as the two other major pigments used in photosynthesis, chlorophyll-a and bacteriochlorophyll-a for oxygenic and anoxygenic photosynthesis, respectively. Proteorhodopsins were present only in the microbial fraction (0.2- to 3.0- μm), indicating

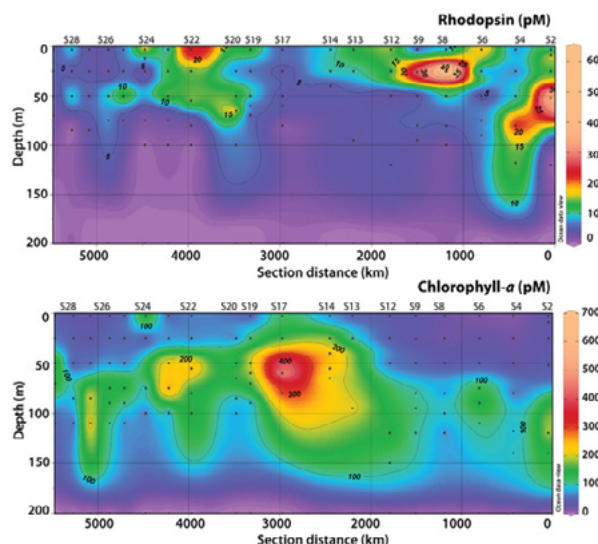


Figure 2. Sectional distributions of pigment concentrations measured along the Mediterranean Sea and in the Eastern Atlantic Ocean. Top, Distribution of retinal in rhodopsins. Bottom, Chlorophyll-a (Chl-a). The black circles indicate the depths of sampling. Source <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaw8855>

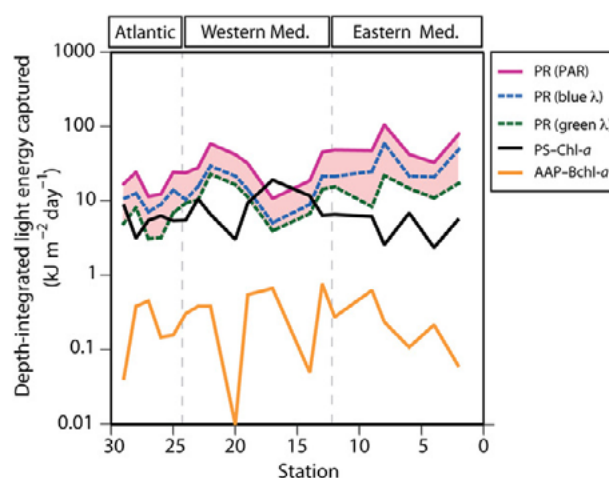


Figure 3. Geographical distribution of the depth-integrated light energy captured by proteorhodopsins (PR), Chlorophyll-a photosystem (PS-Chl-a), and aerobic anoxygenic phototrophy Bacteriochlorophyll-a (AAP-Bchl-a) at the different sampling regions of the Mediterranean. Solid lines denote estimates using all photosynthetically available radiant (PAR) energy (400 to 700 nm). Conservative energy calculations using specific wavelengths for blue-absorbing (490 nm) and green-absorbing (530 nm) PR are shown in dashed lines. Source <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaw8855>

that they were more important in free-living rather than surface-attached microbes, and were found at depths situated above those where chlorophyll was more abundant (Fig. 2).

Both rhodopsin abundance and the number of rhodopsin molecules per cell were higher in low-nutrient regions, where chlorophyll-a was lowest. Based on estimated concentrations and the number of pigment clusters needed to form a “photosynthetic unit,” – 300 molecules for chlorophyll-a and 34 for bacteriochlorophyll-a, versus 1 for rhodopsin – rhodopsins surpassed chlorophyll-based systems in their potential to absorb solar radiation due to the cumulative effect of these abundant and widespread photosystems (Fig. 3). Finally, and despite a low energy yield per cell, proteorhodopsins still seem to provide sufficient energy to sustain basal metabolism and promote survival, particularly in low-nutrient environments.

Proteorhodopsin light-harvesting systems have risen from obscurity to occupy prominence as important contributors to global solar energy capture and survival of microbes in oligotrophic ocean waters. But the interest in rhodopsins does not stop here. Microbial rhodopsins, which are encoded by a single gene, have proven more tractable than chlorophyll-based photosystems for technological applications in optogenetics, which aims to manipulate cell or animal behavior with light, and, more recently, the engineering of non-phototrophic organisms to harvest energy from light.

