



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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





ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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

Vol. 48 · Número 187 · Págs. 247-466 · Abril - Junio de 2024 · Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

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

Asistente editorial Carolina Acosta

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

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,
Medellin, 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

- 15 Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- 15 Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Rafael Julián González Hernández, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Carlos Duque, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 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 Martínez, 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
- Luis Español González, Ph. D.
Universidad de la Rioja, España
 - Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia
 - Clara Elena Sánchez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- Fernando Zalamea Traba, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Carlos Enrique Mejía, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
 - Francisco Marcellán, Ph. D.
Escuela Politécnica Superior, Madrid, España
 - Carolina Benedetti Velásquez, Ph.D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
 - Fernando León Saavedra, Ph. D.
Universidad de Cádiz, España

Comité científico internacional

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

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

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

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

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936

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

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

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



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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

Vol. 48 · Número 187 · Págs. 247-466 · Abril - Junio de 2024 · Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Físicas Physical Sciences

Original article

Analytical solutions in the modeling of the endovenous laser ablation

Soluciones analíticas en la modelación de la ablación endovenosa con láser

Luisa Consiglieri 254

Artículo original

Respuesta dinámica de la magnetización de una nanopartícula de magnetita a un campo magnético alterno

Dynamic response of the magnetization of a magnetite nanoparticle to an alternating magnetic field

Nathaly Roa, Johans Restrepo 271

Artículo original

Diversidad taxonómica de hormigas en áreas verdes urbanas en una ciudad de tamaño medio en los Andes centrales de Colombia

Taxonomic diversity of ants in urban green areas in a medium-sized city in the Central Andes of Colombia

Andrés Felipe Grajales-Andica, Delly Rocío García-Cárdenas 281

Artículo original

Una nueva especie de *Souroubea* (Marcgraviaceae, Ericales) de Colombia

A new species of *Souroubea* (Marcgraviaceae, Ericales) from Colombia

Diego Giraldo-Cañas, Edwin Trujillo-Trujillo, Carlos Parra-O 298

Artículo original

Myrcia coquiensis (Myrtaceae), una nueva especie de los bosques húmedos tropicales del Chocó, Colombia

Myrcia coquiensis (Myrtaceae), a new species from the tropical humid forests of Chocó, Colombia

Carlos Parra-O., Gian Paolo Daguer, Fausto Moreno Bonilla 307

Artículo original

Nuevos registros de la marmosa grácil duende *Gracilinanus dryas* (Marsupialia: Didelphidae) en la cordillera Oriental de Colombia, con notas sobre su biología reproductiva y ontogenia

New records of the wood sprite gracile mouse opossum *Gracilinanus dryas* (Marsupialia: Didelphidae) from the Colombian Eastern Cordillera with notes on its reproductive biology and ontogeny

Camilo Ernesto Angarita-Yanes 314

Ciencias Naturales Natural Sciences

Artículo original

La ecología dinámica del hábito alimentario de alevines de bocachico (*Prochilodus magdalenae*) en condiciones controladas

Dynamic ecology of bocachico (*Prochilodus magdalenae*) fingerlings' feeding habits under controlled conditions

Masashi Takatsuka 325

Artículo original

Murciélagos devoradores de insectos de El Tuparro: nuevas revelaciones sobre su distribución

Insect-eating bats from El Tuparro (Vichada, Colombia): New revelations about their distribution

Nathaly Calvo-Roa, Yaneth Muñoz-Saba, Diego Casallas-Pabón 341

Artículo original

***Cordia nicandroides*, una llamativa nueva especie de Cordiaceae del norte de Colombia**

Cordia nicandroides, a striking new species of Cordiaceae from northern Colombia

José Luis Fernández-Alonso, Álvaro A. Cogollo-Pacheco 354

Artículo original

Los peces desérticos del bajo río Pisco, costa del Pacífico, Ica, Perú

Desert fishes of the Lower Pisco River, Pacific coast, Ica – Perú

José Apaza, Katia Aylas, Lenin D. Chumbe-Nolasco, Silvia Valenzuela, Giulia Raunelli, Lucero Stephany Amézquita-Bejar, Yuli Dulcina Espinoza-Rojas, Hernán Ortega 368

Artículo original

Ephemeroptera (Insecta) en un gradiente altitudinal de la región andino-amazónica colombiana: validación de una regla de Rapoport

Ephemeroptera (Insecta) in an altitudinal gradient in the Colombian Andean-Amazonian region, Caquetá: validating a Rapoport's rule

Jhonatan Gutiérrez-Garaviz, Odete Rocha, Marlon Peláez-Rodríguez, Oscar Agredo-Jiménez 383

Presentación

Sección especial: los hipopótamos invasores en Colombia

Special section: Invasive hippos in Colombia

Martha Patricia Ramírez Pinilla 396

Opinión

Breve recuento histórico y una reflexión sobre los hipopótamos del Magdalena Medio colombiano

Brief historical account and a reflection on the hippos in the Colombian Magdalena Medio region

Germán Jiménez, David Santamaría-Castiblanco, Amanda Subaluskay, Elizabeth Anderson 397

Opinión

Reflexiones sobre el manejo de la invasión de hipopótamos en Colombia: deber, virtud y consecuencias

Reflections on the management of the hippos invasion in Colombia: Duty, virtue, and consequences

Rafael Moreno-Arias 401

Opinión

Los hipopótamos introducidos en Colombia: una oportunidad para los estudios biológicos y la educación ambiental

Introduced hippos in Colombia: a chance for biological studies and environmental education

Héctor E. Ramírez-Chaves, Néstor Roncancio-Duque, Darwin M. Morales-Martínez 404

**Sección especial:
los hipopótamos
invasores en
Colombia**

Special section: Invasive
hippos in Colombia

Opinión

Acciones de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare para atender la problemática de los hipopótamos invasores en Colombia

Actions undertaken by the Autonomous Negro and Nare Rivers Basin Regional Corporation (Cornare) to address the problem of invasive hippos in Colombia

David Echeverri López, Sofía Fernández Africano 407

Opinion

In the interest of hippos: Reflecting on the interests of the Colombian hippo population and their management

Por el interés de los hipopótamos: reflexión sobre los intereses de la población colombiana de hipopótamos y su manejo

Elliot Doornbos 413

Club de revistas/Journal Club

Enigmática planta fósil con arquitectura tridimensional de crecimiento arborecente del Carbonífero temprano de New Brunswick, Canadá

Enigmatic fossil plants with three-dimensional, arborescent growth architecture from the earliest Carboniferous of New Brunswick, Canada

José Murillo-A. 417

Opinión/ Opinion

Tracing the origin and evolution of the orchid family through genes and trees

El origen y la evolución de la familia de las orquídeas a través de genes y árboles

Oscar A. Pérez-Escobar, Diego Bogarín, Carlos Jaramillo 424

Las rotaciones en la escala nanométrica: el efecto Moiré en los materiales 2D

Rotations at the nanoscale: the Moiré effect in 2D materials

Josué David Hernández-Varela, Felipe Cervantes-Sodi, Skarleth Estefanía García-Trujillo 431

Fuego y agua: cambio global, resiliencia de los bosques y riesgo del punto de no retorno para la Amazonía

Fire and water: global change, forest resilience, and the risk of the point of no return for the Amazon

Dolors Armenteras 438

Un helecho diminuto desafía los límites de la expansión genómica en eucariotas

A tiny fern defies the limits of genome expansion in eukaryotes

Lisa Pokorny, Jaume Pellicer 445

Comentario bibliográfico/Bibliographic commentary

A monograph of the genus *Geranium* L. (Geraniaceae).

Una monografía del género *Geranium* L. (Geraniaceae)

Ramón Morales 449

La tesis que me parió. Manual para abordar, elaborar y terminar un trabajo académico

The thesis that bore me. Manual to approach, elaborate and conclude an academic work.

Pedro Fernández de Córdoba, Víctor M. Castaño 451

Enfoque y alcance

Focus and Scope 453

Nuestra portada/Our cover



doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2569>

Figura 5. La serie de fotografías muestra algunos detalles de la particular fructificación en esta especie. Amplio cáliz fructífero acrescente y apergaminado –al que alude el nombre dado a la especie–, el fruto drupáceo y nuciforme, el mesocarpio suberoso, el monopireno leñoso con crestas radiales, que engloba a los cuatro endocarpos; las 2-4 semillas desarrolladas.

Fotografías de Á. Cogollo-Pacheco y J.L. Fernández-Alonso. A partir de las colecciones *Cogollo 14260* (JAUM, MA) y *Cogollo 14256* (JAUM).

Figure 5. The series of photographs shows some details of the particular fruiting in this species. Wide acrescent and parchment-like fruiting calyx - to which the name given to the species alludes -, the drupaceous and nuciform fruit, the suberose mesocarp, the woody monopirene with radial ridges, which encompasses the 2-4 developed seeds.

Photographs by Á. Cogollo-Pacheco and J.L. Fernández-Alonso. From collections *Cogollo 14260* (JAUM, MA) and *Cogollo 14256* (JAUM).

Cordia nicandroides, una llamativa nueva especie de Cordiaceae del norte de Colombia

Los frutos y semillas de la portada corresponden a la nueva especie de árbol del norte de Colombia, *Cordia nicandroides* (Cordiaceae), descrita en este número.

De las 350 especies conocidas en el género pantropical *Cordia* L., 32 se habían registrado hasta la fecha en territorio colombiano, pero ninguna presentaba los frutos grandes, drupáceos, nuciformes y protegidos por un cáliz acrescente, ceñido y pentacostado, que evoca un tipo de dispersión hidrócora y que caracteriza a esta nueva especie como rasgo más distintivo. Para nuestra sorpresa, esta especie asociada a cursos de agua y a bosques primordialmente húmedos en Colombia solo presentaba una relación morfológica clara con un par de especies (*C. oncocalyx* y *C. glazioviana*) endémicas de la Caatinga y la Mata atlántica del oriente de Brasil, que presentan dispersión anemócora -especies que por largo tiempo conformaron el género endémico *Auxemma* Miers, que hoy se considera integrante del género *Cordia*-.

Con base en la información de campo conocida, se propone para esta nueva especie la categoría de amenaza de EN B2 (en peligro), de acuerdo con los criterios de la IUCN.

Cordia nicandroides, a striking new species of Cordiaceae from northern Colombia

The fruits and seeds on the cover correspond to the new tree species from northern Colombia, *Cordia nicandroides* (Cordiaceae), described in this issue.

Of the 350 known species in the pantropical genus *Cordia* L., 32 had been recorded to date in Colombian territory, but none had the large, drupaceous, nuciform fruits protected by a pentacostrate, girdled, acrescent calyx, which evokes a type of hydrocoral dispersal and which characterizes this new species as its most distinctive feature. To our surprise, this species associated with watercourses and primarily humid forests in Colombia only presented a clear morphological relationship with two species (*C. oncocalyx* and *C. glazioviana*) endemic to the Caatinga and Atlantic Forest of eastern Brazil, which show anemochorous dispersal -species that for a long time formed the endemic genus *Auxemma* Miers, which today is considered part of the genus *Cordia*-.

Based on the known field information, a threat category of EN B2 (endangered) is proposed for this new species, according to the IUCN criteria.

Original article

Analytical solutions in the modeling of the endovenous laser ablation

Soluciones analíticas en la modelación de la ablación endovenosa con láser

 Luisa Consiglieri

Independent Researcher, Lisboa, Portugal

Abstract

We modeled the operative treatment of incompetent truncal veins using endovenous laser ablation (EVLA). The main concern regarding the thermoablative technique is tissue damage, which is correlated with (1) the energy provided by the laser power and (2) temperature distribution. Our objective was to accurate the two functions, namely the fluence rate and the temperature, depending on the thermoablative technique and the endovenous laser treatment (ELT). First, we considered three differential equations: diffusion, heat, and bioheat equations in the endovenous-perivenous multidomain to describe the lumen, the vein wall, the tissue pad, and the skin. Second, we examined the power source according to the Beer-Lambert law in the incident beam irradiance and the heat source as the so-called absorbed optical power density. Third, we checked out the heat transfer at the skin boundary according to Newton's law of cooling, which stands for a Robin boundary condition. For this new model, we proposed exact solutions: applying differential equations techniques, we solved (1) a diffusion approximation of the radiative transfer equation under the considered power source, and (2) the coupled heat and bioheat equations under the considered heat source accomplished with the Robin boundary condition. Then, we graphically illustrated the fluence rate profile and discussed its time dependence and steady state. Besides, we discuss thermal damage to the vein-tissue system and present open problems.

Keywords: EVLA; fluence rate; Beer-Lambert law; Newton's law of cooling; bioheat transfer equation; exact solutions.

Resumen

Modelamos el tratamiento quirúrgico de las venas varicosas mediante ablación endovenosa con láser (E.L.A.V.). La principal preocupación en torno a la técnica termoablativa es el daño térmico, el cual se correlaciona con (1) la energía dada por la potencia del láser y (2) la distribución de la temperatura. Nuestro objetivo fue precisar las dos funciones: la tasa de fluencia y la temperatura, al usar la técnica termoablativa y el tratamiento endovenoso con láser. Primero, consideramos tres ecuaciones diferenciales, a saber, las de difusión, calor y biocalor en el sistema endovenoso-perivenoso para describir el lumen, la pared de la vena, la almohadilla de tejido y la piel. En segundo lugar, examinamos la fuente de potencia a partir de la ley de Beer-Lambert para establecer la irradiancia del haz incidente y la fuente de calor como densidad de potencia óptica absorbida. En tercer lugar, tuvimos en cuenta la transferencia de calor en el límite de la piel según la ley de enfriamiento de Newton como condición de frontera de Robin. Para este nuevo modelo propusimos soluciones exactas: la aplicación de ecuaciones diferenciales para resolver (1) la aproximación a la difusión mediante la ecuación de transferencia radiativa bajo la fuente de potencia considerada, y (2) de ecuaciones acopladas de calor y biocalor bajo la fuente de calor lograda mediante la condición de frontera de Robin. Posteriormente, se graficó la tasa de fluencia y se discutió su dependencia con respecto al tiempo y el estado estacionario. Además, se presentan aquí algunas consideraciones en torno a los daños térmicos en el sistema vena-tejido y algunos problemas aún pendientes.

Palabras clave: E.L.A.V.; tasa de fluencia; ley de Beer-Lambert; ley de enfriamiento de Newton; ecuación de transferencia de biocalor; soluciones exactas.

Citation: Consiglieri L. Soluciones analíticas en la modelación de la ablación endovenosa en láser. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):254-270, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.2551>

Editor: Jairo Roa Rojas

Corresponding autor:
Luisa Consiglieri;
lconsiglieri@gmail.com

Received: January 21, 2024

Accepted: March 21, 2024

Published on line: June 6, 2024



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

Introduction

Conventional high ligation and stripping (crossectomy of the saphenofemoral junction (SFJ) with great saphenous vein (GSV) stripping) and radio-frequency (RF) ablation therapies are passing their legacy to the new technologies such as the laser (and the ultrasound-guided foam sclerotherapy) in the treatment of varicose veins (**Carradice et al.**, 2011; **Etlík et al.**, 2013; **Palombi et al.**, 2024; **Rasmussen et al.**, 2011; **Theivacumar & Gough**, 2011). Also the extremely high degree of recurrence occurring after previous ligation and stripping of the great saphenous vein ask for the safety and efficacy of endovenous laser ablation as a posterior treatment for recurrent symptomatic saphenous insufficiency (**Anchala et al.**, 2010). Clinical trials have been conducted before and after the EndoVenous Laser Ablation (EVLA) treatment. Clinical studies address failure as patency or recanalization of the GSV or residual symptoms (**Firouznia et al.**, 2013), the occlusion, ulcer healing, paresthesia rates and postoperative pain (**Özkan & Saritürk**, 2012; **Rathod et al.**, 2010), as other adverse side effects (**Schwarz et al.**, 2010; **Sharif et al.**, 2006). In (**Tseng et al.**, 2022), the authors describe and report the symptom severity. Although it is unknown its cause even an ischaemic stroke following endovenous laser treatment of varicose veins is reported (**Caggiati & Franceschini**, 2010). In the recent years, several clinical follow-up studies (**Doganci & Demirkilic**, 2010; **Gale et al.**, 2010; **Goldman, Mauricio, & Rao**, 2004; **Min, Khilnani, & Zimmet**, 2003; **Oh et al.**, 2003; **Palombi et al.**, 2024; **Puggioni et al.**, 2005) have reporting different laser systems to treat incompetent GSV. Indeed, the advantages of the endovenous laser surgery are more relevant than its complications (**Ash & Moore**, 2010). In (**Palombi et al.**, 2024), the efficacy and safety endpoints after the EVLA treatment are carried out.

The fibre type is the single most significant factor related to treatment outcome (**Prince et al.**, 2011). For effective endovenous laser (EVL) therapy, the laser wavelength varies from $\lambda = 810$ nm (**Sharif et al.**, 2006; **Theivacumar & Gough**, 2011) until to 980 nm (**Schmedt et al.**, 2010), at power settings of 9 W to 17 W (**Rathod et al.**, 2010) according to the diameter and severity of varicose veins. The 1470-nm wavelength EVL system successfully closes saphenous veins but not acts as "anesthesia-less thermal ablation technology" (**Almeida et al.**, 2009). In (**Proebstle et al.**, 2004), the authors found that after EVLA with low-energy density, worse results and more relapses could be expected than with higher-energy doses.

A vast literature has been playing a prominent and broad-spectrum role in the study of the temperature dependence of the thermophysical and mechanical properties of biological tissues (see (**Bianchi et al.**, 2022) and the references therein). The aim of some studies is to determine how the heat sink effect of the blood flow inside the vessel may either be measured (**Consiglieri**, 2012; **Consiglieri, dos Santos, & Haemmerich**, 2003; **Kotte, van Leeuwen, & Lagendijk**, 1999), distort coagulation volume during thermal therapies (**Horng et al.**, 2007; **Vuylsteke et al.**, 2011), or protect the vessel wall in the proximity of an RF-assisted resection device (**González-Suárez et al.**, 2014). In this last work, the tissue vaporization was modelled by the enthalpy method, while parametric studies were conducted in (**Consiglieri**, 2012) to prove the blood flow has a cooling effect during RF ablation treatment. The present goal goes somewhat on the opposite direction: to study how the laser wavelength behaves and the damage of blood vessels is influenced.

The finding of mathematical models is essential to control the temperature, and to prevent postoperative complications. It includes handling of mathematical problems generated by the application of models to real thermal conditions. The combination Mordon's optical-thermal model with the presence of a strongly absorbing carbonized blood layer on the fibre tip is introduced in (**Van Ruijven et al.**, 2014) by neglecting the Arrhenius damage integral, and after is developed in (**Poluektova et al.**, 2014). We refer to (**Marqa et al.**, 2013) a finite element modelling of the influence of air cooling that simulates the perisaphenous subcutaneous tumescent saline solution infiltration. In (**Katta et al.**, 2022) a finite element

model is developed for the study of the limitation in laser coagulation of large diameter blood vessels during irradiation. Global unique solvability of the conductive heat transfer problem is proved in (Chebotarev, Pak, & Kovtanyuk, 2023) and numerical analysis is presented to evaluate the behaviour of temperature fields. Some analytical solutions to the bioheat transfer problem are studied in multiregion (Consiglieri, 2016; Consiglieri, 2013), where the Joule effect is assumed to be constant.

Here, we follow the whole path from the phenomenological interpretation of thermal therapy to scientific computing for producing simulations. Our objective is to accurate the heat source by establishing explicit expressions for (1) the fluence rate and (2) the temperature, whose expressions can be implemented in computer programs. Bearing this in mind, we firstly state a new mathematical model. Then, this new model is analytically solved such that the final results will be very fast to execute. To validate our model, we compare our results with experimental measurements.

The structure of the present work is as follows. Next section, we state the model under study, in the endovenous-perivenous multidomain, describing the lumen, the vein wall, the tissue pad and the skin. In first subsection, we consider a diffusion approximation of the radiative transfer equation taking the Beer–Lambert law into account in the irradiance of the incident beam. In second subsection, we consider the heat and the bioheat equations, under the heat source as dependent on the first subsection. Moreover, we consider the heat transfer at the skin boundary according to the Newton law of cooling. Last subsection addresses the dimensionless indicator of damage. Section auxiliary solutions covers the methodology for the derivation of the exact solutions in cylindrical coordinates. We use the method of separation of variables, in particular, the Bernoulli–Fourier technique in first subsection. Second subsection covers a particular solution according to Duhamel principle. We present the results and discussions and make some concluding remarks in the last two sections, respectively.

Mathematical model

The optical laser fibre is inserted into the sheath so that the fibre tip extends 2 cm beyond the end of the sheath to avoid the melting of the sheath material (Schmedt *et al.*, 2010; Sharif *et al.*, 2006). The geometry of the fibre–tissue system is assumed to be as follows (cf. Fig. 1). The fibre probe (with radius r_f) is assumed to be centred in the middle of the vein, where the vein segment $\Omega_v = \Omega_{\text{lumen}} \cup \Omega_w$ is assumed to be cylindrical with r_i and ε being the inner radius and the thickness of the venous wall, respectively. In vivo, the thickness of the venous wall is approximately one tenth the width of its blood column: $\varepsilon = r_i/5$.

The saphenous vein is considered to be parallel to the skin surface (Marqa *et al.*, 2013). Then, the complete domain $\Omega = \Omega_v \cup \Omega_{\text{pad}} \cup \Omega_{\text{skin}}$ is assumed to be constituted by axially half-cylindrical volumes, namely vein, perivenous and skin tissues. The tissue around the venous may be considered homogenous. The thickness of the perivenous and skin tissues are $l_{\text{pad}} = 10\text{mm}$ and $l_{\text{skin}} = 3\text{mm}$, respectively.

The procedure begins by inserting the laser sheath and positioning the bare tip below SFJ. At time $t = 0$, the fibre tip is located at axial coordinate z_0 . The fibre is kept in a piecewise pull-back model until the level of the knee, with each pulling back of the fibre being at a constant velocity v . During the off period, the laser fibre and the introduced catheter are pulled back by increments, and then a further irradiation pulse is activated. This cycle is repeated until a desired fixed distance. The piecewise pull-back in the application of laser light is preferred because the manually made continuous pull-back depends on the operating surgeon technique and experience. For each fixed irradiation time $t_{\text{end}} > 0$, $L > 0$ stands for the corresponding length of the treated vein segment.

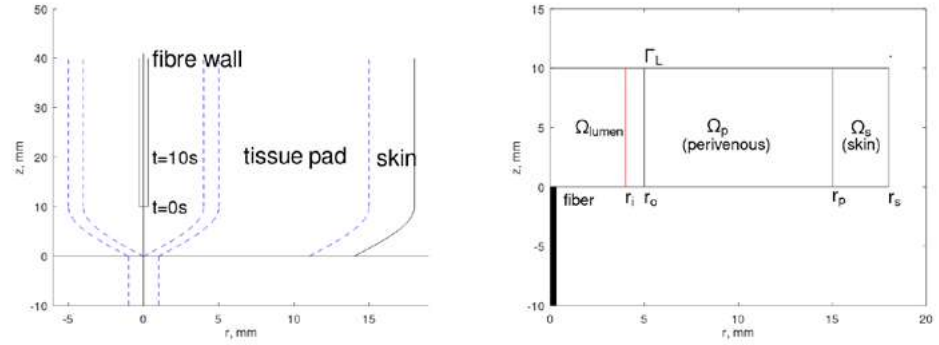


Figure 1. (a) Schematic sagittal representation of the endovenous fibre at the initial instant of time $t = 0$. (b) Schematic cylindrical representations in 2D of the lumen $\Omega_{\text{lumen}} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 < r_i^2\} \times]0; L[$, the wall $\Omega_w = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : r_i^2 < x^2 + y^2 < (r_i + \varepsilon)^2\} \times]0; L[$, the tissue pad $\Omega_{\text{pad}} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : (r_i + \varepsilon)^2 < x^2 + y^2 < r_p^2\} \times]0; L[$, and the skin $\Omega_{\text{skin}} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : r_p^2 < x^2 + y^2 < r_s^2\} \times]0; L[$.

We assume that outer surface $\Gamma_L = \{(x, y) : x^2 + y^2 < r_s^2\} \times \{L\}$ is an insulating boundary, that is, there is no outflow.

Diffusion approximation of the radiative transfer equation

The light power emitted out of the fibre tip into the ambient blood is scattered towards the vein wall and the surrounding tissue. The fluence rate ϕ [W m^{-2}] verifies the diffusion equation (Star, 1995)

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} - D \Delta \phi + \mu_a \phi = S \quad \text{in } \Omega \times]0; t_{\text{end}}[, \quad (1)$$

where:

$v = c/n$ is the speed of light in the tissue [m s^{-1}], as determined by the relative refractive index n ;

$D = \frac{1}{3(\mu_a + \mu'_s)}$ is the diffusion coefficient;

μ_a is the absorption coefficient [m^{-1}];

$\mu'_s = (1 - g)\mu_s$ is the reduced scattering coefficient [m^{-1}], with g being the scattering anisotropy coefficient, and μ_s being the scattering coefficient;

S is the source of scattered photons [W m^{-3}], which represents the power injected in the unit volume.