Equally amazing is the fact that these microbes, working tirelessly, are oblivious of their importance and indifferent to our concerns. Just as we are largely indifferent to them.

📍 **María Mercedes Zambrano**

Fuente

Small Things Considered

A blog for sharing appreciation of the width and depth of microbes and microbial activities on this planet (<https://schaechter.asmblog.org/schaechter/>)

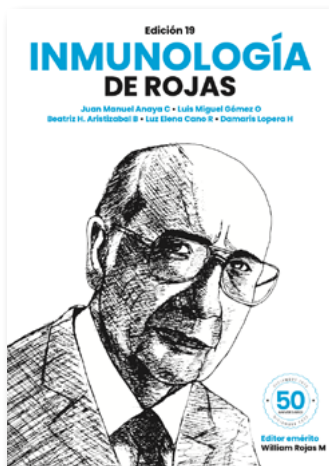
Bibliography

- Gómez-Consarnau, L., Raven, J.A., Levine, N.M., Cutter, L.S., Wang, D., Seegers, B., Aristegui, J., Fuhrman, J.A., Gasol, J.M., Sañudo-Wilhelmy, S.A. (2019). Microbial rhodopsins are major contributors to the solar energy captured in the sea. *Scientific Advances*, 5(8), eaaw8855. doi: 10.1126/sciadv.aaw8855. PMID: 31457093; PMCID: PMC6685716
- Grote, M., O'Malley, M.A. (2011). Enlightening the life sciences: the history of halobacterial and microbial rhodopsin research. *FEMS Microbiology Reviews* 35(6),1082-1099. doi: 10.1111/j.1574-6976.2011.00281.x. Epub 2011 Jun 23. PMID: 21623844
- Rozenberg, A., Inoue, K., Kandori, H., Béjà, O. (2021). Microbial Rhodopsins: The Last Two Decades. *Annual Review Microbiology*, 75, 427-447. doi:10.1146/annurev-micro-031721-020452
- Tu, W., Xu, J., Thompson, I.P., Huang, W.E. (2023). Engineering artificial photosynthesis based on rhodopsin for CO₂ fixation. *Nature Communications* 14, 8012. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43524-4>
- Tu, W., Huang, W.E. (2023) Rhodopsin driven microbial CO₂ fixation using synthetic biology design. *Environmental Microbiology*, 25(1), 126-130. Available from: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16243>

Small Things Considered

A blog for sharing appreciation of the width and depth of microbes and microbial activities on this planet. (<https://schaechter.asmblog.org/schaechter/>)

Comentario bibliográfico



Edición 19. Inmunología de Rojas

(2023). Juan Manuel Anaya C., Luis Miguel Gómez O., Beatriz Helena Aristizabal B., Luz Elena Cano R., Damaris Elena Lopera y William Rojas. (Eds.), *Inmunología de Rojas* (19ª. ed., pp. XX-XXI). Fondo Editorial CIB.

Prólogo Inmunología de Rojas, 19ª. ed.

Cuando me encontraba en el segundo año del pregrado en Medicina tuve una revelación, la cual aún hoy es difícil de comprender, cuando avizoré que en el futuro profesional me dedicaría a las ciencias básicas médicas, enfocándome en la inmunología. Esta era un área de las ciencias de la salud sin muchos referentes en nuestro país para dicha época; y eso que nos reseñamos a la década de 1980, casi a la vuelta del tiempo. Parte de esta decisión se concretó cuando llegó a mis manos un libro titulado de manera simple: *Inmunología*, escrito en su totalidad por William Rojas. Una de las características atrayentes de este libro era la facilidad de su lectura y la claridad para exponer temas complejos sobre el sistema de defensa humano, haciéndolo un libro ameno para los estudiantes en ciencias de la salud.

La importancia de la inmunología, como un área fundamental en medicina, ha sido impulsada en menos de medio siglo por dos pandemias: la infección por retrovirus de la inmunodeficiencia humana (VIH) y la del COVID-19, producida por el coronavirus SARS-CoV-2. Desde el siglo XIX se ha acumulado información e investigaciones acerca de los mecanismos que participan en la inmunidad natural o innata, y desde el siglo XX sobre la inmunidad específica o adaptativa. En esta última, de manera especial, sobre la inmunología humoral ejercida por los linfocitos B, ya que un producto secretado, los anticuerpos o inmunoglobulinas, son proteínas que tienen un amplio espectro de acción y hay muchas metodologías para su estudio y evaluación. El progreso de la inmunología celular mediada por los linfocitos T tuvo un proceso un poco más lento. Los avances en las técnicas de biología molecular, métodos de cultivo y análisis celular han permitido describir simultáneamente múltiples marcadores sobre una misma célula, llevando a determinar fenotipos, multifuncionalidad e interacciones celulares, generando un número representativo de datos. Esto no solo avanzó el conocimiento de la inmunología, sino que la complejizó aún más.

Con el paso de los años el estudio de los mecanismos innatos parecía haberse quedado suspendido en el tiempo, ya que estos habían sido descritos como repetitivos y estereotípicos, pero la realidad es otra; cada vez más interesantes y novedosos mecanismos de respuesta innata están siendo descritos, e inclusive aparecen nuevas formas terapéuticas para enfermedades con sobreexpresión o ausencia de estos mecanismos innatos. Por lo tanto, escribir acerca de la inmunología actual requiere a la vez de un amplio conocimiento y de una gran capacidad de sintaxis, que se ve reflejado en este libro, hoy llamado en honor a su creador e impulsor de la inmunología en Colombia, *Inmunología de Rojas*, que completa medio siglo de existencia desde su origen.

Después de realizar rotaciones en especialidades médicas en diferentes hospitales de Estados Unidos, Inglaterra y México, en áreas como hematología, gastroenterología y cardiología, entre otras, y al regresar a la ciudad de Medellín, la clínica SOMA de esta ciudad le solicitó al médico internista William Rojas Montoya organizar una serie de conferencias sobre inmunología. Un grupo de médicos hospitalarios se interesaron por este tema, por lo que el doctor Rojas tuvo que balancear su conferencia entre los aspectos básicos y clínicos de la inmunología, además de no enfocarse en resultados de modelos experimentales. Derivado de la compilación de su ciclo de conferencias y fechado en diciembre de 1972, se encuentra el primer borrador escrito a máquina, pero con el título de *Inmunología Clínica*. Tanto las diapositivas de las conferencias como el manuscrito se acompañaban de figuras hechas a mano por el mismo autor. En busca de un dibujante que mejorara sus ilustraciones, acudió a la ya desaparecida Editorial Colina de Medellín, donde le sugirieron que el manuscrito que tenía podría

convertirse en un libro casi listo para publicación. Así, la primera edición como libro oficial está fechada en junio de 1974. ¡Un acontecimiento! Se trataba del primer libro de inmunología publicado en idioma español.

La primera edición se enfatizó en la inmunología básica y una muy corta sección en la inmunología clínica. El doctor Rojas cabalgó en solitario como editor, y convocó otros colaboradores en temas específicos, hasta la decimotercera edición del libro, siempre con el apoyo del Fondo Editorial de la Corporación para la Investigaciones Biológica (CIB). A lo largo de los años se fueron incorporando como parte del equipo editorial profesionales de la salud en bacteriología, microbiología, veterinaria y medicina como Luz Elena “Lula” Cano, Damaris Lopera, Beatriz H. Aristizábal, Luis Miguel Gómez y Juan-Manuel Anaya. Estos profesionales escribieron nuevos capítulos y compilaron textos de otros colaboradores hasta alcanzar hoy en día, ya en la decimonovena edición, un número de veintiocho autores. Lo maravilloso es que para muchos de estos autores el mismo libro fue con antelación su propio texto guía de formación.

El libro sigue conservado las tres características principales desde su concepción: usar información de datos sobre inmunología en humanos, limitar las comparaciones con los modelos *in vitro* o animales, por ejemplo, ratones; y mantener los temas cortos para una lectura fácil y práctica para los estudiantes de diferentes áreas de la salud. La decimonovena edición, por lo demás una edición conmemorativa, abre con las generalidades y definiciones, acompañadas de ilustraciones de las principales células y moléculas inmunes presentadas a través del texto. Continúa la sección de inmunología básica con sus dos grandes brazos: la inmunidad innata en nueve capítulos y la inmunidad adquirida en once capítulos.