Usually S is assumed to be a source point in order to use the Green functions in the determination of the solution ϕ of the diffusion equation (1). For a single spherically symmetric point source emitting P_{laser} [W], the form of ϕ at a distance r from the source is $P_{\text{laser}} \exp(-\mu_{\text{eff}} r) / (4\pi D r)$ (Mordon, Wassmer, & Zemmouri, 2006), where $\mu_{\text{eff}} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)}$ represents the effective attenuation coefficient.

Laser energy is delivered along the vein with a continuous emission (Anchala *et al.*, 2010), and a fibre pull-back is kept at about 1-cm increment every 10 seconds (Ash & Moore,

2010). In this work, we consider

$$S(r, z, t) \equiv S(r_f, z, t) = \frac{P_{\text{laser}} \mu_s (\mu_t + g\mu_a)}{\pi r_f^2 (\mu_a + \mu'_s)} \exp[-\mu_t(z + vt)], \tag{2}$$

for all $(r, z, t) \in [0; r_f[\times] - vt; L[\times] [0; t_{\text{end}}[$. Here, $\mu_t = \mu_a + \mu_s$ stands for the attenuation coefficient *i.e.* the reciprocal of the average distance light travels before being scattered or absorbed by the medium. The above expression stands for the Beer–Lambert law (Prah1, 1995) when $t = 0$, while stands for the velocity of the fibre pull-back with increment $L = 10\text{mm}$ and time $t_{\text{end}} = 10\text{s}$, *i.e.* at a velocity $v = 1.0\text{mms}^{-1}$.

Heat transfer

The heat energy was delivered directly to the vein wall (Sharif *et al.*, 2006), due to that the compression reduces the vein diameter. The heat transfer due to the energy of light deposited is described by the following heat and bioheat transfer equations:

in $\Omega_{\text{lumen}} \times]0; t_{\text{end}}[$:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \tag{3}$$

in $(\Omega_w \cup \Omega_p \cup \Omega_s) \times]0; t_{\text{end}}[$:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + c_b \omega (T - T_b) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \tag{4}$$

where:

T is the temperature [K];

\mathbf{u} is the blood velocity vector [ms^{-1}];

ρ is the density [kg m^{-3}];

c_p is the specific heat capacity per unit mass [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$];

k is the thermal conductivity [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$];

q is the heat source caused by laser power [W m^{-3}].

Considering laminar flow, the blood velocity is scalar, and the convective term in (3) reads $u \frac{\partial T}{\partial z}$. In the heat equation (3), $\rho = \rho_b$ and $c_p = c_b$ denote the density and the specific heat capacity of the blood, respectively. The Pennes bioheat transfer equation (4), which distinguishes itself from nonliving systems, includes the effects of blood perfusion $\omega = \rho_b w$ [$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$] that occurs in the capillary bed, that is, the energy transfer term $-c_b \omega (T - T_b)$ is consequence of the mass transport of blood through tissue (cf. Table 1). Here, T_b represents the temperature of the blood (assumed to be 38°C), w denotes the volumetric flow [s^{-1}], and $c_b \omega$ accounts for the heat conducted in direction of the contribution of flowing blood to the overall energy balance, before the critical coagulation temperature.

Table 1. Thermal parameters (Marqa *et al.*, 2013; Mordon, Wassmer, & Zemmouri, 2006).

	unit	blood	vein wall	perivenous tissue	skin
k	$\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	0.52	0.53	0.21	0.21
ρ	kg m^{-3}	1060	1080	1000	1109
c_p	$\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	3600	3690	2350	3500
ω	$\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$		1.08	1	0.5545
A	s^{-1}	7.6e+66	5.6e+63	5.6e+63	3.1e+98
E_a	J mol^{-1}	4.48e+05	4.30e+05	4.30e+05	6.28e+05

The heat source q is induced by the conversion of laser light into heat, the so-called absorbed optical power density, since the heat generated by body metabolism is negligible. The distribution of absorbed energy within the irradiated volume is governed both by the absorption and the scattering properties of the tissue at the specific wavelength used:

$$q = \mu_a \phi. \tag{5}$$

The heat exchange on the skin surface is given by the Newton law of cooling

$$k \frac{\partial T}{\partial r} + h_{\text{air}}(T - T_{\text{air}}) = 0 \tag{6}$$

if $r = r_s$, $-vt < z < L$ and $t > 0$. Here, h_{air} is the heat transfer coefficient of the air, and T_{air} denotes the room temperature. In (Marqa *et al.*, 2013), h_{air} is assumed to obey an equation that involves the thermal conductivity of the air, the characteristic length of flow domain, and the Prandtl and Reynolds numbers.

On the remaining boundary, no heat transfer outflow is assumed:

$$\frac{\partial T}{\partial z}(r, z, t) = 0 \quad \text{if } 0 < r < r_s, z = -vt, L, \text{ and } t > 0.$$

Thermal damage to the vein-tissue system

Thermal damage is consequence of the water content of the constituent cells reaches 100°C . By this reason, the main predictor of the thermal damage is the dense microbubble formation that is commonly seen at the area.

Let t_{crit} be the time correspondent to the dimensionless indicator of damage when it is equal to one: $\Omega(t_{\text{crit}}) = 1$, *i.e.* from the Arrhenius burn integration

$$\frac{1}{A} = \int_0^{t_{\text{crit}}} \exp \left[-\frac{E_a}{RT(r, z, \tau)} \right] d\tau, \tag{7}$$

where R is the universal gas constant ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), A is a frequency factor [s^{-1}], and E_a is the activation energy for the irreversible damage reaction [J mol^{-1}]. Approximating the above integral by the lower and upper Riemann sums with the partition constituted by a finite number M of subintervals of $]0, t_{\text{crit}}[$, of equal length, t_{crit} obeys

$$\sum_{m=1}^M \exp \left[-\frac{E_a}{RT(r, z, \frac{m}{M} t_{\text{crit}})} \right] < \frac{M}{A t_{\text{crit}}} < \sum_{m=1}^M \exp \left[-\frac{E_a}{RT(r, z, \frac{m-1}{M} t_{\text{crit}})} \right]. \tag{8}$$

Auxiliary solutions

There exist several processes of derivation of the required solutions (Özisik, 2012). Here, we firstly use the method of separation of variables to find a family of elementary solutions to the parabolic equation and the boundary condition, and then the principle of superposition to construct a solution satisfying the initial condition. Hereafter, the domain subscripts are dropped out by the sake of simplicity whenever the meaning of the parameters is well understood in each domain.

In cylindrical coordinates, the Laplace operator reads (see, for instance, (Özisik, 2012, p. 9))

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

with $(r, \theta, z, t) \in]0; r_0[\times]-\pi; \pi[\times]0; L[\times]0; t_{\text{end}}[$, where $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ and θ is the polar angle measured down from the vertical axis z .

Taking the angular symmetry, we seek for solutions of the generic PDE:

$$\alpha \frac{\partial v}{\partial t} + b \frac{\partial v}{\partial z} - a \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + Bv = f, \tag{9}$$

defined in $]0; r_0[\times]0; L[\times]0; t_{\text{end}}[$, with v_0 denoting the initial datum, $a > 0$, and $\alpha, b, B \geq 0$.

For our purposes, we begin by exemplifying the decomposition followed for the particular function

$$f(r, z, t) = f(t) \chi_{[0; r_f]}(r) \exp[\iota z],$$

where $\iota \in \mathbb{R}$ and $\chi_{[0; r_f]}$ stands for the characteristic function over the interval $[0; r_f]$.

Thanks to the Duhamel principle, we look for a solution which can be of the form

$$v(r, z, t) = \chi_{[0; r_f]}(r) \left(\int_0^t f(s) v_3(r, z, t-s) ds \right) \exp[\iota z] + C + v_1(r, z, t), \tag{10}$$

for some constant C whenever $f \equiv BC$, and v_1 solves (as described in next subsection)

$$\alpha \frac{\partial v_1}{\partial t} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} \right) - b \frac{\partial v_1}{\partial z} - Bv_1; \tag{11}$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial t}(r, -L, t) = \frac{\partial v_1}{\partial z}(r, L, t) = 0, \quad \forall r, t; \tag{12}$$

$$v_1(r, z, 0) = v_0(r, z), \quad \forall r, z, \tag{13}$$

and v_3 solves

$$\alpha \frac{\partial v_3}{\partial t} + b \frac{\partial v_3}{\partial z} + (B + b\iota - a\iota^2)v_3 = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_3}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_3}{\partial z^2} \right); \tag{14}$$

$$v_3(r, z, 0) = 1/\alpha, \quad \forall r, z, \tag{15}$$

such that

$$-a \frac{\partial v}{\partial r}(r_s, z, t) + hv(r_s, z, t) = h\gamma, \quad \forall z, t, \tag{16}$$

for some $\gamma \geq 0$.

We may consider $v_3(t) = \exp[\zeta t]/\alpha$ with $\zeta = (a\iota^2 - b\iota - B)/\alpha$.

Analytical solutions

Using Bernoulli–Fourier technique, the Cauchy–Robin–Neumann problem admits a solution of the form:

$$v_1(r, z, t) = R(r)Z(z)F(t).$$

In order to obtain an analytical solution, let us take the system of ordinary differential equations (ODE)

$$\begin{cases} F'(t) = \zeta F(t) \\ Z''(z) - (b/a)Z'(z) = \eta^2 Z(z) \\ (rR'(r))' = \beta rR(r), \end{cases} \quad (17)$$

with $\alpha\zeta = a(\beta + \eta^2) - B$. The solution of the first ODE is $F(t) = A_0 \exp[\zeta t]$, for some constant A_0 .

The elementary solutions for Z are

$$\exp\left[\left(\frac{b}{2a} \pm \Xi\right)z\right],$$

where $\Xi = (2a)^{-1} \sqrt{b^2 + 4a^2\eta^2}$.

The elementary solutions for R are the Bessel functions of first and second kind and order 0, respectively, $J_0(\sqrt{|\beta|r})$ and $Y_0(\sqrt{|\beta|r})$ if $\beta < 0$; or the modified Bessel functions of first and second kind and order 0, respectively, $I_0(\sqrt{\beta r})$ and $K_0(\sqrt{\beta r})$ if $\beta > 0$ (**Özsisik**, 2012).

We recall their Taylor series expansions around the origin

$$\begin{aligned} J_0(r) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^{2n}} \frac{r^{2n}}{n!\Gamma(n+1)}; \\ Y_0(r) &= \frac{2}{\pi} \left(J_0(r) \ln\left[\frac{r}{2}\right] - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1 + (1/2) + \dots + (1/n) - \gamma}{2^{2n}(n!)^2} r^{2n} \right); \\ I_0(r) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^{2n}} \frac{r^{2n}}{n!\Gamma(n+1)}; \\ K_0(r) &= -I_0(r) \ln\left[\frac{r}{2}\right] + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1 + (1/2) + \dots + (1/n) - \gamma}{2^{2n}(n!)^2} r^{2n}, \end{aligned}$$

where Γ is the gamma function and γ is the Euler–Mascheroni constant. Moreover, the following wronskian relationships

$$J_1(\beta r)Y_0(\beta r) - Y_1(\beta r)J_0(\beta r) = \frac{2}{\pi\beta r}; \quad (18)$$

$$K_1(\beta r)I_0(\beta r) + I_1(\beta r)K_0(\beta r) = \frac{1}{\beta r} \quad (19)$$

hold, for any $\beta > 0$ (see (**Özsisik**, 2012, p. 672) and (**Olver**, 1972, pages 360 and 375)).

Considering $v_0 = 0$ in Ω_{lumen} and taking $\beta = -\beta_{1,j}^2$ according to $j = \text{wall, pad or skin}$, we find

$$v_1(r, z, t) = \begin{cases} 0 & \text{in } \Omega_{\text{lumen}} \\ A(r)Z(z) \exp[\zeta t] & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (20)$$

where

$$A(r) := \begin{cases} A_{1,w}(Y_0(\beta_{1,w}r)J_0(\beta_{1,w}r) - J_0(\beta_{1,w}r)Y_0(\beta_{1,w}r)) & \text{in } \Omega_w \\ A_{1,p}J_0(\beta_{1,p}r) + A_{2,p}Y_0(\beta_{1,p}r) & \text{in } \Omega_p \\ A_{1,s}J_0(\beta_{1,s}r) + A_{2,s}Y_0(\beta_{1,s}r) & \text{in } \Omega_s \end{cases}$$

and the Neumann condition (12) implies that

$$Z(z) = \exp\left[\frac{b}{2a}z\right] \left(b \sinh[\Xi(L-z)] + \sqrt{b^2 + 4a^2\eta^2} \cosh[\Xi(L-z)] \right). \quad (21)$$

The above involved constants may be determined by using the continuity conditions on the fluxes and on the functions themselves.

In particular, by the homogeneous Robin condition (16), we have

$$a\beta_{1,s} (A_{1,s}J_1(\beta_{1,s}r_s) + A_{2,s}Y_1(\beta_{1,s}r_s)) + h (A_{1,s}J_0(\beta_{1,s}r_s) + A_{2,s}Y_0(\beta_{1,s}r_s)) = 0.$$

Notice that if $\gamma > 0$ then we have an additional relation, which can be analysed by adding an additional solution of the form $R(r) = A_1I_0(\sqrt{B/ar}) + A_2K_0(\sqrt{B/ar})$ that obeys

$$-\sqrt{aB} \left(A_1I_1\left(\sqrt{\frac{B}{a}}r_s\right) - A_2K_1\left(\sqrt{\frac{B}{a}}r_s\right) \right) + hR(r_s) = h\gamma.$$

Particular solution

In this section, we rephrase the particular solution, according to Duhamel principle, in (10)

$$\left(\int_0^t f(s)v_4(r,z,t-s)ds \right) R(r) \exp[tz]$$

by taking $f(r,z,t) = f(t)R(r) \exp[tz]$, where $t \in \mathbb{R}$ and R denotes any of the Bessel functions of order 0, namely, $J_0(\sqrt{|\beta|r})$ and $Y_0(\sqrt{|\beta|r})$ if $\beta < 0$; or the modified Bessel functions of order 0, namely, $I_0(\sqrt{\beta}r)$ and $K_0(\sqrt{\beta}r)$ if $\beta > 0$, introduced in above subsection. Analogously, we may consider a solution $v_4(t) = \exp[\zeta t]/\alpha$ with $\zeta = (a(t^2 + \beta) - bt - B)/\alpha$.

Results and discussions

The fluence rate ϕ , defined in blood whenever the source $S \neq 0$ (cf. (2)), can be assumed independent on the radius r as satisfying (9) with $\alpha = 1/v$, $b = 0$, $a = D$, $B = \mu_a$ and $f = S$, with $\iota = -\mu_t$. Thus, we may choose the particular functions $v_2 = 0$ and $v_3(t) = v \exp[\zeta t]$, with

$$\zeta := v(D\mu_t^2 - \mu_a) > 0$$

according to Table 2.

Table 2. Optical parameters (Marqa *et al.*, 2013; Van Ruijven *et al.*, 2014) (at slow shear rate (Roggan *et al.*, 1999)).

λ [nm]	μ_a [mm ⁻¹]				μ'_s [mm ⁻¹]			
	blood	vein wall	tissue pad	skin	blood	vein wall	tissue pad	skin
810	0.21	0.2	0.017	0.2	0.73	2.4	1.2	0.9
980	0.21	0.1	0.03	0.10	0.6	2.0	1.0	0.81
1064	0.12	0.12	0.034	0.10	0.58	1.95	0.98	0.77

Then, we have

$$\phi_v(r,z,t) = \frac{vS(r_f,z,0)}{\zeta + \mu_tv} \exp[\zeta t] (1 - \exp[-(\zeta + \mu_tv)t]),$$

for $0 \leq r < r_f$, $-L < z < L$ and $0 \leq t < t_{end}$. Typically, a laser fibre for medical applications has a 600-micron diameter ($r_f = 0.3$ mm).

Next, by the interface continuity conditions, ϕ_v can be extended as a solution at the position (r, z) and the time t . If $r_f < r \leq r_i$ ($j = \text{blood}$)

$$\phi_v(r, z, t) = \frac{vS(r_f, z, 0)}{\zeta + \mu_t v} \exp[\zeta t] + \left(B_1 J_0(\beta_j r) + B_2 Y_0(\beta_j r) \right) \exp[-\mu_t(z + vt)];$$

and otherwise

$$\begin{aligned} \phi_v(r, z, t) = & (B_3 I_0(\varkappa_j r) + B_4 K_0(\varkappa_j r)) \exp[-\mu_t z + \zeta t] \\ & + (B_5 J_0(\beta_j r) + B_6 Y_0(\beta_j r)) \exp[-\mu_t(z + vt)], \end{aligned}$$

where the abstract constants B_1, \dots, B_6 are defined by the boundary and interface continuity conditions. The parameters, \varkappa_j and β_j , are determined due to that the PDE (1) is verified by the function ϕ , namely

$$\begin{aligned} \zeta / v_j + \mu_a^{(j)} &= D_j \left(\mu_t^2 + \varkappa_j^2 \right) \quad j = \text{wall, pad, skin;} \\ -\frac{\mu_t v}{v_j} + \mu_a^{(j)} &= D_j \left(\mu_t^2 - \beta_j^2 \right) \quad j = \text{blood, wall, pad, skin.} \end{aligned}$$

That is,

$$\begin{aligned} \varkappa_j &= \sqrt{\frac{n_{\text{tissue}} D \mu_t^2 - \mu_a}{n_{\text{blood}} D_j} + (\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2 - \mu_t^2} > 0; \\ \beta_j &= \sqrt{\mu_t^2 - (\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2 + \frac{\mu_t v}{v_j D_j}} > 0. \end{aligned}$$

Here, we may consider $n = 1.4$ for both the blood and the tissues.

This solution proves that the problem is ill-posed. Although it gives a good answer at the scale of picoseconds ($c = 0.3$ mm ps⁻¹), it is inadequate for describing the behaviour of the fluence rate whenever the fibre moves. The unsteady ϕ should solve (1) at the steady state, being such that ϕ attains its maximum at $z = -vt$. Then, we have

if $0 \leq r < r_f$:

$$\phi(r, z, t) = B_0 \exp[-\mu_{\text{eff}}(z + vt)] - \frac{S(r_f, 0, 0)}{D \mu_t^2 - \mu_a} \exp[-\mu_t(z + vt)]; \quad (22)$$

if $r_f < r \leq r_i$:

$$\phi(r, z, t) = B_0 \exp[-\mu_{\text{eff}}(z + vt)] + \left(B_1 J_0(\beta_b r) + B_2 Y_0(\beta_b r) \right) \exp[-\mu_t(z + vt)]; \quad (23)$$

otherwise:

$$\begin{aligned} \phi(r, z, t) = & (B_3 W_3(\varkappa_{\lambda, j} r) + B_4 W_4(\varkappa_{\lambda, j} r)) \exp[-\mu_{\text{eff}}(z + vt)] \\ & + (B_5 J_0(\beta_j r) + B_6 Y_0(\beta_j r)) \exp[-\mu_t(z + vt)], \end{aligned} \quad (24)$$

where the abstract constants B_0, B_1, \dots, B_6 are defined by the initial, boundary and interface continuity conditions. We consider the modified Bessel functions $W_3 = I_0$ and $W_4 = K_0$ if $\lambda = 810; 1064$ and $j = \text{wall, skin}$, or $\lambda = 980$ and $j = \text{wall}$; and the Bessel functions $W_3 = J_0$ and $W_4 = Y_0$ otherwise, in accordance to the factors of the r -argument

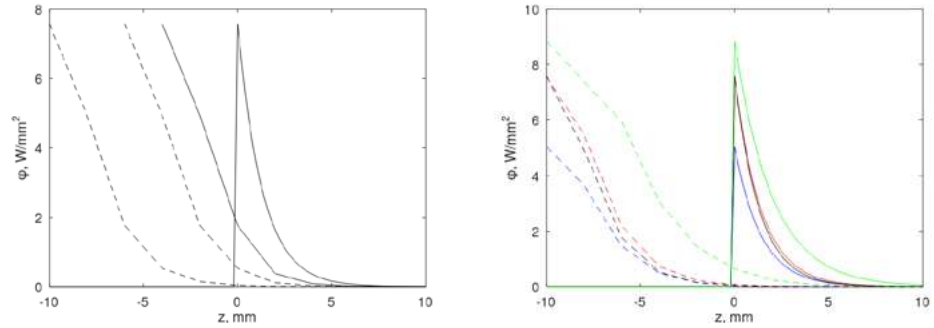


Figure 2. (a) Graphical representations of ϕ , at the wavelength of 810 nm, for different instants of time. (b) Graphical representations of ϕ for the wattage set at 15 W: with wavelengths of 810 nm (in black) and 980 nm (in red) and at 10 W: with wavelengths of 980 nm (in blue) and 1064 nm (in green). Solid lines stand for the initial instant of time, while dashed lines stand for the final instant of time.

if $\lambda = 810; 1064$:

$$\alpha_{\lambda,j} = \begin{cases} \sqrt{(\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2 - \mu_{\text{eff}}^2} > 0 & j = \text{wall, skin;} \\ \sqrt{\mu_{\text{eff}}^2 - (\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2} > 0 & j = \text{pad,} \end{cases} \quad (25)$$

if $\lambda = 980$:

$$\alpha_{\lambda,j} = \begin{cases} \sqrt{(\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2 - \mu_{\text{eff}}^2} > 0 & j = \text{wall;} \\ \sqrt{\mu_{\text{eff}}^2 - (\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2} > 0 & j = \text{pad, skin,} \end{cases} \quad (26)$$

and for $j = \text{blood, wall, pad, skin}$:

$$\beta_j = \sqrt{\mu_t^2 - (\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2} > 0. \quad (27)$$

Parameters, used in clinical procedures, are known: the power is set at 15 W (with wavelengths of 810 nm and 980 nm) and at 10 W (with wavelengths of 980 nm and 1064 nm). Calculations use Octave software, under the optical parameters in Table 2. Figure 2 (a) shows the ϕ -profile to the power of 15 W and the wavelength of 810 nm at different instants of time, considering the continuous movement of the fibre tip. The slope decreases from the initial instant of time (solid line) $z = t = 0$ until the final instant of time (dashed line) $z = -10, t = 10$, which reflects the accumulation of the fluence rate. Figure 2 also illustrates the higher distributions only under the tip, as it is experimentally consistent.

As expected, Figure 2 (b) shows similar profiles between different wavelengths and set powers. At the wavelength of 980 nm, the 15 W-curves (in red) has higher values than the 10 W-curves (in blue). At the power 15 W, the 810 nm-curves (in black) and the 980 nm-curves (in red) match each other, while at the power 10 W, the slope of 980 nm-curves (in blue) is similar than the slope of 1064 nm-curves (in green), but there is no match.

This evaluation improves the study of the absorbed volumetric power q , and consequently it will improve the study of the distribution of the temperature and make the simulation of the heat transfer closer to reality. Our results are consistent to that the use of laser energies of various wavelengths has no significant difference in their effectiveness and complication rate (Memetoglu, Erbasan, & Özel, 2012).

Hereafter, we assume the solution ϕ as defined by (22)-(27). According to (10), let $T - T_b$ be the thermal solution of (9) with $\alpha = \rho c_p$, $a = k$, $f = q$, and

- in the domain Ω_{lumen} : $b = \rho_b c_b u$ and $B = 0$;
- in the domain $\Omega_w \cup \Omega_p \cup \Omega_s$: $b = 0$ and $B = c_b \omega$.

Firstly, at the position $(r, z) \in [0; r_f[\times] - L; L[$ and the time $t > 0$, we split into

- (i) $f(t) = \mu_a \frac{S(r_f, 0, 0)}{D\mu_t^2 - \mu_a} \exp[-\mu_{\text{eff}}vt]$ and $\iota = -\mu_{\text{eff}}$;
- (ii) $f(t) = -\mu_a \frac{S(r_f, 0, 0)}{D\mu_t^2 - \mu_a} \exp[-\mu_t vt]$ and $\iota = -\mu_t$.

Analogously in the determination of ϕ_v we use $v_3(t) = \exp[\zeta t]/(\rho_b c_b)$ solving (14)-(15) with the factors of the t -argument

- (i) $\zeta_1 = k\mu_{\text{eff}}^2/(\rho_b c_b) + u\mu_{\text{eff}}$.
- (ii) $\zeta_2 = k\mu_t^2/(\rho_b c_b) + u\mu_t$.