Además de los temas fundamentales de la inmunología, se incorporaron temas novedosos como las células linfoides innatas, la genética y epigenética de la respuesta inmune, y temas prácticos como la nutrición y la respuesta inmune, la inmunología de la reproducción o la evaluación del estado inmunológico. Precisamente, estos últimos capítulos referidos lo acercan más a un tipo de libro con inmensa aplicabilidad, la misma que le es tan propia a la misma inmunología en la práctica médica. Continúa esta última edición con una voluminosa sección de inmunología clínica, que demuestra el fuerte avance en esta área médica que, paradójicamente, aún no es una disciplina con especialización definida. Aquí se encuentran capítulos acerca de la defensa contra las infecciones, inmunodeficiencias, alergias y enfermedades autoinmunes, terminando con la modulación de la respuesta inmune.

Mucho hemos aprendido en las últimas décadas sobre los mecanismos inmunes participantes en la patogénesis de enfermedades y, por ende, nuevas formas de tratamiento más directo. Las terapias inmunológicas, como se denomina también uno de los capítulos, son un verdadero ejemplo de la medicina traslacional y el puntal de la medicina personalizada. Es un enorme privilegio ver la evolución de uno de los grandes compendios académico-científicos sobre la inmunología, al mismo tiempo que compartir y conocer sus editores y colegas que contribuyen a este. Tácito entre las líneas del libro se encuentra la inmensa diáspora de profesionales en diversas áreas que hemos sido influenciados por la obra y enseñanzas del doctor William Rojas. Parafraseando a Benjamín Franklin: “Escribe algo que valga la pena leer, o bien, haz algo sobre lo que valga la pena escribir”, la obra y la vida del doctor Rojas, por intermedio de este libro, así lo reflejan.

John M. González, MD, PhD.

Profesor titular, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
Presidente de la Asociación Colombiana de Inmunología.

Referencias

González, J. M. (2023). Prólogo. En Juan Manuel A., Luis Miguel G., Beatriz Helena A., Luz Elena C., Damaris Elena I. y William R. (Eds.), *Inmunología de Rojas* (19ª. ed., pp. XX-XXI). Fondo Editorial CIB.

Nota de la editora

Cuando le solicité al doctor John Mario González el comentario bibliográfico de la última edición de la Inmunología de Rojas, me propuso reproducir, con el permiso del Fondo editorial de la CIB, el prólogo que él había escrito para el libro en mención, y lo envió para mi información y concepto. Al leerlo fue muy claro que lo debíamos reproducir para brindarles a nuestros lectores una oportunidad de conocer los fascinantes detalles que encierra ese libro. Hoy, con el permiso respectivo, lo presentamos en este número 186 de la Revista.

Fui presentada al doctor William Rojas por mi inolvidable maestra y amiga, la doctora Ángela Restrepo, y en su compañía compartí con él muchas actividades académicas y sociales que me permitieron apreciar la gran amistad y admiración que los unía. Lamento que la doctora no hubiera podido disfrutar la lectura de este prólogo, el doctor Rojas sí alcanzó a hacerlo, pero es fácil imaginarme su reacción al recibir este número de la Revista—que siempre leía la primera y comentaba con la admiración sesgada por el cariño que nos teníamos—: me hubiera enviado la estrella para la solapa, como siempre hacía frente a lo que ella, generosamente, consideraba extraordinario.

El doctor Rojas murió hace un mes, de tal manera que este sentido prólogo es un obsequio doble para nuestros lectores, pues incluye el comentario bibliográfico de su celebrado libro y el In Memoriam que puntualmente publicamos para recordar el legado de los miembros de la comunidad científica que fallecen. Gracias a John Mario por este regalo. Espero que ustedes, lectores de nuestra Revista, lo disfruten plenamente.

In Memoriam



Vida y trayectoria profesional de Jaime Ignacio Lesmes Camacho

El sábado 30 de diciembre de 2023 en Cartagena, el matemático e ingeniero civil, graduado en la Universidad Nacional de Colombia y Doctorado en la Universidad de Fráncfort (Alemania), inició un viaje sin retorno al concluir su lucha contra una parálisis supranuclear progresiva.

Huérfano desde temprana edad, Jaime experimentó una vida marcada por esta adversidad. Cuando su abuelo falleció, lo dejó al cuidado de un amigo con el aporte de cierto capital para su educación. Gracias a su inteligencia, esfuerzo y compromiso, Jaime se graduó como bachiller en 1955 y en 1961 como profesional en Matemáticas e Ingeniería Civil. Hizo su posgrado en Matemáticas en la Universidad de Heidelberg en Alemania, para luego obtener el título de *Doctor philosophie naturalis* (Dr. phil. nat.) en 1967 en la Universidad de Fráncfort.

A su regreso a Bogotá ese mismo año, se vinculó a la Universidad Nacional como profesor especial y allí contribuyó durante tres años a la creación y organización de la maestría en Matemáticas. Posteriormente, fue profesor visitante en el Instituto Nacional de Matemática Pura y Aplicada, IMPA, de Brasil y en 1975 se integró a su planta como investigador. En 1980 ingresó a la Universidad de los Andes como profesor de planta en el Departamento de Matemáticas, del cual fue director en dos ocasiones (1984-1985, 1993-1995). En el 2007 fue galardonado con el “Premio de excelencia en la docencia” y continuó activo académicamente en esta institución hasta su retiro en julio de 2010. Durante su carrera también ocupó la presidencia de la Sociedad Colombiana de Matemáticas en los periodos 1968-1970 y 1983-1987, y fue conferencista invitado por instituciones nacionales e internacionales.

Por sus méritos, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales lo nombró miembro correspondiente en 1969 y miembro de número en el 2002, asignándole la silla No. 11. En el 2008 le fue otorgado el “Premio a la obra integral de un científico”.

Desde su nacimiento, el 29 de abril de 1939, Jaime superó todas las dificultades que se le presentaron, enfrentando la vida con esperanza, luchando siempre. Formó una comunidad de amigos y valoró con orgullo su papel como profesor de las Universidades Nacional y de los Andes, y como miembro de la Academia. Desde 1980 compartía cada Navidad con la familia Lesmes Arias en Cartagena, como muestra de su aprecio y agradecimiento. Fue un ser humano excepcional, gran amigo y riguroso matemático, quien ha partido hacia otra dimensión.

El matemático Jean Dieudonné decía que una condición necesaria para ser creador en esta disciplina era poseer el don de la intuición. Cuando se enfrenta un problema, se intuye una solución y paso a paso deben utilizarse las herramientas del rigor y la lógica para demostrarla.

Jaime cumplía a cabalidad con esa condición. Heredero y contemporáneo de la escuela Bourbaki, obsesionado por el rigor, podría decirse que abordó sus investigaciones vislumbrando sus resultados de antemano y formalizando luego las etapas que le dieran solidez a sus aportes a la matemática. Como profesor combinaba la lógica y el rigor con aportes pedagógicos que le permitieron formar a varias cohortes de matemáticos. Su libro *Análisis funcional* es un ejemplo de pedagogía y rigor.

Con Charum, Charris y Albis introdujo la matemática moderna en Colombia y permitió el salto de una matemática decimonónica, más orientada a las aplicaciones y a la Ingeniería, a una en la cual los fundamentos, el análisis y las estructuras eran los cimientos de una nueva manera de estudiar y enseñar esa forma de conocimiento en el país.

Su área básica de investigación fue el análisis, en especial las ecuaciones diferenciales, particularmente las de Navier-Stokes. Para el mundo matemático, este conocido problema, uno de los siete propuestos por la Fundación Clay como problemas del milenio, sigue abierto a la demostración de la existencia y la unicidad de soluciones de la ecuación. Es posible que Jaime hubiera intuido una respuesta y que buena parte de sus últimos años buscara formalizarla. Era muy reservado a la hora de anunciar, incluso en círculos cerrados, resultados que no tuvieran una completa formalización.

Después de su participación en los congresos de Matemáticas, no se refería a las importantes conferencias en charlas informales, prefería caracterizar a los míticos matemáticos con ironía y pocas palabras. Por ejemplo, del analista WR decía que era antipático como sus libros; opinaba que el teórico en catástrofes estaba perdiendo la razón al mezclar ciencia, teosofía, misticismo y veganismo, lo que parece ser una buena receta para lograr tal objetivo.