Secondly, for $r_f < r < r_i$, we use $v_4(t) = \exp[\zeta_3 t]/(\rho_b c_b)$ from subsection particular solution with $\zeta_3 = k\mu_{\text{eff}}^2/(\rho_b c_b) + u\mu_t$ by taking β_b that is given in (27) into account. Next, we similarly argue for the domain $\Omega_w \cup \Omega_p \cup \Omega_s$, concluding

if $0 \leq r \leq r_f$:

$$T(r, z, t) = T_b + \mu_a B_0 \exp[-\mu_{\text{eff}}z] \frac{\exp[\zeta_1 t] - \exp[-\mu_{\text{eff}}vt]}{k\mu_{\text{eff}}^2 + \rho_b c_b \mu_{\text{eff}}(u + v)} - \frac{\mu_a S(r_f, 0, 0)}{D\mu_t^2 - \mu_a} \exp[-\mu_t z] \frac{\exp[\zeta_2 t] - \exp[-\mu_t vt]}{k\mu_t^2 + \rho_b c_b \mu_t(u + v)}; \quad (28)$$

if $r_f < r \leq r_i$:

$$T(r, z, t) = T_b + T_1(r, z, t) + \mu_a B_0 \exp[-\mu_{\text{eff}}z] \frac{\exp[\zeta_1 t] - \exp[-\mu_{\text{eff}}vt]}{k\mu_{\text{eff}}^2 + \rho_b c_b \mu_{\text{eff}}(u + v)} + \left(B_1 J_0(\beta_b r) + B_2 Y_0(\beta_b r) \right) \exp[-\mu_t z] \frac{\exp[\zeta_3 t] - \exp[-\mu_t vt]}{k\mu_{\text{eff}}^2 + \rho_b c_b \mu_t(u + v)}; \quad (29)$$

otherwise:

$$T(r, z, t) = T_o + T_1(r, z, t) + (B_3 W_3(\alpha_{\lambda, jr}) + B_4 W_4(\alpha_{\lambda, jr})) \exp[-\mu_{\text{eff}}z] \frac{\exp[\zeta_4 t] - \exp[-\mu_{\text{eff}}vt]}{k(\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2 - c_b \omega} + (B_5 J_0(\beta_j r) + B_6 Y_0(\beta_j r)) \exp[-\mu_t z] \frac{\exp[\zeta_4 t] - \exp[-\mu_t vt]}{k(\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2 - c_b \omega}; \quad (30)$$

where $\zeta_4 = (k(\mu_{\text{eff}}^{(j)})^2 - \rho_b c_b w)/(\rho c_p)$. Here, T_1 is the combination of radial dependent Bessel functions and longitudinal and temporal dependent exponential functions such that (11)-(13) as well as the interface continuity conditions are verified.

As the lumen Ω_{lumen} is constituted by the blood, two different situations exist:

Case 1. The blood flow is obstructed ($u = 0$), for instance the vein is completely clamped or the SSV in the presence of the inserted catheter.

Case 2. The blood flows at $u = 70 \text{ mm s}^{-1}$, as such it happens in the GSV. The diameter of the GSV varies from 11 mm to 12 mm at SFJ until 7.5 mm to 8 mm at the proximal thigh (at the knee level) (Degen et al., 2010).

In the case 1, T_1 is given by (20) with $Z(z) = \cosh[\eta(L - z)]$ and

$$\rho_j c_{p,j} \zeta = -k_j (\beta_{1,j}^2 + \eta^2) - c_{p,j} \omega_j \quad j = \text{wall, pad, skin.}$$

In the case 2, the solution T_1 depends on the general form (21) of Z , and (20) takes the dependence on the vein size into account. Known values exist for diameters ranging between 3 and 10 mm, or greater than 10 mm, according to the small saphenous vein (SSV), anterior accessory vein, and great saphenous vein, namely, diameters of 7.5 mm (Goode *et al.*, 2010), $r_i = 3.75$ mm and $\varepsilon = 0.75$ mm, and of 1.2 cm (Goldman, Mauricio, & Rao, 2004), $r_i = 6$ mm and $\varepsilon = 1.2$ mm. The proposed solution may address the quantitative questions in the context of the thermal ablation treatment under study. For elucidating the effect of vein diameter, further study will be the aim of future work.

Finally, we may use the formula (28)-(30) to read the temporal course of damage events from the spatial domain. However, a first analysis should be done. Considering in (7) that $T \geq T_{\min}$, we find the following upper bound

$$t_{\text{crit}} \leq \frac{1}{A} \exp \left[\frac{E_a}{RT_{\min}} \right].$$

Next, if we use the thermal parameters from Table 3, the above upper bound of the critical time t_{crit} can be calculated (cf. Table 3) in function of different the minimum surface temperatures.

Table 3. Upper bounds of t_{crit} in seconds.

°C	blood	vein wall	perivenous tissue	skin
50	3.4e+05	5.8e+05	5.8e+05	1.1e+03
60	2.3e+03	4.7e+03	4.7e+03	9.5e-01
70	2.1e+01	5.1e+01	5.1e+01	1.3e-03
80	2.4e-01	7.2e-01	7.2e-01	2.5e-06
90	3.6e-03	1.3e-02	1.3e-02	6.9e-09
100	6.8e-05	2.8e-04	2.8e-04	2.6e-11

Then, the operating time of 10 s is a safe value for the thermal thresholds for tissue damage at the vein wall, perivenous tissue or skin, the so-called damage temperature ($T_{\min} = 50^\circ\text{C}$). This value is consensual among clinicians and researchers in the ablation treatments, (Consiglieri, dos Santos, & Haemmerich, 2003) and the references therein. We conclude that the interpretation of the vein-tissue system damage substantially disagrees with the critical temperature of 50°C being the temperature that temperatures above it result in necrosis.

The present result shows that the blood coagulates before the dehydration/necrosis of the wall tissue. Moreover, for the blood threshold $T_{\min} = 100^\circ\text{C}$, the operating time clearly surpasses the upper bound, which is consistent with that a thin layer of carbonized blood is found to cover the fibre tip. Although according to (Van Ruijven *et al.*, 2014), the black layer occurs at temperatures around 300°C . This black layer absorbs an average of 45% of the emitted light power, resulting in a decrease of the tip temperatures.

Indeed, much work remains to be done. The damage of the vein reduces to the vaporisation and occlusion in both above situations, namely cases 1 and 2. The failure and complication rates depend on vein size (Bi *et al.*, 2023; Chaar *et al.*, 2011). The influence of the pulsatile blood flow in the heat transfer is a real physiological issue in the vessels system (Zhang & Xie, 2018). Also, the perivenous tumescence injection (tumescence anesthesia) is carried on to protect the perivenous tissue from thermal damage and reduce the lumen of the truncal vein by compression and spasm (Schmedt *et al.*, 2010).

Conclusions

The derived solutions, namely ϕ and T , might be a tool to generate quantitative and/or qualitative results. Besides, the configurations of the physical problem solved are questioned. Our main conclusion is that the parabolic equation for the light transport leads to the application of the pulsed laser of the order of picoseconds only, while the elliptic equation leads to the physical solution for a continuous laser light.

Acknowledgment

Deeply thanks to Professor Luís Filipe V. Ferreira by awakening my interest on the light propagation field. Grateful thanks to the anonymous referee for the valuable comments.

Dedicated to my colleague and friend Fernanda Veiga de Oliveira.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interest.

References

- Almeida, J., Mackay, E., Javier, J., Mauriello, J., Raines, J.** (2009) Saphenous laser ablation at 1470 nm targets the vein wall, not blood. *Vascular and Endovascular Surgery*, 43(5), 467–472. <https://doi.org/10.1177/1538574409335916>
- Anchala, P., Wickman, C., Chen, R., Faundeen, T., Pearce, W., Narducy, L., Resnick, S.** (2010) Endovenous laser ablation as a treatment for postsurgical recurrent saphenous insufficiency. *Cardiovascular and Interventional Radiology*, 33(5), 983–988. <https://doi.org/10.1007/s00270-009-9784-3>
- Ash, J. L., Moore, C. J.** (2010) Laser treatment of varicose veins: Order out of chaos. *Seminars in Vascular Surgery*, 23(2), 101–106. <https://doi.org/10.1053/j.semvascsurg.2010.01.005>
- Bi, S., Liu, H., Nan, Q., Mai, X.** (2023) Study on the effect of micro-vessels on ablation effect in laser interstitial brain tissue thermal therapy based on PID temperature control. *Applied Sciences*, 13(6), 3751. <https://doi.org/10.3390/app13063751>
- Bianchi, L., Cavarzan, F., Ciampitti, L., Cremonesi, M., Grilli, F., Saccomandi, P.** (2022) Thermophysical and mechanical properties of biological tissues as a function of temperature: A systematic literature review. *International Journal of Hyperthermia*, 39(1), 297–340. <https://doi.org/10.1080/02656736.2022.2028908>
- Caggiati, A., Franceschini, M.** (2010) Stroke following endovenous laser treatment of varicose veins. *Journal of Vascular Surgery*, 51(1), 218–220. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2009.07.092>
- Carradice, D., Mekako, A. I., Mazari, F. A. K., Samuel, N., Hatfield, J., Chetter, I. C.** (2011) Clinical and technical outcomes from a randomized clinical trial of endovenous laser ablation compared with conventional surgery for great saphenous varicose veins. *British Journal of Surgery*, 98(8), 1117–1123. <https://doi.org/10.1002/bjs.7615>
- Chaar, C. I. O., Hirsch, S. A., Cwenar, M. T., Rhee, R. Y., Chaer, R. A., Hamad, G. A., Dillavou, E. D.** (2011) Expanding the role of endovenous laser therapy: Results in large diameter saphenous, small saphenous, and anterior accessory veins. *Annals of Vascular Surgery*, 25(5), 656–661. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2011.02.031>
- Chebotaev, A. Y., Pak, N. M., Kovtanyuk, A. E.** (2023) Analysis and numerical simulation of the initial-boundary value problem for quasilinear equations of complex

- heat transfer. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 17, 698–709. <https://doi.org/10.1134/S1990478923040026>
- Consiglieri, L.** (2016) Analytical solutions in the modeling of the local RF ablation. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 16(05), 1650071. <https://doi.org/10.1142/S0219519416500718>
- Consiglieri, L.** (2012) Continuum models for the cooling effect of blood flow on thermal ablation techniques. *International Journal of Thermophysics*, 33(5), 864–884. <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1194-0>
- Consiglieri, L.** (2013) An analytical solution for a bio-heat transfer problem. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 5(5), 267–278. <https://doi.org/10.14257/ijbsbt.2013.5.5.26>
- Consiglieri, L., dos Santos, I., Haemmerich, D.** (2003) Theoretical analysis of the heat convection coefficient in large vessels and the significance for thermal ablative therapies. *Physics in Medicine and Biology*, 48(24), 4125–4134. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/24/010>
- Doganci, S., Demirkilic, U.** (2010) Comparison of 980 nm laser and bare-tip fibre with 1470 nm laser and radial fibre in the treatment of great saphenous vein varicosities: A prospective randomised clinical trial. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 40(2), 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2010.04.006>
- Etlík, Ö., Korkmaz, A. A., Üçkurt, Y., Indelen, S., Gündoğdu, R., Öztürk, A., al-Salehi, S. K., Aung, S. M.** (2013) Endovenous laser ablation for saphenous vein insufficiency: Long-term results. *Turkish Journal of Medical Sciences*, 43(3), 470–473. <https://doi.org/10.3906/sag-1206-68>
- Firouznia, K., Ghanaati, H., Hedayati, M., Shakiba, M., Jalali, A. H., Mirsharifi, R., Dargahi, A.** (2013) Endovenous laser treatment (EVLT) for the saphenous reflux and varicose veins: A follow-up study. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, 57(1), 15–20. <https://doi.org/10.1111/j.1754-9485.2012.02457.x>
- Gale, S. S., Lee, J. N., Walsh, M. E., Wojnarowski, D. L., Comerota, A. J.** (2010) A randomized, controlled trial of endovenous thermal ablation using the 810-nm wavelength laser and the ClosurePLUS radiofrequency ablation methods for superficial venous insufficiency of the great saphenous vein. *Journal of Vascular Surgery*, 52(3), 645–650. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2010.04.030>
- Goldman, M., Mauricio, M., Rao, J.** (2004) Intravascular 1320-nm laser closure of the Great Saphenous Vein: A 6- to 12-month follow-up study. *Dermatologic Surgery*, 30(11), 1380–1385. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15522018>
- González-Suárez, A., Trujillo, M., Burdío, F., Andaluz, A., Berjano, E.** (2014) Could the heat sink effect of blood flow inside large vessels protect the vessel wall from thermal damage during RF-assisted surgical resection? *Medical Physics*, 41(8), 083301. <https://doi.org/10.1118/1.4890103>
- Goode, S., Chowdhury, A., Crockett, M., Beech, A., Simpson, R., Richards, T., Braithwaite, B.** (2010) Laser and radiofrequency ablation study (LARA study): A randomised study comparing Radiofrequency Ablation and Endovenous Laser Ablation (810nm). *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 40(2), 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2010.02.026>
- Hornig, T.-L., Lin, W.-L., Liauh, C.-T., Shih, T.-C.** (2007) Effects of pulsatile blood flow in large vessels on thermal dose distribution during thermal therapy. *Medical Physics*, 34(4), 1312–1320. <https://doi.org/10.1118/1.2712415>
- Katta, N., Santos, D., McElroy, A. B., Estrada, A. D., Das, G., Mohsin, M., Donovan, M., Milner, T. E.** (2022) Laser coagulation and hemostasis of large diameter blood vessels: Effect of shear stress and flow velocity. *Scientific Reports*, 12, 8375. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12128-1>

- Kotte, A. N. T. J., van Leeuwen, G. M. J., Legendijk, J. J. W.** (1999) Modelling the thermal impact of a discrete vessel tree. *Physics in Medicine & Biology*, 44(1), 57–74. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/44/1/006>
- Marqa, M., Mordon, S., Hernandez-Osma, E., Trelles, M., Betrouni, N.** (2013) Numerical simulation of endovenous laser treatment of the incompetent great saphenous vein with external air cooling. *Lasers in Medical Science*, 28(3), 833–844. <https://doi.org/10.1007/s10103-012-1141-0>
- Memetoglu, M. E., Erbasan, O., Özel, D.** (2012) Follow-up results of laser saphenous ablation. *Dicle Tip Dergisi*, 39(3), 331–335. <https://doi.org/10.5798/diclemedj.0921.2012.03.0153>
- Min, R. J., Khilnani, N. M., Zimmet, S. E.** (2003) Endovenous laser treatment of saphenous vein reflux: Long-term results. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 14(8), 991–996. <https://doi.org/10.1097/01.RVI.0000082864.05622.E4>
- Mordon, S., Wassmer, B., Zemmouri, J.** (2006) Mathematical modeling of endovenous laser treatment (ELT). *BioMedical Engineering OnLine*, 5, 26. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-5-26>
- Oh, C. K., Jung, D.-S., Jang, H. S., Kwon, K. S.** (2003) Endovenous laser surgery of the incompetent Greater Saphenous Vein with a 980-nm diode laser. *Dermatologic Surgery*, 29(11), 1135–1140. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14641341>
- Olver, F.** (1972) Bessel functions of integer order. In M. Abramowitz I. Stegun (Eds.), *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables* (pp. 355–389).
- Özisik, M.** (2012) Appendix IV: Bessel Functions. In *Heat conduction* (pp. 691–706). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118411285.app4>
- Özkan, U., Saritürk, C.** (2012) Early clinical improvement in chronic venous insufficiency symptoms after laser ablation of saphenous veins. *Diagnostic and Interventional Radiology*, 18(6), 594–598. <https://doi.org/10.4261/1305-3825.DIR.5917-12.1>
- Palombi, L., Morelli, M., Bruzzese, D., Martinelli, F., Quarto, G., Bianchi, P. G.** (2024) Endovenous laser ablation (EVLA) for vein insufficiency: two-year results of a multicenter experience with 1940-nm laser diode and a novel optical fiber. *Lasers in Medical Science*, 39, 61. <https://doi.org/10.1007/s10103-024-04000-7>
- Poluektova, A., Malskat, W., Gemert, M. V., Vuylsteke, M., Bruijninx, C., Neumann, H., van der Geld, C.** (2014) Some controversies in endovenous laser ablation of varicose veins addressed by optical-thermal mathematical modeling. *Lasers in Medical Science*, 29, 441–452. <https://doi.org/10.1007/s10103-013-1450-y>
- Prahl, S. A.** (1995) The diffusion approximation in three dimensions. In A. J. Welch M. J. C. Van Gemert (Eds.), *Optical-thermal response of laser-irradiated tissue* (pp. 207–231). Springer US.
- Prince, E., Soares, G., Silva, M., Taner, A., Ahn, S., Dubel, G., Jay, B.** (2011) Impact of laser fiber design on outcome of endovenous ablation of lower-extremity varicose veins: Results from a single practice. *Cardiovascular and Interventional Radiology*, 34(3), 536–541. <https://doi.org/10.1007/s00270-010-9922-y>
- Proebstle, T., Krummenauer, F., Gul, D., Knp, J.** (2004) Nonocclusion and early reopening of the great saphenous vein after endovenous laser treatment is fluence dependent. *Dermatologic Surgery*, 30, 174–178. <https://doi.org/10.1067/mva.2002.121132>
- Puggioni, A., Kalra, M., Carmo, M., Mozes, G., Gloviczki, P.** (2005) Endovenous laser therapy and radiofrequency ablation of the great saphenous vein: Analysis of early efficacy and complications. *Journal of Vascular Surgery*, 42(3), 488–493. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2005.05.014>
- Rasmussen, L. H., Lawaetz, M., Bjoern, L., Vennits, B., Blemings, A., Eklof, B.** (2011) Randomized clinical trial comparing endovenous laser ablation, radiofrequency ablation, foam sclerotherapy and surgical stripping for great saphenous varicose

- veins. *British Journal of Surgery*, 98(8), 1079–1087. <https://doi.org/10.1002/bjs.7555>
- Rathod, J., Taori, K., Joshi, M., Mundhada, R., Rewatkar, A., Dhokane, S., Gour, P.** (2010) Outcomes using a 1470-nm laser for symptomatic varicose veins. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 21(12), 1835–1840. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2010.09.009>
- Roggan, A., Friebel, M., Doerschel, K., Hahn, A., Mueller, G. J.** (1999) Optical properties of circulating human blood in the wavelength range 400–2500 nm. *Journal of Biomedical Optics*, 4(1), 36–46. <https://doi.org/10.1117/1.429919>
- Schmedt, C.-G., Blagova, R., Karimi-Poor, N., Burgmeier, C., Steckmeier, S., Beck, T., Hecht, V., Meier, R., Sadeghi-Azandaryani, M., Steckmeier, B., Sroka, R.** (2010) Update of endovenous laser therapy and the latest application studies. *Medical Laser Application*, 25(1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.mla.2009.11.004>
- Schwarz, T., von Hodenberg, E., Furtwängler, C., Rastan, A., Zeller, T., Neumann, F.-J.** (2010) Endovenous laser ablation of varicose veins with the 1470-nm diode laser. *Journal of Vascular Surgery*, 51(6), 1474–1478. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2010.01.027>
- Sharif, M. A., Soong, C. V., Lau, L. L., Corvan, R., Lee, B., Hannon, R. J.** (2006) Endovenous laser treatment for long saphenous vein incompetence. *British Journal of Surgery*, 93(7), 831–835. <https://doi.org/10.1002/bjs.5351>
- Star, W. M.** (1995) Diffusion theory of light transport. In A. J. Welch M. J. van Gemert (Eds.), *Optical-thermal response of laser-irradiated tissue* (pp. 131–206). Springer US.
- Theivacumar, N., Gough, M.** (2011) Endovenous Laser Ablation (EVLA) to Treat Recurrent Varicose Veins. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 41(5), 691–696. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2011.01.018>
- Tseng, Y.-H., Chen, C.-W., Wong, M.-Y., Yang, T.-Y., Lin, Y.-H., Lin, B.-S., Huang, Y.-K.** (2022) Blood flow analysis of the great saphenous vein in the su-pine position in clinical manifestations of varicose veins of different severities: Application of phase-contrast magnetic resonance imaging data. *Diagnostics*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/diagnostics12010118>
- Van Ruijven, P., Poluektova, A., Van Gemert, M., Neumann, H., Nijsten, T., Van der Geld, C.** (2014) Optical-thermal mathematical model for Endovenous Laser Ablation of varicose veins. *Lasers in Medical Science*, 29, 431–439. <https://doi.org/10.1007/s10103-013-1451-x>
- Vuylsteke, M., Martinelli, T., Van Dorpe, J., Roelens, J., Mordon, S., Fourneau, I.** (2011) Endovenous Laser Ablation: The role of intraluminal blood. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 42(1), 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2011.03.017>
- Zhang, Y., Xie, H.** (2018) The effect of a bifurcation structure on the heat transfer and temperature distribution of pulsatile blood flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118, 663–670. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.055>

Artículo original

Respuesta dinámica de la magnetización de una nanopartícula de magnetita a un campo magnético alterno

Dynamic response of the magnetization of a magnetite nanoparticle to an alternating magnetic field

✉ Nathaly Roa*, ✉ Johans Restrepo

Grupo de Simulación y Magnetismo G+, Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Colombia

Resumen

Realizamos un estudio micromagnético del comportamiento dinámico de la magnetización de una nanopartícula de magnetita ante un campo magnético externo oscilante para contribuir al conocimiento de las condiciones bajo las cuales la magnetización de una partícula magnética es capaz de seguir un campo magnético a una determinada frecuencia y amplitud y, por tanto, diferenciar estados dinámicamente ordenados y desordenados, lo que a su vez permite definir las condiciones para el establecimiento de la histéresis magnética, relevante en el campo de la hipertermia magnética de nanopartículas en la que las pérdidas por histéresis tienen un papel fundamental en la liberación de calor. La metodología se basó en la solución de la ecuación diferencial de Landau-Lifshitz-Gilbert, conjuntamente con un operador hamiltoniano que contenía los términos de canje, la anisotropía magnetocristalina, el efecto Zeeman y la energía desmagnetizante. Los resultados revelaron que existen microestados particulares en el paisaje angular de la energía, así como sus contribuciones en una región estrecha de ángulos formada por el vector de magnetización y la dirección principal del campo externo, que se caracterizan por un alto grado de frustración magnética de naturaleza caótica.

Palabras clave: nanopartículas magnéticas; hipertermia; campo magnético alterno; transición de fase dinámica.

Abstract

We conducted a micromagnetic study of the dynamic behavior of the magnetization of a magnetite nanoparticle before an oscillating external magnetic field to contribute to the knowledge of the conditions under which the magnetization of a magnetic particle is capable of following a magnetic field at a certain frequency and amplitude and, thus, differentiate dynamically ordered and disordered states. This in turn allows defining the conditions for the establishment of magnetic hysteresis, relevant in the field of magnetic hyperthermia of nanoparticles, where hysteresis losses play a fundamental role in heat release. The methodology was based on the solution of the Landau-Lifshitz-Gilbert differential equation together with a Hamiltonian containing exchange terms, magnetocrystalline anisotropy, the Zeeman effect, and demagnetizing energy. Our results revealed that there are particular microstates in the angular energy landscape and their contributions in a narrow region of angles that the magnetization vector forms with the main direction of the external field, characterized by a high degree of magnetic frustration of a chaotic nature.

Keywords: Magnetic nanoparticles; hyperthermia; alternating magnetic field; dynamic phase transition.

Citación: Roa N, Restrepo J. Respuesta dinámica de la magnetización de una nanopartícula de magnetita a un campo magnético alterno. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):271-280, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2602>

Editor: Rafael González Hernández

***Correspondencia:**

Nathaly Roa; nathaly.roa@usco.edu.co

Recibido: 14 de marzo de 2024

Aceptado: 26 de mayo de 2024

Publicado en línea: 11 de junio de 2024



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

Introducción

El nanomagnetismo es un área actual de investigación en la física del estado sólido y de gran interés por las nuevas propiedades y aplicaciones que involucran las nanoestructuras magnéticas con dimensiones generalmente inferiores a 100 nm (1 nanómetro = $1 \times 10^{-9}m$) (Guimarães & Guimaraes, 2009). Las aplicaciones van desde la geología (Mandea & Korte, 2010), con registros magnéticos de minerales, hasta la medicina para tratamiento del cáncer a través de la hipertermia magnética (Lozano-Ocaña, Tubón-Usca, Vaca-Altamirano, & Tubón-Usca, 2022). En esta última se busca aumentar la temperatura de un medio mediante la excitación de nanopartículas magnéticas en respuesta a un campo magnético oscilante (Kronmüller, 2007). El calentamiento de materiales ferromagnéticos que exhiben histéresis mediante un campo magnético alterno es un efecto magnetotérmico llamado calentamiento por histéresis y se utiliza en los tratamientos de hipertermia magnética. La histéresis se debe a las interacciones presentes en el sistema, y en general involucra diferentes contribuciones tales como la dependencia angular de la interacción espín-órbita, que en los ferromagnetos se asocia con la anisotropía magnetocristalina, a las interacciones de corto (intercambio) y largo alcance (dipolares) entre otras, y que dan como resultado mínimos locales en la energía (Coey, 2010).

En la actualidad, se han realizado muchos estudios sobre hipertermia magnética utilizando diferentes MNP funcionalizadas en modelos animales de cáncer (Rabias et al., 2010; Ling et al., 2017). El rango típico de las nanopartículas para hipertermia que utilizan magnetita es de alrededor de 10-50 nm (Salimi, Sarkar, Hashemi, & Saber, 2020). Las nanopartículas de magnetita presentan dos transiciones importantes entre el tamaño y las propiedades magnéticas las cuales son el tamaño superparamagnético y el tamaño de dominio único, que generalmente existen en nanopartículas con diámetros de $\sim 25nm$ y $\sim 80nm$ (Nguyen, Tran, Xu, & Lee, 2021), respectivamente. El tamaño de nuestra muestra magnética se encuentra en el rango donde las nanopartículas de magnetita exhiben tanto un tamaño de dominio único como un comportamiento ferrimagnético, justo por encima del límite superparamagnético.