Académico José Fernando Isaza Delgado

Académico Diógenes Campos Romero

In Memoriam



Gabriel Toro González

El 24 de febrero pasado murió en Bogotá, a los 92 años, el médico y académico Gabriel Toro González. Vivió una vida llena de eventos y realizaciones. Nació en Concordia, Antioquia, terminó sus estudios de secundaria en Fredonia y los de medicina en Bogotá, en la Universidad Nacional de Colombia. Se especializó en anatomía patológica en la misma universidad e inmediatamente después en neuropatología, gracias a una beca en la Universidad Carlos de Praga, la más antigua y una de las más prestigiosas de Europa Central.

Su carrera profesional, muy fructífera, la desarrolló en su universidad, la Universidad Nacional, y por un largo tiempo, en forma simultánea, en el Instituto Nacional de Salud de Colombia. En diversas épocas prestó servicios como asesor, profesor y patólogo en otras facultades y hospitales del país. Fue fundador y miembro de la Sociedad de Patología de Bogotá, de la Asociación Colombiana de Neurología, de la Sociedad Colombiana de Neurobiología, de la Sociedad Colombiana de Parasitología y Medicina Tropical y varias más. En el Instituto Nacional de Salud fue nombrado investigador emérito y en la Universidad Nacional, profesor emérito. Fue miembro de número de la Academia Nacional de Medicina, de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y de la Academia de Medicina de Medellín. Recibió múltiples premios y distinciones en Colombia y el exterior. Sus publicaciones, artículos, capítulos y libros son innumerables y generó con ellos un gran impacto en la comunidad científica y en sus numerosos estudiantes.

La hoja de vida del Dr. Toro es, así presentada, impresionante, pero yo quisiera comentar algunos aspectos de su vida profesional y personal, aquellos que no se publican en las hojas de vida, pero que describen mejor su carácter y personalidad. Tuve el privilegio de ser su vecino de oficina en el Instituto Nacional de Salud durante muchos años y mantuve con él una relación amistosa, que me atrevo a decir fue algo protectora por su parte y me permitió a mí conocer anécdotas suyas y logros significativos.

Su viaje a Checoslovaquia y sus estudios en la Universidad Carlos de Praga marcaron su labor por toda la vida. Una universidad que fue inaugurada en 1349, y protegida por varios emperadores 'Carlos', debió ser extraordinariamente solemne y estirada para un joven, como él, de origen campesino antioqueño. Me cuesta trabajo imaginarlo hablando checo o alemán con el acento antioqueño que nunca perdió en castellano. Contaba historias de su viaje en compañía con otros dos estudiantes colombianos de una disciplina totalmente distinta: los directores de teatro (en aquel entonces, apenas actores incipientes) Santiago García y Pepe Sánchez. Del primero decía que era serio y riguroso en su formación, el segundo, según parece, volaba más fácilmente detrás de "amores peregrinos". El Dr. Toro debió ser muy juicioso, porque en los tres años de estudios de su súper especialización logró convertirse en la máxima autoridad de la neuropatología en Colombia y en un pionero indiscutible de su campo.

Fue colega, amigo y colaborador de Daniel Carleton Gajdusek, premio Nobel de Medicina de 1976, y lo invitó a eventos en Colombia y en el Instituto Nacional de Salud donde nos lo presentó. Gajdusek recibió el nobel por un descubrimiento revolucionario. Estudió en Nueva Guinea una enfermedad que aquejaba a algunas personas de la tribu Fore. La enfermedad la llamaban Kurú; la tribu Fore

practicaba el canibalismo ritual y quienes consumían el cerebro presentaban algo que parecía una infección, que demoraba años y a veces decenios en manifestarse como una demencia senil grave. Los estudios lo llevaron a proponer (con Stanley Prusiner, otro Nobel) que el ‘agente infeccioso’ era una proteína endógena, sin ningún material genético, que llamaron prión. Un tipo de ‘virus’ no convencional en extremo.

Se encontraron algunas otras enfermedades de comportamiento parecido; por ejemplo, Gabriel Toro estudió el síndrome de Creutzfeldt-Jakob en pacientes colombianos. En este caso también se desarrollaba la demencia senil grave muchos años después de un evento posiblemente infectante. Era muy difícil demostrarle una relación de causa efecto a estos eventos, pero el Dr. Toro logró recolectar una gran cantidad de evidencia en casos colombianos.