De otra parte, la respuesta dinámica de la magnetización ($M(t)$) de un material magnético a la presencia de un campo magnético alterno ($H(t)$), puede dar lugar a la ocurrencia de dos estados o fases posibles (Park & Pleimling, 2013; Roa & Restrepo, 2023): (i) una fase dinámicamente ordenada o (ii) una fase dinámicamente desordenada (ver Figura 1). El tipo de respuesta depende de características de $H(t)$, tales como la amplitud (H_0) y el período (P). En la fase dinámicamente ordenada la magnetización no logra seguir al campo magnético mientras este oscila, como se muestra en la Figura 1 izquierda, y se mantiene en un valor alto de la magnetización promedio. En la fase dinámicamente desordenada, por el contrario, la magnetización sigue al campo magnético, y puede existir un retraso o desfase respecto al campo como se observa en área circular gris de la Figura 1 derecha. Otros autores, mediante simulación Monte Carlo (Korniss, White, Rikvold, & Novotny, 2000), han estudiado el modelo bidimensional de Ising para un ferroimán por debajo de su temperatura de Curie, y sujeto a un campo periódico aplicado de onda cuadrada. Encontraron que el sistema magnético experimenta una transición de fase dinámica continua cuando el semiperíodo del campo, es comparable con el tiempo de vida metaestable (tiempo que le toma a la magnetización de pasar de su valor de saturación hasta un valor cero). La caracterización de tales transiciones de fase dinámicas y la poca literatura al respecto hasta donde sabemos, reafirma la necesidad de ahondar en los mecanismos de inversión de la magnetización en sistemas sujetos a la acción de campos magnéticos oscilantes en el tiempo.

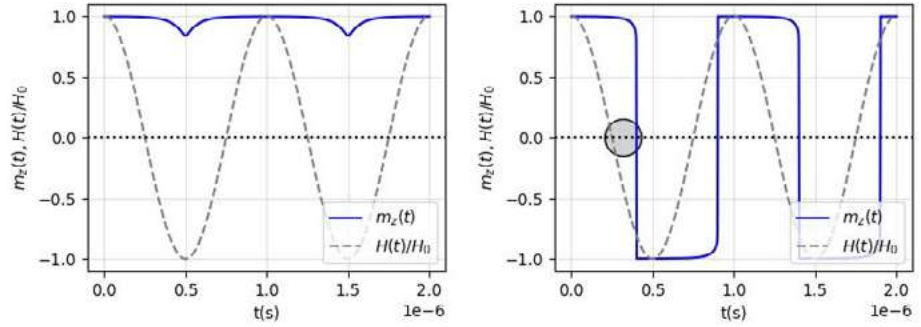


Figura 1. Curva de magnetización (línea continua) de la fase dinámicamente ordenada para una nanopartícula (NP) magnética de magnetita en presencia de un campo magnético alterno (línea discontinua) con periodo $P = 1 \mu s$ y amplitud (izquierda) $H_0 = 80 \text{ mT}$ y (derecha) $H_0 = 200 \text{ mT}$. En la figura derecha el área circular gris muestra el retraso de la magnetización respecto al campo aplicado.

Modelo teórico

El comportamiento dinámico de la magnetización de un sistema magnético a temperatura cero puede ser estudiado a través de la ecuación de Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG) (Coey, 2010) dada por:

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\frac{\gamma}{1 + \alpha^2} (\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) - \frac{\gamma\alpha}{1 + \alpha^2} \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \quad (1)$$

donde $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_s$ es el campo de magnetización normalizado, M_s es la magnetización de saturación, α es un parámetro adimensional de amortiguamiento, $\gamma = 2.2128 \times 10^5 \text{ mA}^{-1}\text{s}^{-1}$ es la razón giromagnética y \mathbf{H}_{eff} es el campo efectivo definido por:

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}} \quad (2)$$

siendo $E(\mathbf{m})$ es la energía del sistema integrada sobre todo el volumen V de la muestra, y cuyo Hamiltoniano en este estudio está dado por:

$$\mathcal{H}(\mathbf{m}) = -A\mathbf{m} \cdot \nabla^2 \mathbf{m} - \frac{1}{2} \mu_0 M_s \mathbf{m} \cdot \mathbf{H}_d - \mu_0 M_s \mathbf{m} \cdot \mathbf{H} - K_1 (\mathbf{m} \cdot \mathbf{u})^2 \quad (3)$$

donde A es la constante de rigidez del material ligada a la interacción de intercambio o canje, \mathbf{H}_d es el campo desmagnetizante de origen dipolar, μ_0 es la permeabilidad del espacio libre con valor de $1.2566 \times 10^6 \text{ NA}^{-2}\text{m}^{-1}$, K_1 es la constante de anisotropía y \mathbf{u} denota el eje fácil de magnetización del material. Así, en la ecuación 3, las contribuciones al Hamiltoniano son: intercambio, desmagnetizante, Zeeman y anisotropía magnetocristalina. En el término Zeeman, para el campo externo, se consideró un campo magnético alterno en la dirección \hat{z} de la forma $H = H_0 \sin[2\pi(t - t_0)/P]$. La Figura 2 muestra el eje fácil de magnetización de la nanopartícula, \mathbf{u} , el cual está descrito por el ángulo azimutal ϕ y el ángulo polar θ entre la dirección en la que se aplica el campo externo y el eje fácil.

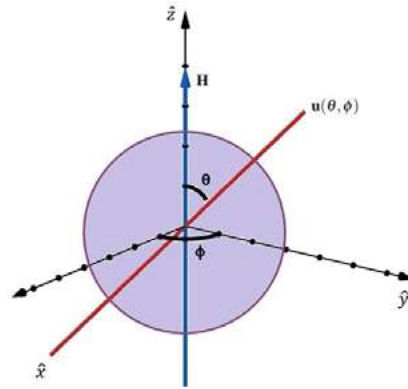


Figura 2. Detalles geométricos y ángulos utilizados para describir el eje fácil de magnetización **u**.

La eficiencia de calentamiento de una nanopartícula magnética bajo un campo magnético alterno se expresa en la cantidad física llamada potencia de pérdida específica (SLP por sus siglas en inglés Specific Loss Power) (Caizer, 2020). El área encerrada por el bucle de histéresis es el trabajo irreversible disipado en forma de calor, que se cuantifica mediante el SLP. Este calor viene dado por la siguiente relación (Maniotis et al., 2019):

$$SLP = \frac{\mu f}{\rho} \oint_L \mathbf{m}(t) d\mathbf{H}(t) \tag{4}$$

donde ρ es la densidad de masa de la partícula.

Para evaluar la respuesta dinámica de magnetización de una nanopartícula de magnetita sometida al campo oscilante, se da solución numérica a la ecuación LLG definida en la ecuación 2, a través del simulador micromagnético UBERMAG (Beg, Lang, & Fangohr, 2021; Beg, Taka, et al., 2021). magnético. UBERMAG es un lenguaje de dominio específico para expresar problemas micromagnéticos, proporciona una interfaz de alto nivel para paquetes de cálculo micromagnéticos existentes como el marco micromagnético orientado a objetos (OOMMF por sus siglas en inglés Object Oriented Micromagnetic Framework) (Beg, Taka, et al., 2021). UBERMAG emplea el método de diferencias finitas para encontrar la solución de la ecuación LLG. OOMMF utiliza un evolucionador Runge-Kutta de cuarto orden como evolucionador temporal para resolver la ecuación LLG (Mahalingam, Manikandan, & Arockiaraj, 2019). El algoritmo de Runge-Kutta de cuarto orden (Logan, 2006) es altamente preciso, donde el error acumulativo en un intervalo en el tiempo es proporcional a h^4 , siendo h el tamaño de paso del tiempo. En particular, nuestras simulaciones micromagnéticas se considera un tamaño de paso en el tiempo de $h = P/1000$.

En este artículo se presta principal interés a la influencia del periodo P del campo magnético sobre la respuesta dinámica de la magnetización. Se calcula el SLP para conocer su variación respecto al P del campo magnético. Adicionalmente, se calculan los paisajes energéticos de las contribuciones al Hamiltoniano $\mathcal{H}(\mathbf{m})$ para conocer la metastabilidad del sistema.

Materiales y métodos

El sistema estudiado corresponde a una NP de magnetita Fe_3O_4 de radio $R = 16\text{nm}$. Los parámetros físicos utilizados en el Hamiltoniano de la ecuación 3 corresponden a los de Fe_3O_4 : $M_s = 4.46 \times 10^5 \text{Am}^{-1}$, $A = 7.00 \times 10^{-12} \text{Jm}^{-1}$, $K_1 = 2.50 \times 10^4 \text{Jm}^{-3}$ y $\rho = 5240 \text{Kg m}^{-3}$. Adicionalmente, se empleó un valor típico de $\alpha = 0.07$ para un material ferrimagnético típico como lo es la magnetita (Osaci, 2021).

En el tratamiento numérico del modelo micromagnético del simulador Ubermag, se utiliza el método de diferencias finitas, en donde el volumen de la muestra se discretiza (ver Figura 3) mediante celdas de discretización de arista 2nm, inferior a la longitud de intercambio del sistema, con el fin de permitir variaciones suaves de la magnetización y que permitan sea considerada como una función continua y diferenciable.

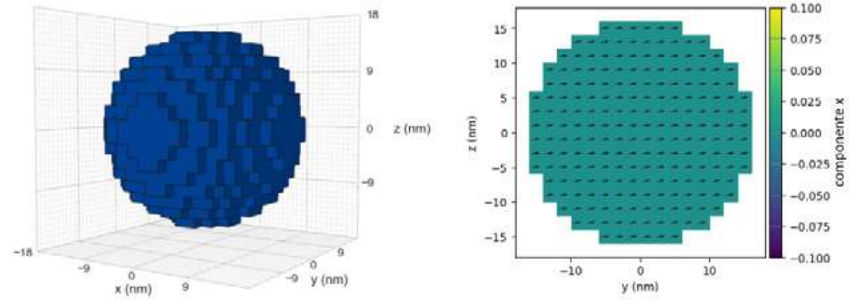


Figura 3. (Izquierda) Muestra magnética de una NP con geometría pseudoesférica, construida a partir de celdas de discretización de 2nm en Ubermag. (Derecha) Corte longitudinal de la NP, mostrando las orientaciones del eje fácil de magnetización $\mathbf{u}(82.5^\circ, 45^\circ)$ para cada celda de discretización en el plano $z - y$.

Más aún, la magnetización por celda es proporcional a la suma vectorial de los momentos magnéticos $\vec{\mu}_i$ de las celdas unitarias que componen la celda de discretización:

$$\vec{m} = \frac{1}{M_s V} \sum_{i \in V} \vec{\mu}_i \quad (5)$$

donde V es el volumen de la celda de discretización. En esta aproximación al continuo, la magnetización se considera un campo vectorial continuo que depende del espacio y del tiempo. Con el método de diferencias finitas empleado en el simulador micromagnético, el campo de magnetización en cada paso de tiempo se discretiza de modo que se asigna un único vector a cada celda de discretización. En las simulaciones micromagnéticas realizadas en UBERMAG, el controlador de evolución del tiempo se genera con `oommfc.TimeDriver()`.

En este trabajo, inicialmente la NP se encuentra en su estado de saturación en la dirección \hat{z} . Adicionalmente, se consideran los ángulos $\theta = 82.5^\circ$ y $\phi = 45^\circ$ para obtener un eje fácil de magnetización (ver Figura 3 derecha) diferente a la dirección del campo externo. Esto permite poner a prueba las competencias energéticas principalmente entre la anisotropía y el término Zeeman. En particular,

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(\theta, \phi) &= \sin(\theta)\cos(\phi)\hat{x} + \sin(\theta)\sin(\phi)\hat{y} + \cos(\theta)\hat{z} \\ \mathbf{u}(82.5^\circ, 45^\circ) &= 0\hat{x} + \sqrt{\frac{1 + \sqrt{6} + \sqrt{2}}{8}}\hat{y} + \sqrt{\frac{1 - \sqrt{6} - \sqrt{2}}{8}}\hat{z} \end{aligned} \quad (6)$$

La nanopartícula se somete a un campo magnético alterno $H(t) = H_0 \sin[2\pi(t - t_0)/P]$ aplicado en la dirección \hat{z} con amplitud $H_0 = 200$ mT, desplazamiento inicial $t_0 = P/4$ y periodo P en el rango de $(1, 1/1000)\mu s$. Es importante resaltar que las simulaciones micromagnéticas se realizan a temperatura cero y por tanto corresponden al estado base del sistema.

Resultados y discusión

Inicialmente, para el sistema magnético se calcula el periodo crítico del campo magnético alterno P_{crit} , para el cual se produce una transición de fase entre una fase dinámicamente ordenada y una fase dinámicamente desordenada. Se encuentra que el sistema a $P_{crit} = 1/2250 \mu s$ logra dicha transición de fase dinámica. Se observa en la Figura 4 (izquierda), que en la fase dinámicamente ordenada la magnetización no logra invertir su orientación y oscila alrededor del valor promedio $\bar{m}_z = 0.704$. Mientras que en la fase dinámicamente desordenada (ver Figura 4 derecha), se produce un decaimiento completo de la fase metaestable en cada semiperíodo causando una inversión completa de la magnetización.

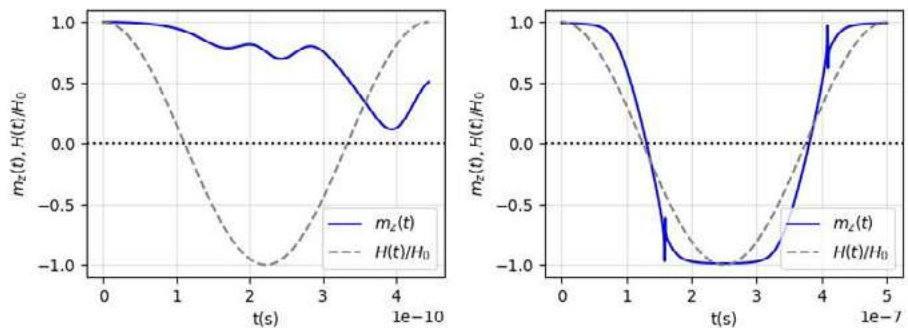


Figura 4. Evolución temporal de la componente \hat{z} de la magnetización (línea continua) del sistema magnético al aplicarle un campo $H(t)$ (línea discontinua) en dirección \hat{z} con amplitud $H_0 = 200$ mT. La fase dinámicamente ordenada (izquierda) se logra para un período $P = 1/2250 \mu s$, mientras la fase dinámicamente desordenada (derecha) para $P = 1 \mu s$.

A partir de la correspondencia entre las dependencias temporales de la magnetización y el campo es posible obtener las curvas de m_z en función del campo magnético reducido $H(t)/H_0$, tanto para la fase dinámicamente ordenada (Figura 5 izquierda) como para la desordenada (Figura 5 derecha). El decaimiento completo en la fase dinámicamente desordenada genera un ciclo de histéresis simétrico centrado en cero, cómo se muestra en la Figura 5 derecha, a diferencia de la fase dinámicamente ordenada (Figura 5 izquierda).

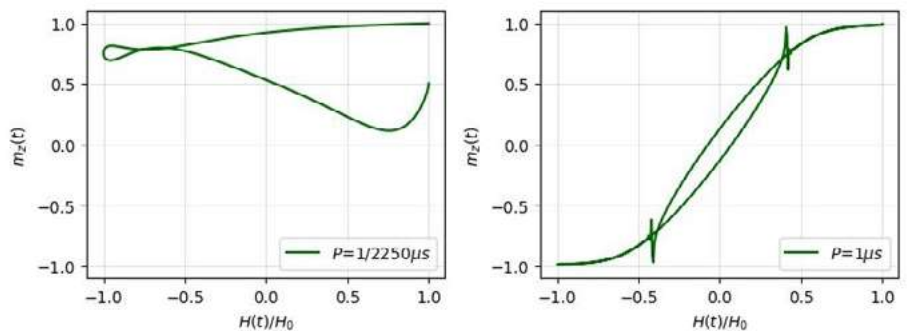


Figura 5. Curvas de magnetización en función del campo magnético reducido para la fase dinámicamente ordenada (izquierda) y la dinámicamente desordenada (derecha).

Se observa en la Figura 5 derecha, que la curva de histéresis para $P = 1 \mu s$ presenta un cruce de ramas. El cruce de ramas en las curvas de histéresis ya ha sido evidenciado por

(Mathews, Ehrlich, & Charipar, 2020) en sistemas de películas delgadas de níquel sobre sustratos de niobato de litio.

Se analizó también la componente \hat{z} de la magnetización en función del tiempo para cuatro diferentes periodos de oscilación del campo magnético $P = 1 \mu s$, $P = 1/5 \mu s$, $P = 1/10 \mu s$ y $P = 1/100 \mu s$, como se muestra en la Figura 6(a)-(d), respectivamente.

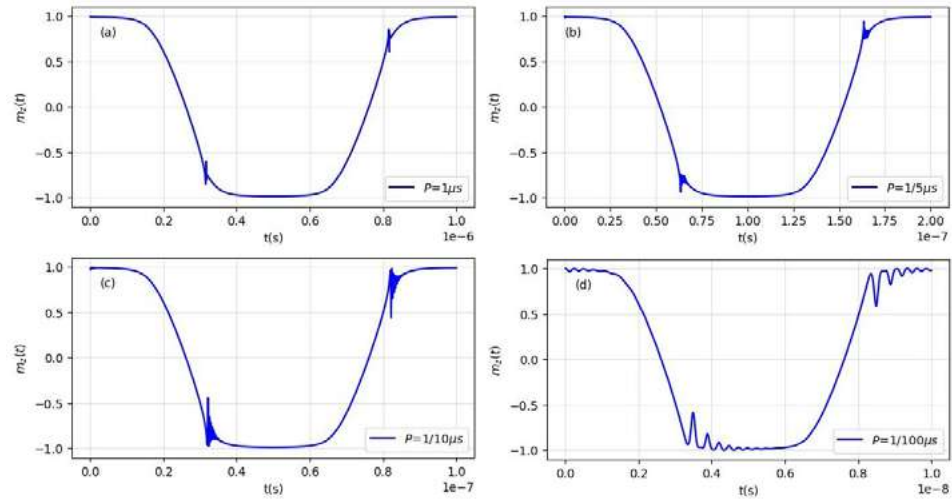


Figura 6. Evolución temporal de la componente \hat{z} de magnetización para un campo $H(t)$ con valores de período (a) $P = 1 \mu s$, (b) $P = 1/5 \mu s$, (c) $P = 1/10 \mu s$ y (d) $P = 1/100 \mu s$.

Se observa en la Figura 6 que la magnetización después de invertir su dirección y de tomar valores cercanos al de saturación, empieza a presentar unas variaciones u oscilaciones abruptas durante un corto tiempo que se van tornando más extendidas en el tiempo a medida que disminuye el periodo P del campo externo. Estas anomalías en las curvas de magnetización son atribuidas presumiblemente a un tipo de frustración magnética, causado por la competencia entre las contribuciones energéticas del Hamiltoniano definido en la ecuación 3 y por el campo magnético alterno aplicado, en la que los momentos magnéticos vacilan respecto a la dirección u orientación que deben asumir.

Eliminando el parámetro temporal, fue posible obtener los paisajes energéticos para cada una de las contribuciones de la energía, los cuales se muestran en la Figura 7. Estos paisajes energéticos corresponden a la energía en función del ángulo que forma el vector resultante de magnetización Θ con respecto a la dirección \hat{z} del campo, y el cual es diferente del ángulo del eje fácil \hat{u} . Los resultados muestran que existen un conjunto de valores de ángulos críticos Θ_{crit} para los cuales el sistema, en su intento de minimizar la energía, entra en un régimen caótico caracterizado por un alto grado de frustración magnética.

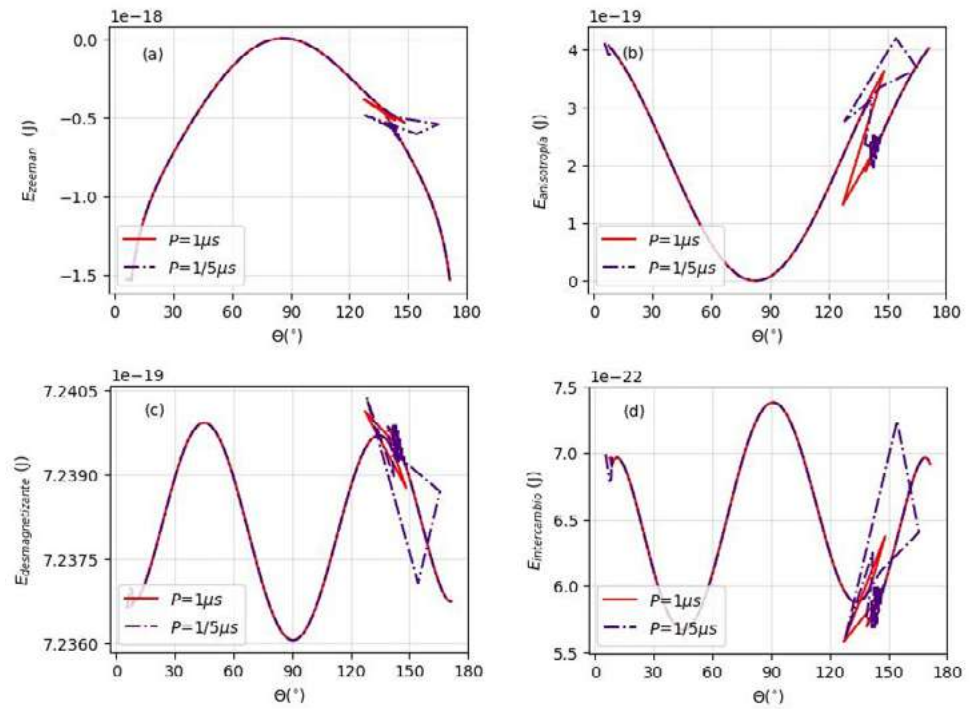


Figura 7. Paisajes de energía (a) Zeeman (b) anisotropía (c) desmagnetizante e (d) intercambio para una NP bajo un campo $H(t)$ con valores de período $P = 1 \mu s$ (línea roja) y $P = 1/5 \mu s$ (línea violeta).

En los paisajes energéticos que se muestran en la Figura 7, se observa que son altamente complejos y dinámicos debido a que cambian con el P del campo magnético aplicado. Las oscilaciones de las curvas de energía indican unas anomalías debido a una alta metastabilidad del sistema magnético, es decir, el sistema para un valor de Θ_{crit} pasa mucho tiempo moviéndose entre muchos microestados que tienen la misma energía lo que correspondería a un alto grado de degeneración. Esta degeneración de microestados a su vez, parece ser mayor a medida que se disminuye el período P del campo magnético alterno.

Finalmente, se calcula el valor de SLP para la nanopartícula de magnetita para diferentes periodos P del campo externo, como se muestra en la Tabla 1.

Table 1. SLP de una nanopartícula de magnetita bajo un campo magnético alterno de amplitud $H_0 = 200mT$, en función del periodo P del campo externo.

$P(\mu s)$	SLP (MW/kg)
1	2.4
$\frac{1}{5}$	11.7
$\frac{1}{10}$	23.5
$\frac{1}{100}$	326.0

Se observa en la Tabla 1 que con la disminución del periodo P del campo magnético el SLP aumenta, en consecuencia, una manera de maximizar el SLP para fines de hipertermia es disminuir el periodo del campo externo. Usov (**Usov**, 2010) para un ensamble de nanopartículas superparamagnéticas de magnetita muestra que la cantidad SLP es proporcional a la frecuencia del campo externo, confirmando así nuestra conclusión. Adicional-

mente, nuestros rangos de valores de SLP se encuentran dentro del orden de magnitud típicos para típicos basados en magnetita (Usov, 2010).

Conclusiones

En este artículo se estudia un sistema magnético correspondiente a una nanopartícula de magnetita con radio de 16 nm, eje fácil de magnetización $\mathbf{u}(82.5^\circ, 45^\circ)$ y expuesta a un campo magnético alterno con amplitud $H_0 = 200$ mT. Se calcula la componente \hat{z} de magnetización $m_z(t)$, las contribuciones energéticas $E(m)$ y el paisaje angular de energía, con ayuda del simulador micromagnético UBERMAG. Se ha prestado especial interés en conocer el efecto del período P del campo sobre la respuesta dinámica de la magnetización. Tal respuesta está fuertemente influenciada por el período P del campo magnético alterno. En particular, para $P = 1/2250 \mu s$, el sistema exhibe una transición de fase entre una fase dinámicamente ordenada y una desordenada.

Por otra parte, nuestros resultados muestran regiones en el espacio energético de configuraciones caracterizadas por un alto grado de frustración magnética con variaciones abruptas de la energía propias de un sistema caótico. El grado de frustración aumenta con la disminución del valor de P , y se debe a la alta metastabilidad del sistema magnético. La frustración magnética también está asociada a una degeneración energética del sistema, donde diferentes microestados con valores similares de Θ en la zona crítica, pueden tener valores similares de la energía. Para estos valores de Θ_{crit} , la magnetización del sistema magnético varía rápida y abruptamente de orientación.

Finalmente, se encuentra que al disminuir el periodo P del campo se obtiene una mayor eficiencia de calentamiento de la nanopartícula de magnetita. Por lo tanto, una manera de maximizar el SLP para fines de hipertermia es disminuir el periodo del campo externo.

Agradecimientos

El apoyo financiero fue brindado por los Proyectos CODI-UdeA 2020-34211, 2022-51311, 2022-51312 y 2022-51330. Uno de los autores (J.R) agradece al programa de Dedicación Exclusiva de la Vicerrectoría de docencia de la Universidad de Antioquia y al programa de Sostenibilidad 2024 para el Grupo de Magnetismo y Simulación.