Su trabajo muchas veces parecía ser el de un detective policial que recoge evidencias de eventos remotos para descubrir lo que había pasado. Los colegas patólogos a veces bromeaban preguntándole “si entre los 25.000 casos que había revisado el día anterior” había encontrado algo sospechoso. Era una exageración, pero no estaba tan lejos de la realidad. Tenía el Dr. Toro una extraordinaria capacidad (sumada a una gran laboriosidad) para encontrar en archivos y colecciones de casos, las pistas que lo llevaban a resolver un misterio.

Recuerdo una presentación en el Instituto Nacional de Salud, en uno de los rutinarios seminarios del viernes a las 11 am (que añoro), sobre la asociación muy fuerte que encontró entre una cirrosis hepática particular, de mucha gravedad, y el uso de extractos de árnica consumidos oralmente. El árnica es una planta tradicionalmente usada como medicinal en muchos ungüentos, y hay quienes la preparan en extractos. Sus evidencias eran tan fuertes y tal su persistencia en difundir la advertencia que, creería que evitó con este trabajo mucha enfermedad y sufrimiento.

Recuerdo también sus trabajos sobre algunos efectos esporádicos de la vacuna antirrábica en personas a las que fue aplicada. La vacuna en esos tiempos era en verdad un preparado muy crudo de macerados inactivados de cerebros de ratón infectados con virus de la rabia, y además se aplicaba un número muy grande de dosis. La enfermedad era tan grave que el riesgo de tal vacunación se justificaba. Pero, gracias a sus advertencias se logró mejorar las preparaciones y reducir al mínimo posible el número de aplicaciones.

Su labor como editor también fue notable. Hubo libros de su especialidad (recuerdo uno muy bellamente editado con su colega Gustavo Román) y, muy apreciado por mí, un libro extenso sobre la historia del Instituto Nacional de Salud cuando este cumplió 80 años de fundado (en sus orígenes como Laboratorio Nacional Samper Martínez) y recibió la cruz de Boyacá. Este libro, que ojalá fuera más valorado en el futuro como la historia de una verdadera epopeya de la ciencia en el país, fue escrito por muchos autores, todos trabajadores del instituto, y editado por Gabriel Toro, Jorge Raad y Carlos A. Hernández.

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales le otorgó el premio a la obra integral de un científico en el año 2009. Para el estudio de su candidatura se recogieron sus publicaciones, y recuerdo que ocuparon cinco muy gruesos (realmente muy gruesos) volúmenes. Acá solo me resultó posible mencionar algunos hechos anecdóticos, y de memoria.

Debo mencionar a su familia que siempre fue motivo de gran orgullo para él: su esposa Gladys y sus hijos Tatiana y José Antonio. Jugaba ajedrez razonablemente bien (requisito importante para pertenecer al laboratorio de patología del INS), leía mucho y era un conversador inteligente, interesante y divertido. Alguna vez tuve la oportunidad de visitar a la familia en su finca de La Vega, donde él se dedicó, en algún momento de la vida, a restaurar y proteger pequeños bosques nativos.

Siento que en este obituario estoy dando una visión necesariamente muy limitada de su compleja personalidad, seguramente hubiera sido necesario integrar muchas otras visiones y experiencias para hacerle real justicia. Dejó huellas muy importantes en quienes lo conocimos y tuvimos la suerte de ser sus amigos.

Moisés Wasserman

Académico honorario ACCEFYN

Toro, G., Hernández, C.A., Raad, J. (1998) Instituto Nacional de Salud-1917-1997: una historia, un compromiso, Instituto Nacional de Salud. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/instituto-nacional-de%20salud-1917-1997.pdf>

A nuestros lectores y autores

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, psicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research*), *Current Mathematical Publications*, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik*, *Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

Proceso de evaluación por pares

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará como un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Ética de la publicación

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN), acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Ver documento pdf (anexo)

Política de acceso abierto

La página web de la Revista (www.raccefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

Directrices para autores

Tipología de los artículos publicados en la Revista

Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

Artículos cortos: documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

Artículos de posesión o artículos de revisión de tema: documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

Cartas al editor: posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

Comentarios bibliográficos: son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

Corrección de los autores

Fe de erratas

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).
3. La participación de los autores en el trabajo deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.
5. La terminología debe registrarse 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.raccefyn.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.raccefyn.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.accefyn.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.