Contribución de los autores

N.R y J.R aportaron contribuciones sustanciales a la concepción y el diseño del estudio, a la adquisición e interpretación de los datos para el estudio. N.R y J.R participaron en la redacción del manuscrito y en su revisión crítica, contribuyendo a su contenido intelectual. J.R aprobó la versión final que será publicada. N.R y J.R aceptaron asumir responsabilidad por todos los aspectos del estudio, asegurando que se investigarán y resolverán apropiadamente las preguntas que pudieran surgir, relacionadas con cualquier parte del estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe de interés que pueda influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación.

References

Beg, M., Lang, M., Fangohr, H. (2021). Ubermag: Toward more effective micromagnetic workflows. *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(2), 1-5.

- Beg, M., Taka, J., Kluyver, T., Kononov, A., Ragan-Kelley, M., Thierry, N. M., Fangohr, H.** (2021). Using jupyter for reproducible scientific workflows. *Computing in Science & Engineering*, 23(2), 36-46.
- Caizer, C.** (2020). Optimization study on specific loss power in superparamagnetic hyperthermia with magnetite nanoparticles for high efficiency in alternative cancer therapy. *Nanomaterials*, 11(1), 40.
- Coe, J. M.** (2010). *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge university press. Guimaraes, A. P., & Guimaraes, A. P. (2009). *Principles of nanomagnetism* (Vol. 7). Springer.
- Korniss, G., White, C., Rikvold, P., Novotny, M.** (2000). Dynamic phase transition, universality, and finite-size scaling in the two-dimensional kineticising model in an oscillating field. *Physical Review E*, 63(1), 016120.
- Kronmuller, H.** (2007). *Handbook of magnetism and advanced magnetic materials* (Vol. 1). Wiley.
- Ling Yi., Tang X., Wang F., Zhou X., Wang R., Deng L., Shang T., Liang B., Li P., Ran H., Wang Z., Hu B., Li C., Zuo G., Zheng Y.** (2017). Highly efficient magnetic hyperthermia ablation of tumors using injectable polymethylmethacrylate- Fe_3O_4 . *RSC advances*, 7(5), 2913-2918.
- Logan, J. D.** (2006). *A first course in differential equations*. Springer.
- Lozano-Ocaña, Y., Tubón-Usca, I., Vaca-Altamirano, G., Tubón-Usca, G.** (2022). Métodos de obtención y aplicación de nanopartículas magnéticas en el tratamiento y diagnóstico del cáncer: una revisión. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 7-26.
- Mahalingam, S. S., Manikandan, B., Arockiaraj, S.** (2019). Review—micromagnetic simulation using oommf and experimental investigations on nano composite magnets. In *Journal of physics: Conference series*, 1172, 012070.
- Mandea, M., Korte, M.** (2010). *Geomagnetic observations and models* (Vol. 5). Springer.
- Maniotis, N., Nazlidis, A., Myrovali, E., Makridis, A., Angelakeris, M., Samaras, T.** (2019). Estimating the effective anisotropy of ferromagnetic nanoparticles through magnetic and calorimetric simulations. *Journal of Applied Physics*, 125(10), 103903
- Mathews, S. A., Ehrlich, A. C., Charipar, N. A.** (2020). Hysteresis branch crossing and the stoner-wohlfarth model. *Scientific Reports*, 10(1), 15141.
- Nguyen, M. D., Tran, H.-V., Xu, S., Lee, T. R.** (2021). Fe_3O_4 nanoparticles: structures, synthesis, magnetic properties, surface functionalization, and emerging applications. *Applied Sciences*, 11(23), 11301.
- Osaci, M.** (2021). Influence of damping constant on models of magnetic hyperthermia. *Acta Physica Polonica A*, 139(1), 51-55.
- Park, H., Pleimling, M.** (2013). Dynamic phase transition in the three-dimensional kineticising model in an oscillating field. *Physical Review E*, 87(3), 032145.
- Rabias I., Tsitrouli D., Karakosta E., Kehagias T., Diamantopoulos G., Fardis M., Stamopoulos D., Maris TG., Falaras P., Zouridakis N., Diamantis N., Panayotou G., Verganelakis DA., Drossopoulou GI., Tsilibari EC., Papavassiliou G.** (2010) Rapid magnetic heating treatment by highly charged maghemite nanoparticles on Wistar rats exocranial glioma tumors at microliter volume. *Biomicrofluidics*, 4(2), 24111.
- Roa, N., Restrepo, J.** (2023). Micromagnetic approach to the metastability of a magnetite nanoparticle and specific loss power as function of the easy-axis orientation. *Physchem*, 3(3), 290-303.
- Salimi, M., Sarkar, S., Hashemi, M., Saber, R.** (2020). Treatment of breast cancerbearing Balb/c mice with magnetic hyperthermia using dendrimer functionalized ironoxide nanoparticles. *Nanomaterials*, 10(11), 2310.
- Usov, N.** (2010). Low frequency hysteresis loops of superparamagnetic nanoparticles with uniaxial anisotropy. *Journal of Applied Physics*, 107(12), 123909

Artículo original

Diversidad taxonómica de hormigas en áreas verdes urbanas en una ciudad de tamaño medio en los Andes centrales de Colombia

Taxonomic diversity of ants in urban green areas in a medium-sized city in the Central Andes of Colombia

✉ Andrés Felipe Grajales-Andica*, ✉ Delly Rocío García-Cárdenas

Programa de Biología, Universidad del Quindío, Armenia, Quindío, Colombia

Resumen

La urbanización es uno de los mayores promotores de la pérdida de la biodiversidad, especialmente en regiones altamente diversas y urbanizadas, como los Andes colombianos. Por ello es fundamental estudiar el potencial de las áreas verdes urbanas para la conservación. En este estudio evaluamos y comparamos la diversidad taxonómica de hormigas en fragmentos de bosque y guadua, dos tipos de área verde inmersos en una matriz urbana en Armenia, Andes centrales de Colombia. Utilizando trampas de caída y cernido de hojarasca, se cuantificaron las diferencias en el número de especies nativas y exóticas, la diversidad alfa y beta y los grupos funcionales. Se recolectaron 65 especies de hormigas, agrupadas en 34 géneros y ocho subfamilias. En los fragmentos de bosque y guadua el número de especies nativas fue mayor que el de las exóticas. La diversidad alfa sólo evidenció diferencias en la riqueza de especies, en donde los fragmentos de bosque son significativamente más ricos. Los dos tipos de fragmentos evidenciaron una alta similitud en la composición de especies y grupos funcionales; el reemplazo de especies fue el principal componente en la determinación de la diversidad beta. Además, se registraron 17 grupos funcionales y los dos tipos de fragmentos compartieron 46 especies en 15 grupos funcionales. Los datos de este estudio sugieren que las áreas urbanas, en especial los fragmentos de bosque albergan una diversidad notable de especies de hormigas, que por su singularidad ameritan los esfuerzos de conservación y restauración.

Palabras clave: Ecología urbana; Fragmentos de bosque; Grupos funcionales; Especies nativas; Conservación.

Abstract

Urbanization is one of the major drivers of biodiversity decline, especially in highly diverse and urbanized regions such as the Colombian Andes. Therefore, understanding how green areas in cities have the potential for conservation is fundamental. Here we evaluated and compared the taxonomic diversity of ants in forest and guadua fragments, two types of green areas immersed in an urban matrix in Armenia, central Andes of Colombia. Differences in the number of native and exotic species, alpha and beta diversity, and functional groups were quantified using fall traps and leaf litter sifting. We collected 65 ant species grouped into 34 genera and eight subfamilies. In the forest and guadua fragments, the number of native species was higher than that of exotic species. Alpha diversity only showed differences in species richness, with forest fragments being significantly richer. The two types of fragments showed a high similarity in species composition and functional groups; species turnover was the main component determining beta diversity. We registered 17 functional groups, with 15 grouping 46 species shared by both types of fragments. These data suggest that urban areas, especially forest fragments, harbor an important diversity of ant species whose uniqueness merits conservation and restoration efforts.

Keywords: Urban ecology; Forest fragments; Functional groups; Native species; Conservation.

Citación: Grajales-Andica AF, García-Cárdenas DR. Diversidad taxonómica de hormigas en áreas verdes urbanas de una ciudad de tamaño medio en los Andes centrales de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):281-297, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.2549>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Andrés Felipe Grajales-Andica;
afgrajalesandica@gmail.com

Recibido: 12 de enero de 2024

Aceptado: 8 de abril de 2023

Publicado en línea: 14 de mayo de 2024



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

Introducción

La pérdida de hábitats naturales ocasionada por el aumento constante de la urbanización constituye uno de los mayores problemas para la conservación y diversidad de las especies (Grimm *et al.*, 2008; Faeth *et al.*, 2011; Reyes-López & Carpintero, 2014; Fenoglio *et al.*, 2020). La conversión de las áreas naturales a superficies impermeables resulta en la fragmentación, degradación y aislamiento de los hábitats naturales, que quedan inmersos en una matriz con diferentes usos antropogénicos (McKinney, 2002; MacGregor-Fors & Ortega-Álvarez, 2013), los cuales producen cambios en el clima, la hidrología local, la contaminación del aire y el suelo, así como la producida por el ruido y la luz artificial (Kalnay & Cai, 2003; Marín-Gómez, 2022).

Estos procesos generan estrés en las condiciones ambientales, lo que puede ocasionar una homogenización y reducción de la singularidad biológica de los ecosistemas locales (Deák *et al.*, 2016). A pesar de esto, en diversos estudios se ha señalado que las áreas verdes inmersas en las ciudades (es decir, fragmentos de bosque, parques, terrenos baldíos, jardines, entre otros) no son lugares aislados de la vida silvestre y que tienen potencial para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en los entornos urbanos cuando hay una gestión adecuada (Guénard *et al.*, 2015; Lepczyk *et al.*, 2017). Sin embargo, dichas áreas de las ciudades son uno de los ecosistemas menos estudiados y comprendidos (Faeth *et al.*, 2011).

En Armenia, ciudad ubicada en los Andes centrales de Colombia, las áreas verdes que aún persisten están compuestas por dos tipos de coberturas principales: los fragmentos de bosque (FB), que exhiben una gran estructura y composición de especies vegetales, y los fragmentos de guadua (FG), dominados por *Guadua angustifolia* (Kunth, 1822), una especie de bambú neotropical gigante que, aunque crece de forma natural en esta región, es altamente invasiva y de rápida expansión, por lo cual desplaza y reduce los fragmentos de bosque nativos (Salazar-Montoya & Nieto-Cárdenas, 2005; Carvajal-Castro *et al.*, 2019). Así mismo, los pocos estudios sobre estos ecosistemas en entornos urbanos se han centrado en algunos vertebrados (Vanegas-Guerrero *et al.*, 2016; Carvajal-Castro *et al.*, 2019; Marín-Gómez, 2022), dejando de lado otros grupos de gran importancia, como los artrópodos.

Entre los artrópodos, las hormigas han tenido una atención particular en los ecosistemas urbanos (Santos, 2016). Se ha evidenciado que la urbanización favorece a las hormigas con características pioneras, por ejemplo, las que tienen hábitos omnívoros; estas especies tienen la capacidad de descubrir y dominar nuevos recursos alimenticios y son flexibles a la hora de la fundación de sus colonias (anidación) (Fenoglio *et al.*, 2020; Dáttilo & MacGregor-Fors, 2021), en tanto que la urbanización puede resultar desventajosa para las especies altamente especializadas, las cuales requieren medios de anidación o alimento específico, o son sensibles a la presencia de otras especies de hormigas agresivas (Uno *et al.*, 2010; Walter *et al.*, 2018). En este sentido, la urbanización puede llegar a amenazar a las especies nativas y favorecer a las exóticas (Walter *et al.*, 2018).

Por otro lado, la mayoría de los estudios sobre hormigas en ambientes urbanos se ha desarrollado en zonas templadas, en tanto que las investigaciones en las zonas tropicales han sido escasas (Santos, 2016; Brassard *et al.*, 2021; Ramos-Ortega & Guerrero, 2023; Forero-Chávez *et al.*, 2024), rasgo que dificulta la búsqueda de patrones, ya que los procesos ecológicos y las dinámicas de desarrollo urbano varían entre regiones; además, en las zonas tropicales hay una mayor diversidad de especies y ecosistemas (Luck & Smallbone, 2010; Carvajal-Castro *et al.*, 2019). Por ello es importante hacer estudios en regiones de gran diversidad, como los Andes colombianos, los cuales presentan, a su vez, altos niveles de urbanización (Macgregor-Fors & Ortega-Álvarez, 2013).

En dicho contexto, el objetivo de nuestro estudio fue comparar la diversidad taxonómica de hormigas en fragmentos de bosque (FB) y de guadua (FG), dos tipos de áreas verdes inmersas en una matriz urbana en Armenia, ciudad de tamaño medio ubicada en el departamento de Quindío, en los Andes centrales de Colombia. Se evaluó específicamente

si el número de especies exóticas y nativas de hormigas variaba según el tipo de área verde; si las diversidades alfa y beta diferían entre estos, y si los grupos funcionales de hormigas variaban entre los fragmentos de bosque y los de guadua.

Se esperaba que los fragmentos de bosque, por su mayor complejidad estructural y diversidad de recursos, albergaran más especies nativas que exóticas; que los fragmentos de bosque presentaran una mayor diversidad alfa y una diversidad beta diferente a la de los fragmentos de guadua, y que los grupos funcionales de hormigas asociados con nichos específicos de hábitat tuvieran mayor representación en los fragmentos de bosque, en tanto que los de guadua albergarían una comunidad de hormigas con mayor proporción de especies exóticas y grupos funcionales generalistas. Nuestro estudio aspira a contribuir al conocimiento científico de la ecología urbana en Colombia, con miras a futuras aplicaciones prácticas en el diseño de estrategias de conservación y restauración en las ciudades.

Materiales y métodos

Área de estudio

Armenia, capital del departamento de Quindío, se ubica en la vertiente occidental de la cordillera Central de los Andes de Colombia ($4^{\circ}31'0.001''$ N; $75^{\circ}39'59.975''$ O), entre los 1.200 y los 1.600 metros sobre el nivel del mar (**Figura 1**). La ciudad tiene un área municipal de 115 km² y una población de ~300.000 habitantes (**Marín-Gómez, 2022**). Su temperatura promedio es de 22 °C, la humedad relativa es del 80 % y la precipitación media anual de 2.163 mm; la zona está categorizada como bosque húmedo premontano (bmh-PM) (**IDEAM, 2014; Carvajal-Castro et al., 2019**).

Cerca del 30 % del área total de la ciudad está compuesta por corredores biológicos inmersos en la matriz urbana, configurados por dos tipos de áreas verdes o coberturas: fragmentos de bosques, es decir, áreas naturales que presentan una alta estructura (diferentes estratos arbóreos, arbustivos y herbáceos) y riqueza de especies vegetales, y los fragmentos de guadua dominados por la especie *Guadua angustifolia* (**Salazar-Montoya & Nieto-Cárdenas, 2005; Carvajal-Castro et al., 2019; Orozco et al., 2023**).

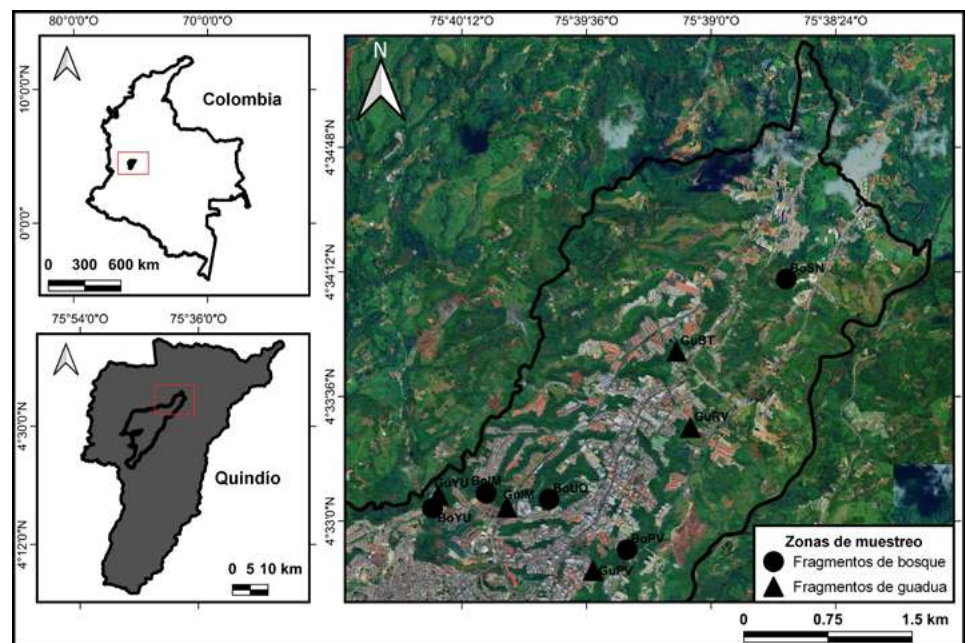


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la vertiente occidental de la cordillera central de los Andes de Colombia

Muestreo de hormigas y determinación taxonómica

Se seleccionaron cinco fragmentos de bosque y cinco de guadua distribuidos en el norte de Armenia; cada fragmento se muestreó una vez entre noviembre del 2019 y diciembre del 2020. En cada fragmento se establecieron dos transectos lineales de 50 metros de longitud, separados entre sí por una distancia mínima de 50 metros. En cada transecto se establecieron seis estaciones de muestreo con diez metros de separación entre ellas. En cada estación se instaló una trampa de caída, activa durante 24 horas; se recogió 1 m² de hojarasca, que luego fue cernida y procesada en sacos mini-Winkler durante 48 horas para la extracción de las hormigas; así se obtuvieron 24 muestras por fragmento, 120 por cobertura (fragmentos de bosque y de guadua) y 240 en todo el estudio.

Los especímenes recolectados se preservaron en alcohol al 96 % y fueron separados inicialmente en morfoespecies. Posteriormente, la identificación taxonómica de las hormigas se hizo utilizando las claves especializadas, compiladas en **Fernández *et al.*** (2019), así como los recursos disponibles en **Antweb** (2021) y **AntWiki** (2021). Los especímenes fueron depositados en la Colección de Insectos de la Universidad del Quindío, CIUQ (permiso de colecta: ANLA, Resolución N° 01789).

Análisis de datos

Especies nativas Vs. exóticas. El origen de las especies (nativo o exótico) en la región se determinó con la información disponible en **AntWeb** (2021) y **AntWiki** (2021). Se utilizó una prueba no paramétrica de Wilcoxon para determinar si existían diferencias en la media del número de especies de hormigas nativas y exóticas en los fragmentos de bosque y guadua porque los datos de los fragmentos no cumplían con los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (prueba F para comparar varianzas): fragmentos de bosque (Shapiro-Wilk: 0,80357, p=0,01; prueba F: 0,0088106, p=0,0004), fragmentos de guadua (Shapiro-Wilk: 0,79558, p=0,01; prueba F: 0,050955, p=0,01).

Diversidad alfa. Para establecer y comparar la diversidad taxonómica de hormigas en los fragmentos de bosque y los de guadua se hizo un análisis mediante el número efectivo de especies (^qD) (**Jost**, 2006), un enfoque que es equivalente a los números de Hill (**Hill**, 1973). El exponente *q* determina la influencia de la abundancia relativa de las especies en los valores de diversidad (**Jost**, 2006). Cuando el exponente *q* = 0, es decir, ⁰D, los cálculos son insensibles a la abundancia de las especies y el resultado es equivalente al número de especies (esto es, la riqueza). Cuando *q* = 1, ¹D, los análisis dan mayor peso a las especies comunes y se obtiene un cálculo correspondiente al exponencial del índice de Shannon. Cuando *q* = 2, ²D, el resultado refleja principalmente las especies más abundantes, por lo que el cálculo es equivalente al inverso del índice de Simpson (**Jost**, 2006; 2007).

Las expresiones de diversidad en los fragmentos de bosque y los de guadua se compararon mediante un análisis de cobertura de muestreo (\hat{C}_m) (**Chao & Jost**, 2012). Este índice varía entre cero (mínima completitud) y uno (máxima completitud) para indicar la probabilidad de que un individuo capturado al azar pertenezca a una de las especies ya registradas en el muestreo. La cobertura de muestreo permite realizar comparaciones en función de una misma proporción de la comunidad (misma cobertura) y no de un tamaño igual de la muestra (**Chao & Jost**, 2012). Al expresar la diversidad como el número efectivo y comparar en la misma cobertura de muestreo, se cumple el principio de replicación y es posible calcular la magnitud de la diferencia de diversidad entre comunidades (**Jost**, 2006; **Chao *et al.***, 2020).

Debido a que las hormigas son insectos sociales que viven en colonias, las medidas de abundancia pueden resultar sesgadas por la proximidad a los nidos y sobreestimarse la presencia de ciertas especies, por ende, los individuos no se pueden considerar como unidades independientes; por ello la abundancia relativa de las especies de hormigas se estimó como la frecuencia de captura de cada una de las especies considerando la suma de las trampas de caída y las muestras de hojarasca en cada tipo fragmento (**Delabie *et***

al., 2021). Se usó un intervalo de confianza de 95 % en cada expresión de diversidad (0D , 1D , 2D) como criterio estadístico en el que la ausencia de solapamiento entre los IC de 95 % indica diferencias significativas entre los valores de diversidad (Chao *et al.*, 2020). Dichos análisis se hicieron con el paquete iNEXT (Hsieh *et al.*, 2016) en el programa Rstudio®, versión 4.2.0 (RStudio Team, 2022) y el *script* obtenido de Méndez-Rojas *et al.* (2022).

Distribución de abundancias. Se elaboraron curvas de abundancia relativa para determinar los cambios en la estructura de los ensamblajes de hormigas y en las especies más frecuentes o dominantes en cada tipo de fragmento. En estas curvas la información relativa a los cambios en la distribución de la abundancia indica las diferencias en la uniformidad de las especies entre los ensamblajes (Magurran, 2005; Baena *et al.*, 2020).

Diversidad beta. La similitud de especies entre fragmentos de bosques y de guadua se comparó con el índice de diversidad beta basado en los lineamientos propuestos por Colwell *et al.* (2012). Este índice mide la relación entre la diversidad gama [$D(HY)$] y la media de la diversidad alfa [$D(H\alpha)$]; su ventaja con respecto a las medidas anteriores de diversidad beta es su independencia frente a las diferencias en los valores alfa de los hábitats comparados. Si este índice de diversidad beta tiende a ser igual a uno, significa que ambos hábitats (fragmentos de bosque y fragmentos de guadua) son similares en composición de especies; si el índice tiende a ser igual a dos, quiere decir que los hábitats son diferentes (Jost, 2007).

Además, para representar la ordenación de la composición de especies en los dos tipos de fragmentos, se recurrió a un análisis de escalamiento multidimensional no-métrico (NMDS) basado en una matriz de disimilitud de Bray-Curtis, utilizando la frecuencia de captura como una medida de abundancia (Ramos-Ortega & Guerrero, 2023). También se hizo un análisis multivariado de permutación de varianza (PERMANOVA) con 999 interacciones de la matriz Bray-Curtis para evaluar diferencias significativas en la composición de especies entre fragmentos. Por último, se evaluó la propuesta de Baselga (2017), en la que la composición de especies o diversidad beta (β sor) puede surgir a partir de dos procesos diferentes y opuestos: ya sea por un proceso de anidamiento (β nes), es decir, especies de comunidades con menor riqueza son subconjuntos de comunidades con mayor riqueza, o por recambio espacial (β sim), cuando las especies presentes en una comunidad dada están ausentes en otra debido a que son reemplazadas. Los análisis NMDS y PERMANOVA se realizaron con el paquete *vegan* del programa Rstudio (Oksanen *et al.*, 2007), mientras que la partición de la diversidad beta en componentes de recambio y anidamiento se hizo con el paquete *betapart* (Baselga *et al.*, 2018).

Grupos funcionales. Se evaluó el cambio espacial de los grupos funcionales de hormigas en los dos tipos de fragmentos. Las especies se clasificaron en grupos funcionales considerando la propuesta para las hormigas neotropicales (Brandão *et al.*, 2012; Groc *et al.*, 2014; Koch *et al.*, 2019). Para las especies que no cuentan con información o que no pudieron ser identificadas a nivel de especie, la clasificación se basó en los hábitos registrados para el género. Una vez asignadas las especies a un grupo funcional, los dos tipos de fragmentos se compararon mediante el índice de similitud de Sørensen adaptado por Silvestre (2000), el cual incluye el número de grupos funcionales muestreados por fragmento y el número de especies presente dentro de cada grupo.

Resultados

Se recolectaron 7.922 hormigas agrupadas en 65 especies, 34 géneros y ocho subfamilias (Tabla 1). La subfamilia Myrmicinae fue la que presentó mayor número de géneros (44 %) y especies (57 %), seguida de Ponerinae (15 %, 14 %) y Formicinae (15 %, 12 %). Los géneros con más especies o morfoespecies fueron *Pheidole* (9 spp.) y *Strumigenys* (7 spp.). Cerca del 74 % de los taxones se identificó a nivel de especie y los 17 restantes a nivel de género.

Tabla 1. Listado de especies de hormigas según su origen, grupos funcionales y frecuencia de captura registrada en los fragmentos urbanos de bosque y guadua en la ciudad de Armenia, Quindío, Colombia

Especies	Origen	Fragmentos de bosques	Fragmentos de guadua	Grupo funcional
Amblyoponinae				
<i>Fulakora agostii</i> (Lacau & Delabie, 2002)	Nativa	3	1	ESDQ
<i>Fulakora orizabana</i> (Brown, 1960)	Nativa	1	0	ESDQ
Dolichoderinae				
<i>Linepithema iniquum</i> (Mayr, 1870)	Nativa	1	5	OP
<i>Linepithema piliferum</i> (Mayr, 1870)	Nativa	0	9	OP
<i>Tapinoma melanocephalum</i> (Fabricius, 1793)	Exótica	2	7	OAS
Ectatomminae				
<i>Alfaria minuta</i> (Emery, 1896)	Nativa	5	6	DGHM
<i>Bazboltonia microps</i> (Borgmeier, 1957)	Nativa	7	6	DGHM
<i>Heteroponera inca</i> Brown, 1958	Nativa	0	6	DGHM
<i>Holcaponera bisulca</i> (Kempf & Brown, 1968)	Nativa	32	50	DGHM
Formicinae				
<i>Brachymyrmex heeri</i> Forel, 1874	Nativa	12	6	OP
<i>Brachymyrmex</i> sp.1	Nativa	7	2	OP
<i>Brachymyrmex</i> sp.2	Nativa	2	0	OP
<i>Camponotus simillimus</i> (Smith, 1862)	Nativa	1	0	OAS
<i>Camponotus sphenoidalis</i> Mayr, 1870	Nativa	2	0	OAS
<i>Myrmelachista zeledoni</i> Emery, 1896	Nativa	4	0	ET
<i>Nylanderia steinheili</i> (Forel, 1893)	Nativa	21	22	OGM
<i>Paratrechina longicornis</i> (Latreille, 1802)	Exótica	0	1	OGM
Myrmicinae				
<i>Acanthognathus ocellatus</i> Mayr, 1887	Nativa	1	0	DD
<i>Adelomyrmex tristani</i> (Menozi, 1931)	Nativa	3	2	OP
<i>Atta cephalotes</i> (Linnaeus, 1758)	Nativa	4	3	CHC
<i>Carebara reticulata</i> Fernández, 2004	Nativa	22	20	OP
<i>Cephalotes</i> sp.1	Nativa	2	0	ET
<i>Crematogaster nigropilosa</i> Mayr, 1870	Nativa	10	1	ET
<i>Crematogaster obscurata</i> Emery, 1895	Nativa	1	1	ET
<i>Cyphomyrmex dexus</i> Snelling & Longino, 1992	Nativa	8	17	CHL
<i>Cyphomyrmex rimosus</i> (Spinola, 1851)	Nativa	0	5	CHL
<i>Cyphomyrmex vorticis</i> Weber, 1940	Nativa	2	2	CHL
<i>Myrmicocrypta urichi</i> Weber, 1937	Nativa	0	6	CHI
<i>Octostruma balzani</i> (Emery, 1894)	Nativa	13	12	EDH
<i>Octostruma onorei</i> (Baroni Urbani & De Andrade, 2007)	Nativa	15	6	EDH
<i>Octostruma stenoscapa</i> Palacio, 1997	Nativa	2	4	EDH
<i>Pheidole</i> sp.1	Nativa	12	2	OP
<i>Pheidole</i> sp.2	Nativa	32	25	OP
<i>Pheidole</i> sp.3	Nativa	69	27	OP

<i>Pheidole</i> sp.4	Nativa	30	54	OP
<i>Pheidole</i> sp.5	Nativa	35	45	OP
<i>Pheidole</i> sp.6	Nativa	1	0	OP
<i>Pheidole</i> sp.7	Nativa	9	8	OP
<i>Pheidole</i> sp.8	Nativa	4	2	OP
<i>Pheidole</i> sp.9	Nativa	2	9	OP
<i>Rhopalothrix ciliata</i> Mayr, 1870	Nativa	9	3	DP
<i>Rhopalothrix mandibularis</i> Guerrero & Grajales-Andica, 2024	Nativa	2	6	DP
<i>Rogeria belti</i> Mann, 1922	Nativa	6	3	OP
<i>Solenopsis geminata</i> (Fabricius, 1804)	Nativa	80	75	OETM
<i>Solenopsis</i> sp.1	Nativa	11	2	OP
<i>Solenopsis</i> sp.2	Nativa	6	3	OP
<i>Strumigenys biolleyi</i> Forel, 1908	Nativa	5	6	DD
<i>Strumigenys connectens</i> Kempf, 1958	Nativa	1	0	DD
<i>Strumigenys gundlachi</i> (Roger, 1862)	Nativa	39	55	DD
<i>Strumigenys lanuginosa</i> Wheeler, 1905	Nativa	5	2	DD
<i>Strumigenys louisianae</i> Roger, 1863	Nativa	1	0	DD
<i>Strumigenys perparva</i> Brown, 1958	Nativa	2	1	DD
<i>Strumigenys raptans</i> (Bolton, 2000)	Nativa	9	5	DD
<i>Wasmannia auropunctata</i> (Roger, 1863)	Nativa	12	0	OP
Ponerinae				
<i>Hypoponera distinguenda</i> (Emery, 1890)	Nativa	3	14	DHP
<i>Hypoponera parva</i> (Forel, 1909)	Nativa	5	6	DHP
<i>Hypoponera</i> sp.1	Nativa	2	4	DHP
<i>Leptogenys quadrata</i> Lattke, 2011	Nativa	1	0	ESDI
<i>Odontomachus chelifer</i> (Latreille, 1802)	Nativa	6	7	DEGS
<i>Odontomachus erythrocephalus</i> Emery, 1890	Nativa	0	3	DEG
<i>Pachycondyla fuscoatra</i> (Roger, 1861)	Nativa	1	3	DEG
<i>Pachycondyla impressa</i> (Roger, 1861)	Nativa	5	7	DEG
<i>Rasopone ferruginea</i> (Smith, 1858)	Nativa	44	27	DGHM
Proceratiinae				
<i>Discothyrea horni</i> Menozzi, 1927	Nativa	9	6	ESDHA
Pseudomyrmecinae				
<i>Pseudomyrmex</i> sp.1	Nativa	1	0	ET

Grupos funcionales: CHC = cultivadoras de hongos cortadoras de hojas, CHI = cultivadoras de hongos inferiores, CHL = cultivadoras de hongos de levadura, DD = depredadoras dacetinas, DEG = depredadoras generalistas epigeas grandes, DEGS = depredadoras generalistas epigeas grandes y dispersoras de semillas, DGHM = depredadoras generalistas hojarasca/hipogeas tamaño medio, DHP = depredadoras generalistas hojarasca/hipogeas tamaño pequeño, EDH = especialistas de suelo depredadoras de otras hormigas, ESDHA = especialistas de suelo depredadoras de huevos de artrópodos, ESDI = especialistas de suelo depredadoras/forrajeadoras de isópodos, ESDQ = especialistas de suelo depredadoras de quilópodos, ET = especies turísticas, OAS = omnívoras arbóreas/suelo, OETM = omnívoras epigeas de tamaño grande/medio, OGM = omnívoras hojarasca/hipogeas tamaño medio, OP = omnívoras epigeas/hojarasca/hipogeas pequeña

Las muestras de los fragmentos de bosque presentaron el mayor número de especies (59) y las siguientes especies exclusivas (13): *Acanthognathus ocellatus* (Mayr, 1887), *Myrmelachista zeledoni* (Emery, 1896), *Brachymyrmex* sp. 2, *Pheidole* sp. 6, *Camponotus simillimus* (Smith, 1862), *Wasmannia auropunctata* (Roger, 1863), *Pseudomyrmex* sp. 1, *Cephalotes* sp. 1, *Leptogenys quadrata* (Lattke, 2011), *Camponotus sphenoidalis* (Mayr, 1870), *Fulakora orizabana* (Brown, 1960), *Strumigenys louisianae* (Roger, 1863), y *Strumigenys connectens* (Kempf, 1958). En contraste, los fragmentos de guadua contenían un menor número de especies (52) y solo seis especies exclusivas (6): *Linepithema piliferum* (Mayr, 1870), *Myrmicocrypta urichi* (Weber, 1937), *Paratrechina longicornis* (Latreille, 1802), *Cyphomyrmex rimosus* (Spinola, 1851), *Heteroponera inca* (Brown, 1958), y *Odontomachus erythrocephalus* (Emery, 1890).

Especies nativas Vs. exóticas. Se registró un mayor número de especies de hormigas nativas que de exóticas tanto en los fragmentos de bosque ($z: -2,5863$; $p=0,009$) como en los de guadua ($z: -2,5456$; $p=0,01$) (Figura 2). En los fragmentos de bosque la única especie exótica que se registró fue *Tapinoma melanocephalum* (Fabricius, 1793), que también se registró en los fragmentos de guadua junto con *Paratrechina longicornis*.

Diversidad alfa. La cobertura de muestreo fue de 0,983 en los fragmentos de bosque y 0,992 en los de guadua. Los valores estimados y comparados bajo la misma cobertura de muestreo ($\hat{C}_m: 0,983$) sugieren que en cuanto a la riqueza de especies (0D), los fragmentos de bosque son significativamente más ricos que los de guadua (Figura 3), en tanto que no hubo diferencias en el número efectivo de especies igualmente comunes (1D) ni en el de las más abundantes o frecuentes (2D) (Figura 3).

Distribución de abundancias. Las curvas del rango de abundancia muestran que unas pocas especies de hormigas se capturaron con mayor frecuencia en cada tipo de fragmento (Figura 4); sin embargo, en ambos tipos de fragmentos dominó *Solenopsis geminata* (Fabricius, 1804) (Figura 4); en los fragmentos de bosque también dominó *Pheidole* sp. 3, seguida por *Rasopone ferruginea* (Smith, 1858), *Strumigenys gundlachi* (Roger, 1862) y *Pheidole* sp. 5, en tanto que en los fragmentos de guadua dominaron *Pheidole* sp. 4, *S. gundlachi*, *Holcaponera bisulca* (Kempf & Brown, 1968) y *Pheidole* sp. 5 (Figura 4).

Diversidad beta. El índice de diversidad beta fue de 1,08; los fragmentos de bosque y de guadua compartieron cerca del 71 % de las especies, es decir, 46 de las 65 registradas. La ordenación NMDS basada en la composición de especies de hormigas diferenció los dos tipos de fragmentos bajo un stress de 0,15 (Figura 5), sin embargo, la prueba PERMANOVA no encontró diferencias significativas en la composición de especies entre los dos tipos de fragmentos ($df: 9$; $F: 1,51$; $p=0,097$). El reemplazo de especies (β_{sim}) fue el principal componente que determinó la diversidad beta en los dos tipos de fragmentos, con una mayor contribución en los de bosque que en los de guadua (Figura 6).

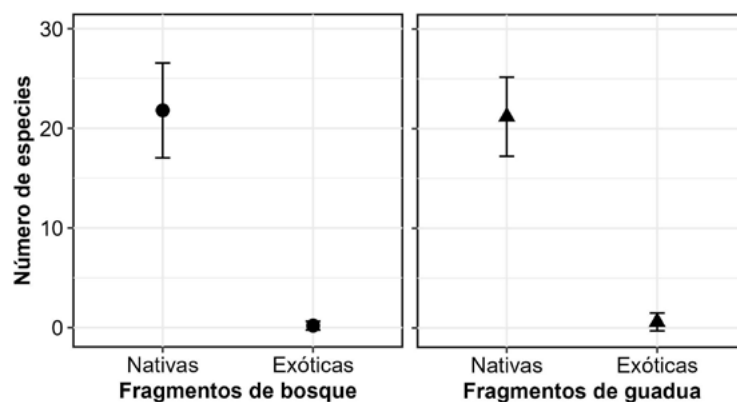


Figura 2. Relación entre el número de especies nativas y exóticas en los fragmentos de bosque y de guadua

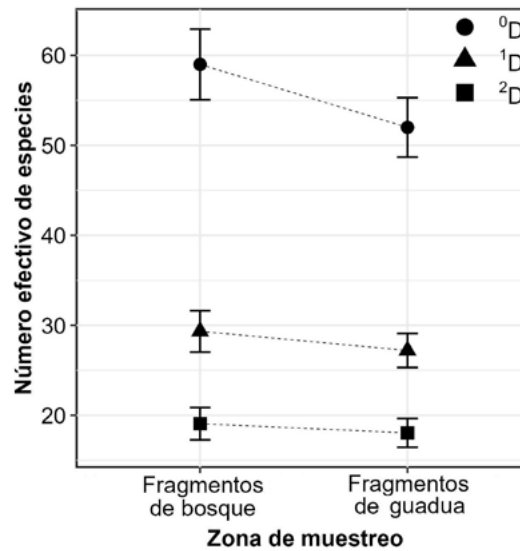


Figura 3. Patrones de expresiones de diversidad (qD) de hormigas en los fragmentos de bosque y de guadua: riqueza de especies (0D), número efectivo de especies igualmente comunes (1D), número efectivo de especies dominantes (2D). La línea vertical indica el IC 95% por qD

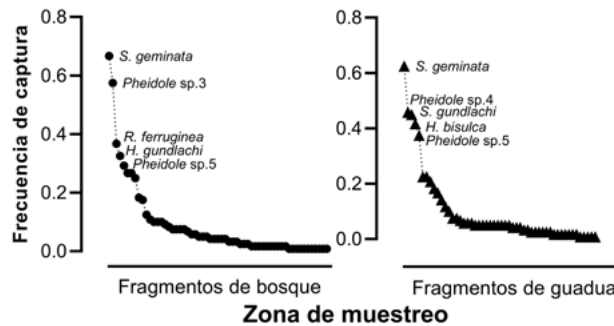


Figura 4. Curvas de abundancia relativa con base en la frecuencia de captura de hormigas para los fragmentos de bosque y de guadua

Grupos funcionales. Se registraron 17 grupos funcionales; el grupo de hormigas omnívoras epigea/hojarasca/hipogea pequeña registró el mayor número de especies (20 spp.), seguido por el de depredadoras dacetinas (10 spp.), el de especies turísticas (5 spp.) y el de depredadoras generalistas hojarasca/hipogea de tamaño medio (5 spp.) (**Figura 7**). El índice de similitud funcional de Sørensen indicó una semejanza del 78 % entre los dos tipos de fragmentos, compartiendo 46 especies en 15 grupos funcionales; en los fragmentos de bosque, el grupo funcional especialistas de suelo depredadoras/forrajeadoras de isópodos fue exclusivo para esta cobertura, en tanto que en los fragmentos de guadua el grupo funcional cultivadoras de hongos inferiores fue exclusivo para este tipo de fragmento, representado por *M. urichi*

Discusión

A pesar de que las áreas verdes en Armenia representan sólo el 30 % del uso del suelo, la riqueza de especies de hormigas registrada equivale a cerca del 6 % de la mirmecofauna del país y aproximadamente el 50 % de la registrada en el departamento del Quindío (**Fernández et al., 2019**), lo que subraya la importancia de estas áreas inmersas en la ciudad como un refugio importante de diversidad. De hecho, recientemente se describió

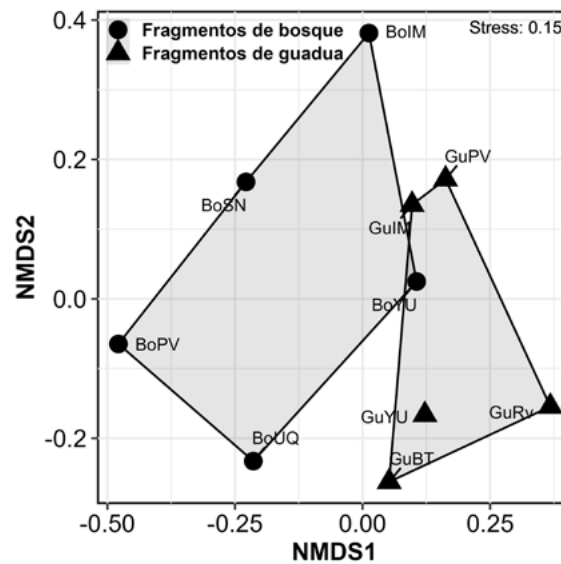


Figura 5. Análisis de escalamiento multidimensional no-métrico (NMDS) de la composición de especies de los fragmentos de bosque y de guadua basado en el índice Bray-Curtis

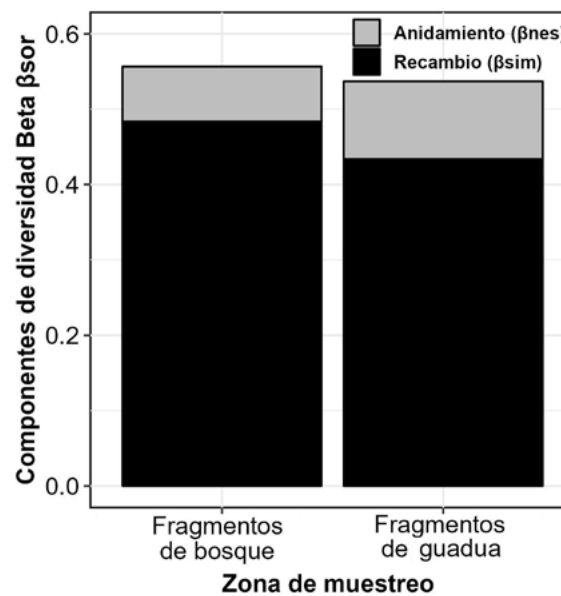


Figura 6. Partición de la diversidad beta (β_{sor}) en sus componentes de recambio espacial (β_{sim}) y anidamiento (β_{nes}) para las comunidades de hormigas de los fragmentos de bosque y de guadua

la nueva especie de hormiga *Rhopalothrix mandibularis* (Guerrero & Grajales-Andica, 2024) en fragmentos de bosque y de guadua (Guerrero *et al.*, 2024), lo cual resalta el valor que tiene la de conservación de estas áreas y su diversidad. Estos hallazgos demuestran que la diversidad en las urbes generalmente se subestima y que las diferentes especies logran encontrar recursos suficientes para su supervivencia después de los procesos de urbanización, por lo que los espacios urbanos pueden contener una biodiversidad significativa (Uno *et al.*, 2010; MacGregor-Fors & Zuria, 2019).

La gran riqueza de Myrmicinae, Ponerinae y Formicinae ha sido un patrón bien documentado en el Neotrópico, ya que son las subfamilias que albergan el más alto número de

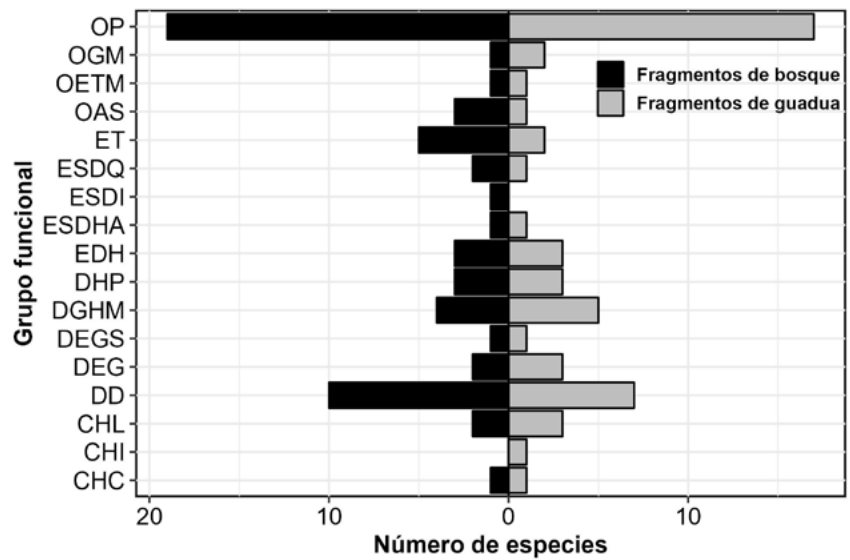


Figura 7. Número de especies y de grupos funcionales de hormigas registrados en los fragmentos de bosque y de guadua urbanos. Grupos funcionales: CHC = cultivadoras de hongos cortadoras de hojas, CHI = cultivadoras de hongos inferiores, CHL = cultivadoras de hongos de levadura, DD = depredadoras dacetinas, DEG = depredadoras generalistas epigeas grandes, DEGS = depredadoras generalistas epigeas grandes y dispersoras de semillas, DGHM = depredadoras generalistas hojarasca/hipogea tamaño medio, DHP = depredadoras generalistas hojarasca/hipogea tamaño pequeño, EDH = especialistas de suelo depredadoras de otras hormigas, ESDHA = especialistas de suelo depredadoras de huevos de artrópodos, ESDI = especialistas de suelo depredadoras/forrajeadoras de isópodos, ESDQ = especialistas de suelo depredadoras de quilópodos, ET = especies turísticas, OAS = omnívoras arbóreas/suelo, OETM = omnívoras epigeas de tamaño grande/medio, OGM = omnívoras hojarasca/hipogea tamaño medio, OP = omnívoras epigeas/hojarasca/hipogea pequeña

géneros y especies de hormigas como *Pheidole*, *Strumigenys*, *Solenopsis*, y *Hypoponera*, entre otros, catalogados como megadiversos y dominantes en hojarasca (Wilkie *et al.*, 2010; Magalhães *et al.*, 2022; Ramos-Ortega & Guerrero, 2023).

Especies nativas Vs. exóticas. El número de especies nativas fue significativamente mayor que el de exóticas en los dos tipos de fragmentos, lo que concuerda con los estudios de comparación entre diferentes tipos de áreas verdes urbanas, los cuales han demostrado que aquellas con una mayor cobertura y diversidad vegetal albergan una importante singularidad de hormigas, especialmente una mayor riqueza de especies nativas en comparación, por ejemplo, con áreas con mayor superficie de concreto (Uno *et al.*, 2010; Reyes-López & Carpintero, 2014; Roncallo *et al.*, 2022). En este estudio las únicas especies exóticas registradas fueron *T. melanocephalum* y *P. longicornis*; a pesar de la poca frecuencia de captura, estas se consideran muy problemáticas a nivel global dada su gran tolerancia y preferencia por áreas con intervención humana (Pagad *et al.*, 2015; Bertelsmeier *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2019).

Estas especies ya han sido reportadas en áreas verdes urbanas de Colombia, por ejemplo, Roncallo *et al.* (2022), al evaluar las especies exóticas en entornos urbanos de la ciudad de Santa Marta, las registraron en conjunto con *Cardiocondyla emery* (Forel, 1881), *Monomorium pharaonis* (Linnaeus, 1758), *Pheidole indica* (Mayr, 1879), *Tetramorium lanuginosum* (Mayr, 1870), *T. simillimum* (Smith, 1851) y *Trichomyrmex destructor* (Jerdon, 1851). Cabe destacar, sin embargo, que estos autores utilizaron cebos de proteína y carbohidrato para atraer las hormigas. Por otro lado, en contraste con las especies exóticas registradas en el presente estudio, Forero-Chávez *et al.* (2024) solamente registraron *Monomorium floricola* (Jerdon, 1851) y *Strumigenys rogeri* (Emery, 1890) como especies exóticas en las áreas verdes de la ciudad de Cali.

Diversidad alfa. El estudio de áreas previamente inexploradas, por ejemplo, las áreas verdes urbanas, y el uso de técnicas de muestreo (extractores Winkler) que cubren microhábitats heterogéneos como la hojarasca (Delabie *et al.*, 2021), permitió una cobertura de muestreo alta y representativa en ambos tipos de fragmentos (>98 %), comparable con la de estudios previos en áreas verdes urbanas de Colombia (Ramos-Ortega & Guerrero, 2023; Forero-Chávez *et al.*, 2024); sin embargo, se sugiere la implementación de métodos complementarios como las búsquedas manuales o atrayentes, los cuales han sido efectivos en entornos urbanos debido a que algunas especies de hormigas no se distribuyen homogéneamente en el tiempo y el espacio (Brassard *et al.*, 2021); además, el uso de una sola técnica de muestreo en zonas tropicales resulta poco adecuado, en especial para una familia tan diversa como las hormigas (Baena *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2019).

La comparación de la diversidad alfa entre los fragmentos en una misma cobertura de muestreo permitió encontrar diferencias en $^{\circ}D$, es decir, en la riqueza de especies, siendo mayor la de los fragmentos de bosque que la de los de guadua. Este mismo patrón se ha registrado en hormigas de bosque seco (Chacón de Ulloa *et al.*, 2012) e, incluso, en otros grupos taxonómicos como los quirópteros (Pérez-Torres *et al.*, 2009), los anfibios (Corral-Gómez, 2013) y las plantas (Ramírez-Díaz & Camargo-García, 2019). Esta diferencia se debe a que los fragmentos de bosque ofrecen una mayor cantidad de recursos (de anidación, refugio, alimento, sitios de forrajeo); una mayor cobertura y diversidad vegetal, y temperaturas y humedades más estables (lo que suple los requerimientos ecológicos de las especies de hormigas y reduce la competencia), en comparación con los fragmentos de guadua, los cuales suelen ser estructuralmente homogéneos debido al alto dominio de *G. angustifolia* (Cortés-Delgado & Pérez-Torres, 2011; Calle & Holl, 2019).

Este mismo patrón se ha encontrado en estudios que han constatado que los fragmentos urbanos de bosque contienen mayor riqueza de hormigas que otros tipos de hábitats, por ejemplo, jardines, lotes baldíos, parques, y áreas pavimentadas (Santos, 2016). De hecho, los fragmentos de bosque inmersos en las matrices urbanas pueden llegar a tener una diversidad semejante o mayor que los bosques de las zonas rurales de las ciudades (Ramos-Ortega & Guerrero, 2023; Forero-Chávez *et al.*, 2024). En este sentido, el nuestro constituye uno de los primeros estudios en Colombia que evalúa y compara la diversidad de hormigas en diferentes áreas verdes inmersas en una ciudad, registrando una riqueza que dista de la de otras zonas urbanizadas del país, por ejemplo, los bosques secos urbanos de Santa Marta (Ramos-Ortega & Guerrero, 2023) y Cali (Forero-Chávez *et al.*, 2024), donde se reportaron 97 y 109 especies de hormigas, respectivamente.

Distribución de abundancias. La distribución de las especies según sus frecuencias de captura fue bastante similar entre coberturas: la mayoría de las especies que dominaron en los fragmentos de bosques también lo hicieron en los de guadua; *S. geminata*, altamente dominante tanto en áreas naturales como en diferentes gradientes de perturbación, fue la especie más abundante en ambas coberturas (García-Martínez *et al.*, 2015; Baena *et al.*, 2020). Esta especie se ha asociado con el aumento de las modificaciones de los hábitats naturales y se ha usado como un indicador de sitios alterados (Achury & Suárez, 2018; Risch & Carroll, 1982). Así mismo, presenta un gran dominio en áreas naturales debido a que es una especie omnívora generalista y oportunista; se la conoce, además, por su comportamiento agresivo y de gran competencia, por lo que podría desplazar a otras especies y tener un impacto negativo en la diversidad de estas áreas verdes (Perfecto, 1991; Baena *et al.*, 2020).

Diversidad beta y grupos funcionales. Los resultados de este estudio sugieren que los fragmentos de bosque y de guadua presentan gran similitud en términos de composición de especies y de grupos funcionales, lo que se explicaría por las numerosas áreas verdes que hay en Armenia, las cuales se conectarían entre sí formando corredores biológicos, o con las zonas rurales de la ciudad, debido a las distancias relativamente cortas entre

ellas (Carvajal-Castro *et al.*, 2019). Este rasgo facilita y promueve el intercambio de especies de hormigas, por lo que la similitud encontrada podría deberse más a la distancia relativamente corta entre los fragmentos que a las características propias de cada tipo de cobertura. Esta hipótesis también ha sido propuesta por Forero-Chávez *et al.* (2024) en Cali, en donde las áreas verdes de las zonas urbanas están estrechamente relacionadas entre sí en términos de la composición de especies de hormigas, lo que se explica por la proximidad geográfica entre las áreas verdes y por la capacidad de ciertas especies de moverse a través de la matriz urbana.

Por otro lado, la gran similitud encontrada entre los dos tipos de fragmentos se debería también a la dominancia de la especie *G. angustifolia* en los fragmentos de guadua. Esta especie ha logrado expandirse por ser altamente competitiva, llegando a proliferar y dominar el dosel al invadir, desplazar y homogenizar la vegetación forestal original (Cortés-Delgado & Pérez-Torres, 2011; Larpkern *et al.*, 2011; Calle & Holl, 2019). Por ello, el aporte de diversidad de los fragmentos de guadua depende de la matriz a la cual estén asociados (Pérez-Torres *et al.*, 2009; Cortés-Delgado & Pérez-Torres, 2011); en el caso de las áreas verdes urbanas de Armenia está asociada a los fragmentos de bosque.

Ahora bien, los fragmentos de bosque presentaron siete especies más que los de guadua, además de un mayor número de especies exclusivas, como las depredadoras crípticas especializadas (*A. ocellatus*, *S. connectens*, *S. louisianae*, *F. orizabana* y *L. quadrata*) (Lattke, 2011; Ward & Fisher, 2016), así como otras especies que suelen forrajear en árboles y que, eventualmente, son capturadas en la hojarasca (*C. simillimus*, *C. sphenoidalis*, *M. zeledoni*, *Cephalotes* sp.1, *Pseudomyrmex* sp.1) (Longino, 2006; Mackay & Mackay, 2019). Por el contrario, a pesar de que los fragmentos de guadua también presentaron especies únicas como *L. piliferum*, *P. longicornis*, y *O. erythrocephalus*, estas son comunes y su distribución es amplia, suelen ser generalistas y logran habitar en ambientes con diferentes grados de perturbación (Bertelsmeier *et al.*, 2017; Escarraga & Guerrero, 2016).

Por último, aunque los dos tipos de fragmentos compartieron un elevado número de grupos funcionales, se resalta el valor de los fragmentos de bosque, ya que presentaron una mayor proporción de especies en grupos como los de las omnívoras arbóreas y las depredadoras especialistas, en tanto que en los fragmentos de guadua hubo una mayor proporción de omnívoras de suelo y depredadoras generalistas, lo que sugiere que los fragmentos de bosque proporcionan más recursos para el establecimiento de especies con comportamientos especializados y especificidad de recursos (Ramos-Ortega & Guerrero, 2023).

Conclusiones

Los resultados de este estudio sugieren que las áreas verdes urbanas que aún persisten en la ciudad de Armenia albergan una gran diversidad y riqueza de especies de hormigas, especialmente de nativas, lo cual es relevante en una ciudad con un alto índice de urbanización. Aunque los fragmentos de bosque tuvieron una mayor riqueza de especies que los de guadua, ambos presentaron una gran similitud tanto en términos de composición de especies como de grupos funcionales, lo que sugiere una equivalencia ecológica entre ambas coberturas; sin embargo, se resalta el valor ecológico de conservación de los fragmentos de bosque por la singularidad de sus especies, y la presión a la que están sometidos por la expansión y homogenización de *G. angustifolia* y la urbanización.

Por ello, a pesar de que las áreas verdes urbanas están expuestas a presiones ambientales, sociales y económicas, es prioritario mantener los esfuerzos materializados en estrategias de conservación y restauración de los fragmentos que aún persisten. Este tipo de iniciativas y acciones requieren de políticas públicas de desarrollo urbano que mejoren las prácticas de gestión en estas áreas. Este estudio aporta información importante sobre la diversidad en zonas urbanas y el valor de las áreas verdes en las ciudades. Con base en dicha información, sugerimos intensificar la investigación que nos ayude a entender los procesos y patrones que afectan la biodiversidad en los paisajes urbanos.

Agradecimientos

Agradecemos de forma especial a la Universidad del Quindío, entidad que financió parcialmente este estudio a través del proyecto de investigación N° 1000, “Ecociudad: Fragmentos boscosos urbanos como territorios de interacción ecosistema-cultura para la conservación”.

Contribución de los autores

AFGA & DRGC participaron por igual en la contextualización, diseño metodológico, recolección de datos, identificación taxonómica, análisis de datos y redacción del manuscrito; los autores revisaron, corrigieron y aceptaron la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Achury, R., Suárez, A. V.** (2018). Richness and composition of ground-dwelling ants in tropical rainforest and surrounding landscapes in the Colombian inter-Andean valley. *Neotropical Entomology*, 47(6), 731-741.
- AntWeb** Version 8.75.3. (2021). California Academy of Science. (recuperado: enero 10, 2021, HYPERLINK "<http://www.antweb.org>"www.antweb.org).
- AntWiki.** (2021, 10 de enero). The Ants Online. www.antwiki.org.
- Baena, M. L., Escobar, F., Valenzuela, J. E.** (2020). Diversity snapshot of green–gray space ants in two Mexican cities. *International Journal of Tropical Insect Science*, 40(2), 239-250.
- Baselga, A.** (2017). Partitioning abundance-based multiple-site dissimilarity into components: balanced variation in abundance and abundance gradients. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(7), 799-808.
- Baselga, A., Orme, D., Villéger, S., De Bortoli, J., Leprieur, F., Logez, M.** (2018). betapart: Partitioning beta diversity into turnover and nestedness components. *R package version*, 1 (1).
- Bertelsmeier, C., Ollier, S., Liebhold, A., Keller, L.** (2017). Recent human history governs global ant invasion dynamics. *Nature Ecology & Evolution*, 1(7), 1-8.
- Brandão, C. R., Silva, R. R., Delabie, J. H.** (2012). Neotropical ants (Hymenoptera) functional groups: nutritional and applied implications. In: A. R. Panizzi & J. R. P. Parra. (Eds), *Insect bioecology and nutrition for integrated pest management* (213-236). CRC Press.
- Brassard, F., Leong, C. M., Chan, H. H., Guénard, B.** (2021). High diversity in urban areas: How comprehensive sampling reveals high ant species richness within one of the most urbanized regions of the world. *Diversity*, 13(8), 358.
- Calle, A., Holl, K. D.** (2019). Riparian forest recovery following a decade of cattle exclusion in the Colombian Andes. *Forest Ecology and Management*, 452, 117563.
- Carvajal-Castro, J. D., Ospina-L, A. M., Toro-López, Y., Pulido-G, A., Cabrera-Casas, L. X., Guerrero-Peláez, S., Vargas-Salinas, F.** (2019). Birds vs bricks: Patterns of species diversity in response to urbanization in a Neotropical Andean city. *PloS One*, 14(6), e0218775.
- Chacón de Ulloa, P., Osorio-García, A. M., Achury, R., Bermúdez-Rivas, C.** (2012). Hormigas (Hymenoptera: Formicidae) del bosque seco tropical (Bs-T) de la cuenca alta del río Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*, 13(2), 165-181.
- Chao, A., Jost, L.** (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93(12), 2533-2547.
- Chao, A., Kubota, Y., Zelený, D., Chiu, C. H., Li, C. F., Kusumoto, B., Colwell, R. K.** (2020). Quantifying sample completeness and comparing diversities among assemblages. *Ecological Research*, 35(2), 292-314.
- Colwell, R. K., Chao, A., Gotelli, N. J., Lin, S. Y., Mao, C. X., Chazdon, R. L., Longino, J. T.** (2012). Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. *Journal of Plant Ecology*, 5(1), 3-21.
- Corral-Gómez, J. N.** (2013). *Diversidad funcional y redes tróficas de anfibios que habitan bosques y sistemas productivos en el eje cafetero colombiano*. (Tesis Biología). Pontificia Universidad Javeriana.
- Cortés-Delgado, N., Pérez-Torres, J.** (2011). Habitat edge context and the distribution of phyllostomid bats in the Andean forest and anthropogenic matrix in the Central Andes of Colombia. *Biodiversity and Conservation*, 20(5), 987-999.

- Dáttilo, W., MacGregor-Fors, I.** (2021). Ant social foraging strategies along a Neotropical gradient of urbanization. *Scientific Reports*, 11(1), 1-9.
- Deák, B., Hüse, B., Tóthmérész, B.** (2016). Grassland vegetation in urban habitats—testing ecological theories. *Tuexenia*, 36, 379-393.
- Delabie, J., Koch, E., Dodonov, P., Caitano, B., DaRocha, W., Jahyny, B., Leponce, M., Majer, J., Mariano, C.** (2021). Sampling and analysis methods for ant diversity assessment. En: J. C. Santos & G. W. Fernandez (Ed.), *Measuring arthropod biodiversity: A handbook of sampling methods* (13-54). Springer.
- Escarraga, M., Guerrero, R. J.** (2016). The ant genus *Linepithema* (Formicidae: Dolichoderinae) in Colombia. *Zootaxa*, 4208(5), 446-458.
- Faeth, S. H., Bang, C., Saari, S.** (2011). Urban biodiversity: patterns and mechanisms. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1223(1), 69-81.
- Fenoglio, M. S., Rossetti, M. R., Videla, M.** (2020). Negative effects of urbanization on terrestrial arthropod communities: A meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 29(8), 1412-1429.
- Fernández, F., Guerrero, R. J., Delsinne T.** (2019). Hormigas de Colombia. En: F. Fernández, R. J. Guerrero & T. Delsinne. (Ed.), *Hormigas de Colombia* (31-56). Universidad Nacional de Colombia.
- Forero-Chávez, N., Arenas-Clavijo, A., Armbrecht, I., Montoya-Lerma, J.** (2024). Urban patches of dry forest as refuges for ants and carabid beetles in a Neotropical overcrowded city. *Urban Ecosystems*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01504-y>
- García-Martínez, M. Á., Martínez-Tlapa, D. L., Pérez-Toledo, G. R., Quiroz-Robledo, L. N., Castaño-Meneses, G., Laborde, J., Valenzuela-González, J. E.** (2015). Taxonomic, species and functional group diversity of ants in a tropical anthropogenic landscape. *Tropical Conservation Science*, 8(4), 1017-1032.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J. M.** (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756-760.
- Groc, S., Delabie, J. H., Fernández, F., Leponce, M., Orivel, J., Silvestre, R., Dejean, A.** (2014). Leaf-litter ant communities (Hymenoptera: Formicidae) in a pristine Guianese rainforest: stable functional structure versus high species turnover. *Myrmecological News*, 19, 43-51.
- Guénard, B., Cardinal-De Casas, A., Dunn, R. R.** (2015). High diversity in an urban habitat: are some animal assemblages resilient to long-term anthropogenic change? *Urban Ecosystems*, 18, 449-463.
- Guerrero, R. J., Grajales-Andica, A. F., Fernández, F., Tocora, M. C., Fiorentino, G., García, D. R.** (2024). The ants of the genus *Rhopalothrix* Mayr, 1870 (Hymenoptera, Formicidae, Myrmicinae) in Colombia. *ZooKeys*, 1191, 129-150.
- Hill, M. O.** (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54 (2), 427-432.
- Hsieh, T. C., Ma, K. H., Chao, A.** (2016). iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*, 7 (12), 1451-1456.
- IDEAM.** (2014). Subdirección de Estudios Ambientales. www.ideam.gov.co.
- Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113 (2), 363-375.
- Jost, L.** (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*, 88 (10), 2427-2439.
- Kalnay, E., Cai, M.** (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 423 (6939), 528-531.
- Koch, D. A., Santos, J. R., Nascimento, I. C., Delabie, J. H. C.** (2019). Comparative evaluation of taxonomic and functional diversities of leaf-litter ants of the Brazilian Atlantic Forest. *Turkish Journal of Zoology*, 43(5), 437-546.
- Larppern, P., Moe, S. R., Totland, Ø.** (2011). Bamboo dominance reduces tree regeneration in a disturbed tropical forest. *Oecologia*, 165(1), 161-168.
- Lattke, J. E.** (2011). Revision of the New World species of the genus *Leptogenys* Roger (Insecta: Hymenoptera: Formicidae: Ponerinae). *Arthropod Systematics and Phylogeny*, 69(3), 127-264.
- Lepczyk, C. A., Aronson, M. F., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., MacIvor, J. S.** (2017). Biodiversity in the city: fundamental questions for understanding the ecology of urban green spaces for biodiversity conservation. *BioScience*, 67(9), 799-807.
- Longino, J. T.** (2006). A taxonomic review of the genus *Myrmelachista* (Hymenoptera: Formicidae) in Costa Rica. *Zootaxa*, 1141(1), 1-54.

- Luck G. W., Smallbone, L. T.** (2010). Species diversity and urbanisation: patterns, drivers, and implications. In: K. Gaston. (Ed), *Urban Ecology* (88-119). Cambridge University Press.
- MacGregor-Fors, I., Ortega-Álvarez, R.** (Eds). (2013). *Ecología urbana: experiencias en América Latina*. Inecol.
- MacGregor-Fors, I., Zuria, I.** (2019). Ciudades vivas: Biodiversidad en ambientes urbanos. En: C. E. Moreno. (Eds), *La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio* (113-127). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/ Libermex.
- Mackay, W. P., Mackay, E.** (2019). Género *Camponotus*. En: F. Fernández, R. J. Guerrero & T. Delsinne. (Ed.), *Hormigas de Colombia* (743-789). Universidad Nacional de Colombia.
- Magalhães, F. S., Campana, D. R. D. S., Freitas, G. D. S., Abonizio-Santos, M. R., Prado, L. P. D., Morini, M. S. D. C.** (2022). Natural regeneration in Atlantic forest fragments: using ants (Hymenoptera: Formicidae) for monitoring a conservation unit. *Papéis Avulsos de Zoologia*, 62, 1-11.
- Magurran, A. E.** (2005). Species abundance distributions: pattern or process? *Functional Ecology*, 19(1), 177-181.
- Marín-Gómez, O. H.** (2022). Artificial light at night drives earlier singing in a Neotropical bird. *Animals*, 12(8), 1015.
- McKinney, M. L.** (2002). Urbanization, biodiversity, and conservation. The impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems. *Bioscience*, 52(10), 883-890.
- Méndez-Rojas, D. M., López-García, M. M., García-Cárdenas, D. R., Cultid-Medina, C. A.** (2022). Rove beetle diversity and coffee agroecosystems in the Colombian Andes. *Biotropica*, 54(2), 381-391.
- Oksanen, J., Kindt, R., Legendre, P., O'Hara, B., Stevens, M. H. H., Oksanen, M. J., Suggests, M. A. S. S.** (2007). The vegan package. *Community Ecology Package*, 10(719), 631-637.
- Orozco, A., Quiñones, J., Suárez R., García, G., Herrera, J., Ramírez, D.** (2023). Árboles, arbustos y palmas en la ciudad de Armenia: Capital Verde. Alcaldía de Armenia.
- Pagad, S., Genovesi, P., Carnevali, L., Scalera, R., Clout, M.** (2015). IUCN SSC invasive species specialist group: invasive alien species information management supporting practitioners, policy makers and decision takers. *Management of Biological Invasions*, 6(2), 127-135.
- Pérez-Torres, J., Sánchez-Lalinde, C., Cortés-Delgado, N.** (2009). Murciélagos asociados a sistemas naturales y transformados en la ecorregión del eje cafetero. En: J. M. Rodríguez, J. C. Camargo, J. Niño, A. M. Pineda, L. M. Arias, M. A. Echeverry & C. L. Miranda. (Eds), *Valoración de la biodiversidad en la Ecorregión del Eje Cafetero* (157-167). Ciebreg.
- Perfecto, I.** (1991). Dynamics of *Solenopsis geminata* in a tropical fallow field after ploughing. *Oikos*, 62(2), 139-144.
- Ramírez-Díaz, F., Camargo-García, J. C.** (2019). Floristic structure and composition of Guadua forests in the Colombian coffee region. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 49, e55425.
- Ramos-Ortega, L. M., Guerrero, R. J.** (2023). Spatial turnover and functional redundancy in the ants of urban fragments of tropical dry forest. *Diversity*, 15(7), 880.
- Reyes-López, J., Carpintero, S.** (2014). Comparison of the exotic and native ant communities (Hymenoptera: Formicidae) in urban green areas at inland, coastal and insular sites in Spain. *European Journal of Entomology*, 111(3), 421.
- Risch, S. J., Carroll, C. R.** (1982). Effect of a keystone predaceous ant, *Solenopsis geminata*, on arthropods in a tropical agroecosystem. *Ecology*, 63(6), 1979-1983.
- Roncillo, J., Ortega, L. M. R., Guerrero, R. J., Sierra, H.** (2022). Las hormigas exóticas en ambientes urbanos de Santa Marta, Colombia. *Intropica: Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*, 17(2), 202-217.
- RStudio Team.** (2022). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, PBC.
- Salazar-Montoya, A., Nieto-Cárdenas, O. A.** (2005). *Diseño de corredores de conservación en las microcuencas y áreas protegidas urbanas del municipio de Armenia, Quindío, Colombia*. Fundación Semillas de Vida.
- Santos, M. N.** (2016). Research on urban ants: approaches and gaps. *Insectes Sociaux*, 63(3), 359-371.
- Santos, M. N., Delabie, J. H., Queiroz, J. M.** (2019). Biodiversity conservation in urban parks: a study of ground-dwelling ants (Hymenoptera: Formicidae) in Rio de Janeiro city. *Urban Ecosystems*, 22(5), 927-942.

-
- Silvestre, R.** (2000). *Estructura de comunidades de formigas do Cerrado* (Tesis Doctoral). Universidad de São Paulo.
- Uno, S., Cotton, J., Philpott, S. M.** (2010). Diversity, abundance, and species composition of ants in urban green spaces. *Urban Ecosystems*, 13(4), 425-441.
- Vanegas-Guerrero, J., Fernández, C. A., Buitrago-González, W. E., Vargas-Salinas, F.** (2016). Urban remnant forests: Are they important for herpetofaunal conservation in the Central Andes of Colombia. *Herpetological Review*, 47(2), 180-185.
- Walter, B., Graclik, A., Tryjanowski, P., Wasielewski, O.** (2018). Ants response to human-induced disturbance in a rain tropical forest. *Neotropical Entomology*, 47(6), 757-762.
- Ward, P. S., Fisher, B. L.** (2016). Tales of dracula ants: the evolutionary history of the ant subfamily Amblyoponinae (Hymenoptera: Formicidae). *Systematic Entomology*, 41(3), 683-693.
- Wilkie, K. T., Mertl, A. L., Traniello, J. F.** (2010). Species diversity and distribution patterns of the ants of Amazonian Ecuador. *Plos One*, 5(10), e13146.

Artículo original

Una nueva especie de *Souroubea* (Marcgraviaceae, Ericales) de Colombia

A new species of *Souroubea* (Marcgraviaceae, Ericales) from Colombia

Diego Giraldo-Cañas^{1,*}, Edwin Trujillo-Trujillo², Carlos Parra-O¹

¹Herbario Nacional Colombiano (COL), Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

²Laboratorio de Agrobiodiversidad y Malherbología (LAMUA), Grupo de Investigación en Agroecosistemas y Conservación en Bosques Amazónicos (GAIA), Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia

Resumen

Se describe e ilustra una nueva especie de *Souroubea* Aubl. de Colombia, la cual se reconoce fácilmente por sus nectarios reproductivos pedicelares blancos y por sus glándulas laminales conspicuas en ambas caras de las hojas. La nueva especie se conoce únicamente en una pequeña área andina de la vertiente amazónica del departamento de Caquetá. De acuerdo con los lineamientos de la UICN, la nueva especie se categoriza como “en peligro crítico” (CR).

Palabras clave: Flora andina; Flora de Colombia; Plantas neotropicales; *Ruyschia*.

Abstract

A new *Souroubea* Aubl. species from Colombia is described and illustrated. The species is easily recognizable by its white pedicellar reproductive nectaries and perceptible laminal glands on both sides of the leaves. Only known from a small area in the Andean region of the Caquetá Department (Amazon slope), it is categorized as “critically endangered” (CR) according to the UICN criteria.

Keywords: Andean Flora, Colombian Flora, Neotropical plants, *Ruyschia*.

Introducción

La familia Marcgraviaceae Bercht. & J. Presl se distribuye en el Neotrópico y consta de ocho géneros (Giraldo-Cañas, 2018). Su distribución más septentrional la constituyen los estados de Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Puebla, Tabasco y Veracruz en México, y la más austral corresponde a los estados de Paraná, Rio Grande do Sul y Santa Catarina en Brasil (Giraldo-Cañas, 2018). Los miembros de esta familia incluyen las lianas epífitas o terrestres y los arbustos epífitos y hemiepífitos, los cuales generalmente están restringidos a los bosques húmedos a pluviales entre el nivel del mar y los 3.000 m de altitud (Giraldo-Cañas, 2018). *Souroubea* Aubl. es uno de sus géneros, del cual se conocían 20 especies. El género se distribuye desde el centro-sur de México hasta Suramérica (Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guyana, Perú y Venezuela) (Giraldo-Cañas, 2018). *Souroubea* se caracteriza por poseer hojas espiraladas, inflorescencias largamente racemosas, nectarios reproductivos pedicelares de colores llamativos (usualmente amarillos, rojos, rosados u anaranjados) que se ubican en la base de la flor (muy próximos al cáliz y generalmente con dos apéndices auriculares), flores pentámeras (muy raramente de 3–6-meras), ovario 3–5-locular, así como un número reducido de estambres (3 o 5 por flor) (Giraldo-Cañas, 2011a, 2018). Aquí se presenta la descripción de una nueva especie de *Souroubea* de Colombia, con lo cual se sigue aportando al esclarecimiento taxonómico de las Marcgraviaceae (Giraldo-Cañas, 2011a, 2011b, 2018, 2023).

Citación: Giraldo-Cañas D, Trujillo-Trujillo E, Parra-O C. Una nueva especie de *Souroubea* (Marcgraviaceae, Ericales) de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):298-306, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.2243>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

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

Recibido: 14 de noviembre de 2023

Aceptado: 23 de abril de 2024

Publicado en línea: 29 de abril de 2024



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

Materiales y métodos

Para el análisis morfológico y la descripción de la especie aquí descrita se utilizaron los métodos convencionales de la taxonomía y la sistemática biológicas (Lawrence, 1962; Sosef *et al.*, 2021). Se hicieron varias expediciones de campo a diferentes formaciones boscosas del departamento de Caquetá (Amazonia colombiana) entre el 2021 y el 2023. Se siguió el concepto morfológico de especie, con base en los postulados expuestos en McDade (1995), Wiens & Servedio (2000) y Sosef *et al.* (2021). Se revisó la literatura concerniente al género *Souroubea*, haciendo énfasis en las descripciones, las ilustraciones y los protólogos de todos los binomios relacionados con este género, así como el análisis de numerosos materiales tipo (herbarios COAH, COL, CR, F, HOXA, HUT, KEW, LPB, MEXU, MO, MOL, NY, QAP, QCA, QCNE, RB, US, USM, VEN). La categoría de riesgo de extinción para la nueva especie se determinó con base en los lineamientos de la UICN (2012). No obstante, los atributos de extensión de presencia (EOO) y área de ocupación (AOO), no se pudieron calcular, ya que se necesitan como mínimo tres puntos de muestreo y sólo se conocen dos de esta nueva especie. Los acrónimos de los herbarios siguen los propuestos por Thiers (2023). La terminología morfológica aplicada a las Marcgraviaceae se basó en De Roon (1969) y en Giraldo-Cañas (2011a, 2018); en este sentido es necesario subrayar que los nectarios reproductivos son pedicelares y, por lo tanto, se los denomina nectarios reproductivos pedicelares, aunque en el género *Souroubea* éstos están ubicados en la porción distal de los pedicelos, muy próximos a la base de la flor. La definición de hemiepifitismo se basa en Zotz *et al.* (2021).

Resultados y discusión

Souroubea caquetensis Gir.-Cañas, Edwin Trujillo & C. Parra-O., sp. nov. (Figuras 1–3). **TIPO:** Colombia. **Caquetá:** Municipio de El Doncello, vereda San Pedro, camino hacia la cascada de Anayacito, 943 m, 1°41'1,93" N–75°19'7,73" O, 15 de enero, 2021 (fl), E. Trujillo-T., O. Perdomo, A. Lizcano & S. Rojas 7269 (holotipo: COL; isotipos: COAH, COL, LAMUA).

Diagnosis. *Frutex scandens, hemiepiphyticus, profosius ramosus, glaber. Folia obovata, oblonga vel lanceolata, coriacea, apice obtusa, costa prominente, nervis lateralibus conspicuis, glandulis hypophyllis seriatis 10–28 poriformibus. Racemi elongati, 8–19 cm longi, multiflori; pedicelli 0.9–1.5 cm longi. Nectaria sub calyce exoriens, calcariformia, auriculata, alba, calcari 7–9 mm longo, auriculis 3.2–4.2 mm longis, 1.5–1.9 mm latis; bracteolis orbicularibus vel rarissime apiculatis, sepaloideis, 1.1–1.3 × 1.1–1.2 mm; sepala 5, orbicularia, 1.4–1.6 × 1.1–1.5 mm; petala 5, oblonga, proxime connata (1.0–1.2 mm e basi), 3.0–3.3 × 1.8–2.0 mm, ad anthesin reflexa, albida ver viridis levissime, carnosa, venis conspicuis, nervis debiliter reticulatis; stamina 5, filamento planis, deltoideum, filamentorum pars proximalis basin corollae adnatae, antherae oblongae, ad stigmata directa; ovario 5-loculari, conico-piriformi; stigma mammiforme, sessile, crassum, inconspicue radiatum, glabrum. Fructus globosus, leviter apiculata; dehiscentia irregularia; seminibus numerosis, semilunaribus vel reniformibus, conspicue reticulatis, nitidis.* *Souroubea caquetensis* phenotypice similis est *Souroubea intermedia* de Roon et *Souroubea venosa* Schery, cuius maxime distinguitur ab *albis pedicellis generationis nectariis*.

Descripción. Arbustos hemiepifitos, vigorosos, profusamente ramificados, escandentes, de hasta 10 m de alto; tallos glabros, lenticelados, castaños oscuros. Hojas espiraladas, pecíolos (0,4) 0,6–1,1 (1,3) cm de longitud; láminas (4,0) 6,0–10,5 (12,5) × (2,0) 3,0–4,8 (6,0) cm, obovadas, oblongas o lanceoladas, coriáceas, glabras, verde oscuras y ligeramente brillantes en el haz, verde claras y opacas en el envés, base cuneada ligeramente asimétrica, ápice obtuso-redondeado, venación conspicuamente impresa y reticulada en ambas caras, vena media plana a ligeramente elevada en el haz y conspicuamente elevada en el envés, ésta de color verde muy claro; láminas con 5–14 pares de glándulas elipsoides o menos frecuentemente circulares, de 0,7–0,8 mm de longitud o de diámetro, crateriformes,



Figura 1. Holotipo de *Souroubea caquetensis* Gir.-Cañas, Edwin Trujillo & C. Parra-O. [E. Trujillo-T. et al. 7269 (COL)]

cobrizas, poricidas (el poro circular de 0,01–0,02 mm de diámetro); las glándulas, aunque sólo se disponen en la cara abaxial, son perceptibles en ambas caras, las distales marginales a submarginales, las medias y las proximales ubicadas a 3–7 mm del margen. Inflorescencias terminales, en racimos, densas, (90) 130–160 flores por racimo, generalmente con maduración acrópeta, (8) de 10–18 (19) cm de longitud, raquis longitudinalmente estriado-surcado, cobrizo, pubérulo (los tricomas hialinos, brillantes, numerosos, ca. 0,05 mm de longitud). Nectarios reproductivos pedicelares calcariformes, blancos, originados a 0,2–0,3 mm de las bractéolas; urna de 7,0–9,0 × 0,7–0,8 mm, con la base clavada; boca de las urnas circular, de 0,5–0,9 mm de diámetro; aurículas (2), opuestas, planas, ligeramente curvadas, de 3,2–4,2 × 1,5–1,9 mm. Flores pentámeras, pedicelos (9) de 10–12 (15) × 0,7–0,8 mm, ligeramente curvos a más comúnmente rectos, verdes claros, pubérulos (los tricomas similares a los del raquis), ensanchados justo en el punto de unión al raquis; bractéolas 2, opuestas, libres, sosteniendo el cáliz, orbiculares, muy raramente apiculadas, sepaloideas, de 11–13 × 1,1–1,2 mm; cáliz dialisépalo, sépalos 5, orbiculares, leñosos, papilosos, castaño oscuros, de 1,4–1,6 × 1,1–1,5 mm; corola inconspicuamente gamopétala, pétalos 5, proximalmente connatos (1,0–1,2 mm de su longitud), oblongos, de 3,0–3,3 × 1,8–2,0 mm, reflexos en la antesis, blanquecinos a verde muy claros, carnosos, venación adaxial



Figura 2. *Souroubea caquetensis* Gir.-Cañas, Edwin Trujillo & C. Parra-O. **A, D y F.** Inflorescencia (nótese en **F** algunas glándulas laminales en las hojas) [*E. Trujillo-T. et al.* 7269 (COAH, COL, LAMUA)]; **B, C y E.** Infrutescencias [*E. Trujillo-T. et al.* 8207 (COAH, COL, LAMUA)].

conspicua y débilmente reticulada, venación abaxial hifódroma; androceo 5 estambres, filamentos próximos entre sí y con su porción proximal adnata a la base de la corola, planos, largamente deltoides, amarillentos, carnosos, de 2,0–2,5 mm de longitud, porción proximal de los filamentos de 1,0–1,1 mm de ancho, porción media de 0,6–0,7 mm de ancho, porción distal de 0,5–0,6 mm de ancho; anteras oblongas, de 0,7–0,9 × 0,5–0,6 mm, carnosas, castaño claras; ovario 5-locular, cónico-piriforme, verde en fresco, negruzco al secarse, opaco, ligeramente estriado longitudinalmente cuando está seco, liso cuando está fresco, de 2,0–2,1 × 1,2–1,5 mm; estigma mamiforme, sésil, craso, inconspicuamente radiado, liso, de 0,6–0,7 mm de diámetro. Frutos globosos, dehiscencia irregular, ligeramente apiculados, verde oscuros y brillantes cuando están vivos, marrón oscuros y opacos cuando están secos, de 6–8 × 6–8 mm; número de frutos por infrutescencia (28) 44–70 (84); semillas numerosas, semilunares a reniformes, conspicuamente reticuladas, brillantes, amarillas cuando el fruto está vivo, cobrizas cuando el fruto está seco, de 2,6–3,2 × 1,1–1,5 mm.



Figura 3. *Souroubea caquetensis* Gir.-Cañas, Edwin Trujillo & C. Parra-O. **A y B.** Inflorescencia y flores [E. Trujillo-T. *et al.* 7269 (COAH, COL, LAMUA)]; **C.** Frutos y semillas [E. Trujillo-T. *et al.* 8207 (COAH, COL, LAMUA)].

Etimología. El epíteto específico hace referencia al departamento de Caquetá (Colombia), de donde esta especie es endémica.

Distribución geográfica y ecológica. *Souroubea caquetensis* sólo se conoce en fragmentos de los bosques maduros cercanos al municipio de El Doncello, ubicado en el piedemonte andino-amazónico del departamento de Caquetá (Colombia) (**Figura 4**); crece entre los 900 y los 1.300 m de altitud, en donde se encuentran individuos profusamente ramificados que cubren una parte significativa de los grandes árboles. Esta región se ha convertido en el foco de múltiples investigaciones (E. Trujillo-Trujillo, obs. pers.), toda vez que se han detectado áreas inexploradas anteriormente, las cuales presentan una gran riqueza florística y faunística, donde han comenzado a darse numerosos hallazgos de importancia nacional que redundan en el avance del inventario biológico no sólo del Caquetá, sino de Colombia en su conjunto. En este contexto, en el piedemonte andino-amazónico del Caquetá se han descubierto varias especies nuevas de diferentes familias botánicas, entre las cuales podemos destacar a *Boyania colombiana* H. Mend. (**Mendoza**, 2010), *Anthurium trujilloi* Croat (**Croat et al.**, 2013), *Masdevallia leonor-baeziana* Os. Perd., Edwin Trujillo & Karremans (**Perdomo et al.**, 2023), *Philodendron* spp. (**Croat et al.**, 2023), *Rhodospatha rupicola* Edwin Trujillo, Zuluaga & Alzate-Lozano (**Alzate et al.**, 2019), *Xanthosoma caquetense* Croat, Delannay & Edwin Trujillo (**Croat et al.**,

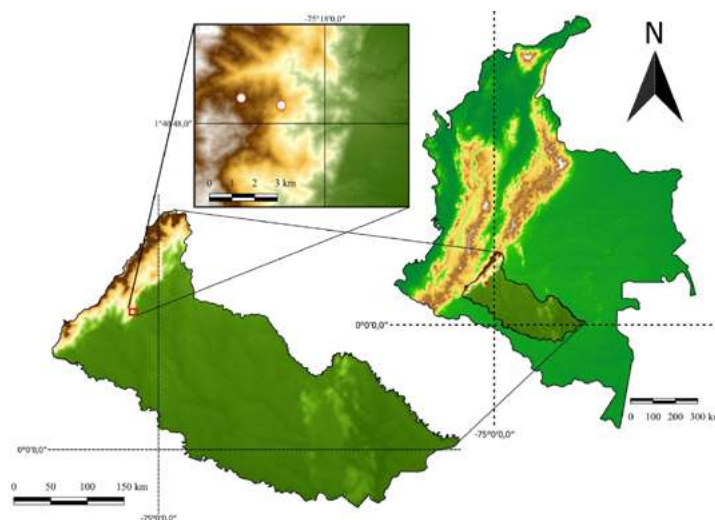


Figura 4. Distribución de *Souroubea caquetensis* Gir.-Cañas, Edwin Trujillo & C. Parra-O. (mapa elaborado por Óscar Perdomo)

2017), *Piper andakiensis* W. Trujillo-C. & Callejas (Trujillo y Callejas, 2015), *Piper callejasii* W. Trujillo-C. (Trujillo et al., 2021) y *Piper indiwasi* W. Trujillo-C. & M. A. Jaram. (Trujillo et al., 2022).

Conservación. Dadas su rareza demográfica (se han hecho numerosos inventarios en el departamento de Caquetá y en otras áreas de Colombia, pero no se han encontrado más poblaciones), su pequeña área de distribución geográfica, la acelerada tala y la destrucción de los bosques en donde crece, la destacada presencia de especies invasoras y el avance de la frontera agropecuaria, esta nueva especie debe categorizarse como “en peligro crítico” (CR) de la UICN (2012) [A1a, c, d, e; B1a, b (i, ii, iii), 2a, b (i, ii, iii)].

Comentarios. *Souroubea caquetensis* se desarrolla como un arbusto hemiepífito, una condición muy común entre las Marcgraviaceae (Giraldo-Cañas, 2011a, 2018; Zotz et al., 2021). Esta nueva especie se reconoce fácilmente por sus nectarios reproductivos pedicelares blancos, característica única entre todas las especies del género, ya que en las demás éstos son amarillos, rojos, rosados o anaranjados. *Souroubea caquetensis* es fenotípicamente similar a *S. intermedia* de Roon y a *S. venosa* Schery, las cuales se pueden diferenciar por varias características que se detallan en la tabla 1.

Debido a su inflorescencia racemosa multiflora, sus pedicelos cortos, sus nectarios reproductivos diminutos y ubicados en la base de la flor y sus flores pequeñas, *S. caquetensis* podría confundirse con algunos representantes del género *Ruyschia* Jacq. Estos dos géneros constituyen la tribu Ruyschieae de la subfamilia Noranteoideae (véase Giraldo-Cañas, 2018) y quizás deban combinarse en un único género, el *Ruyschia* (género válido más antiguo), toda vez que ambos poseen hojas espiraladas, inflorescencias largamente racemosas, nectarios reproductivos ubicados en la base de la flor (muy próximos al cáliz), flores pentámeras (muy raramente 3–6-meras en algunas especies de *Souroubea*), ovario 2–(3–4)-locular en *Ruyschia* y 3–5-locular en *Souroubea*, así como un número reducido de estambres (3 o 5 por flor en ambos géneros) (Giraldo-Cañas, 2011a, 2018). Además, según Punt (1971), los granos de polen de *Ruyschia* y *Souroubea* no pueden ser diferenciados. Quizás la diferencia que tradicionalmente se usa para separar estos dos géneros es el desarrollo de dos apéndices auriculares en la boca de cada nectario reproductivo en *Souroubea*, los cuales están ausentes en *Ruyschia*, aunque dichos apéndices pueden estar atrofiados en algunas especies. Una situación similar en cuanto a las características morfológicas tanto vegetativas como reproductivas, se da en los géneros *Marcgraviastrum* (Wittm. ex Szyszyl.) de Roon & S. Dressler y *Schwartzia* Vell.,

Tabla 1. Principales diferencias entre las especies fenotípicamente similares *Souroubea caquetensis* Gir.-Cañas, Edwin Trujillo & C. Parra-O., *Souroubea intermedia* de Roon y *Souroubea venosa* Schery (datos tomados de De Roon, 1969, 1970, e información del estudio de ejemplares de herbario)

Característica	<i>Souroubea caquetensis</i>	<i>Souroubea intermedia</i>	<i>Souroubea venosa</i>
Hojas	Coriáceas, obovadas, oblongas o lanceoladas, obtusas, ligeramente asimétricas	Coriáceas, obovado-oblongas, oblongas o lanceoladas, subagudas, acuminadas u obtusas, conspicuamente asimétricas	Cartáceas a coriáceas, elípticas, elíptico-oblongas u obovadas, obtusas, redondeadas o acuminadas, simétricas
Pecíolo (cm de longitud)	0,4–1,3	0,3–0,8	0,2–1,3
Glándulas laminales	5–14 pares por lámina, perceptibles en ambas caras, las distales marginales a submarginales, las medias y las proximales ubicadas a 3–7 mm de la margen	2–6 pares por lámina, perceptibles sólo en la cara abaxial, dispuestas aleatoriamente o en una línea a cada lado de la lámina	9–18 pares por lámina, perceptibles sólo en la cara abaxial, dispuestas aleatoriamente o en una línea a cada lado de la lámina y a 3–15 mm de la margen
Inflorescencias (cm de longitud)	(9) 12–18 (19)	(7) 10–20	9–16
Pedicelos	(0,9) 1,0–1,2 cm de longitud, verdes claros	0,8–1,8 cm de longitud, rojizos	0,6–1,2 cm de longitud, blanco-amarillentos
Nectarios reproductivos pedicelares	Calcariformes, blancos, 7–9 mm de longitud, auriculados, aurículas 3,2–4,2 mm de longitud, la urna sin surcos	Calcariformes, anaranjados a más comúnmente rojos o rosados, 7–10 mm de longitud, auriculados, aurículas 1,5–2,2 mm de longitud, la urna sin surcos	Tubulares, amarillos muy claros, 5–8 mm de longitud, subauriculados, la urna con un surco longitudinal
Bractéolas	Orbiculares, 1,1–1,3 × 1,1–1,2 mm	Triangulares, 1,0–1,5 × 1,5–2,0 mm	Suborbiculares, ca. 1 × 2 mm
Sépalos	Orbiculares, 1,4–1,6 × 1,1–1,5 mm	Subelípticos a suborbiculares, 1,4–1,5 × 2,0–2,5 mm	Suborbiculares, 1,0–1,5 × 2,0–2,5 mm
Corola	Inconspicuamente gamopétala (pétalos connatos proximalmente), blanquecina a verde muy clara, 3,0–3,3 mm de longitud, pétalos oblongos	Inconspicuamente gamopétala (pétalos connatos proximalmente), blanco-crema, blanco-verdosa a verdosa-amarillenta, 4,0–6,0 mm de longitud, pétalos oblongos	Conspicuamente gamopétala (pétalos connatos hasta cerca de la mitad de su longitud), crema-amarillenta a amarilla muy clara, 4,0–4,5 mm de longitud, pétalos (lóbulos) cordados, deltoides
Ovario	Cónico-piriforme, 2,0–2,1 × 1,4–1,5 mm	Cónico, 2,5–3,0 × 1,8–2,0 mm	Ovado, 2,0–2,1 × 1,4–1,5 mm
Estigma	Inconspicuamente radiado y liso	Conspicuamente radiado y papiloso	Conspicuamente radiado y papiloso
Androceo	Filamentos libres, planos, 2,0–2,5 × 1,0–1,1 mm; anteras oblongas, 0,7–0,9 mm de longitud	Filamentos libres, planos, 3,0–3,5 × 1,0–1,1 mm; anteras ovoides-subglobosas, 1,5–1,6 mm de longitud	Filamentos connatos proximalmente, planos, 3,0–3,5 × 1,0–1,1 mm; anteras elipsoides, 1,0–1,1 mm de longitud
Frutos	Ligeramente apiculados, 6–8 × 6–8 mm	Conspicuamente apiculados, 6–8 × 5–8 mm	Conspicuamente apiculados, 4–7 × 4–6 mm
Semillas	2,6–3,2 × 1,1–1,5 mm	2,9–3,1 × 1,5–1,7 mm	2,5–2,7 × 1,0–1,1 mm
Distribución geográfica	Colombia (vertiente andino-amazónica; departamento de Caquetá). 900–1300 m alt.	Colombia (Chocó biogeográfico-vertiente pacífica; departamentos de Chocó, Nariño y Valle del Cauca). 0–1500 m alt.	Costa Rica (Alajuela, Guanacaste, Puntarenas, San José) y Panamá (Chiriquí, Coclé, Panamá, Veraguas). 0–1000 m alt.
Ejemplares analizados	Colombia: <i>E. Trujillo et al.</i> 7269, 8207, 8208 (COAH, COL)	Colombia: <i>J. L. Clark et al.</i> 13430 (COL), <i>J. Espina et al.</i> 1812 (COL), <i>E. Forero & R. Jaramillo</i> 5292 (COL, MO), <i>E. Forero et al.</i> 1217 (COL, MO), <i>H. P. Fuchs et al.</i> 21704 (COL), <i>H. García-Barriga</i> 13140, 13207 (COL), <i>A. Gentry et al.</i> 55285 (COL, MO), <i>E. P. Killip & J. Cuatrecasas</i> 39146 (COL, MO, US), <i>J. L. Luteyn & M. Lebrón-Luteyn</i> 6878 (COL, MO, NY), <i>L. E. Mora</i> 2250 (COL)	Costa Rica: <i>L. D. Gómez & G. Herrera</i> 21181 (MO), <i>B. Hammel</i> 18278 (MO). Panamá: <i>S. Castroviejo et al.</i> 16515 (COL), <i>R. E. Woodson et al.</i> 1289 (MO, NY)

los cuales deberían combinarse en uno solo, así como *Norantea* Aubl., *Pseudosarcopera* Giraldo-Cañas y *Sarcopera* Bedell, los cuales también podrían constituir un único género (**Giraldo-Cañas**, obs, pers.).

Con esta nueva especie, se eleva a 21 el número de especies reconocidas del género (**Giraldo-Cañas**, 2018) y a 11 conocidas en Colombia, dos de las cuales son endémicas (*S. intermedia* y *S. caquetensis*) (**Giraldo-Cañas**, 2011b, 2018). Cabe destacar que **Carvajal-Cogollo & Rangel-Ch.** (2022: 438) citaron en el departamento de Boyacá (Colombia) a *Souroubea boyacensis* de Roon, binomio que no se ha publicado válidamente y que, por lo tanto, corresponde a un *nomen nudum*.

Especímenes examinados (paratipos): COLOMBIA. Caquetá: Municipio de El Doncello, vereda San Pedro, camino hacia la cascada de Anayacito, 943 m, 1°41'1,93" N–75°19'7,73" O, 2 de abril, 2023 (fr), *E. Trujillo-T. et al.* 8207 (COAH, COL, LAMUA). Municipio de El Doncello, camino hacia el corregimiento Berlín, 1.260 m, 1°41'20" N–75°20'0,1" O, 2 de abril, 2023 (fr), *E. Trujillo-T. et al.* 8208 (COAH, COL, LAMUA).

Agradecimientos

Queremos manifestar nuestro profundo reconocimiento y agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá D. C., Colombia) y a la Universidad de la Amazonia (Florencia, Caquetá, Colombia), por todas las facilidades que nos brindaron para la preparación de este trabajo. A Óscar Perdomo por la elaboración del mapa; al Comité Editorial de la revista de la ACCEFYM y a los evaluadores anónimos por sus acertados comentarios.

Contribución de los autores

DGC: disecciones morfológicas y micromorfológicas, compilación, análisis de la información y escritura del artículo; ETT: recolecciones en campo, fotografías y revisión del manuscrito; CPO: disecciones morfológicas y micromorfológicas, compilación, análisis de la información y escritura del artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Alzate, S. L., Trujillo-T., E., Zuluaga, A. (2019). *Rhodospatha rupicola* (Araceae), una nueva especie reófito de la Amazonia colombiana. *Caldasia*, 41, 320–326. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n2.77486>
- Carvajal-Cogollo, J. E., Rangel-Ch., J. O. (2022). *Flora y vegetación del departamento de Boyacá*. Editorial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Croat, T., Grace, A., Kostelac, C. (2013). New species of *Anthurium* (Araceae) from Andean Western South America. *Aroideana*, 36, 56–72.
- Croat, T., Delannay, X., Hannon, L. P. (2017). A Revision of *Xanthosoma* (Araceae). Part 1: Western South America. *Aroideana*, 40, 120–124.
- Croat, T., Mines, T. E., Trujillo-T., E. (2023). Four new species of *Philodendron* subg. *Philodendron* (Araceae) from Caquetá Department, Colombia. *Novon*, 31, 132–138. <https://doi.org/10.3417/2023823>
- De Roon, A. C. (1969). New species of *Souroubea* (Marcgraviaceae). *Acta Botanica Neerlandica*, 18, 401–405.
- De Roon, A. C. (1970). Marcgraviaceae. Flora of Panama. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 57, 29–50. <https://doi.org/10.2307/2394780>
- Giraldo-Cañas, D. (2011a). *Estudios morfológicos y taxonómicos en el complejo Norantea (Marcgraviaceae): Revisión de Norantea, Pseudosarcopera y Schwartzia*. Biblioteca José Jerónimo Triana (1–176). Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Giraldo-Cañas, D. (2011b). Las Marcgraviaceae de Colombia: Inventario, diversidad, endemismo y distribución. *Bioetnia*, 8, 28–39. <https://doi.org/10.51641/bioetnia.v8i1.11>
- Giraldo-Cañas, D. (2018). Circunscripción morfológica, diversidad, patrones de distribución y catálogo de la familia neotropical Marcgraviaceae (Ericales). *Biota Colombiana*, 19, 49–69. <https://doi.org/10.21068/c2018.v19n01a04>

- Giraldo-Cañas, D.** (2023). Una nueva especie de *Schwartzia* (Marcgraviaceae, Ericales) de Perú. *Cinchonia*, 18, 184–194.
- Lawrence, G. H. M.** (1962). *An introduction to plant taxonomy*. The Macmillan Company.
- McDade, L. A.** (1995). Species concepts and problems in practice: insight from botanical monographs. *Systematic Botany*, 20, 606–622. <https://doi.org/10.2307/2419813>
- Mendoza, H.** (2010). Una nueva especie de *Boyania* (Melastomataceae) de Colombia. *Novon*, 20, 432–436. <https://doi.org/10.3417/2008136>
- Perdomo, O., Trujillo-T., E., Karremans, A. P.** (2023). *Masdevallia leonor-baeziana* (Pleurothallidinae): A new species from the Andean-Amazonian foothills of Caquetá, Colombia. *Lankesteriana*, 23, 139–144. <https://doi.org/10.15517/lank.v23i2.54019>
- Punt, W.** (1971). Pollen morphology of the genera *Norantea*, *Souroubea*, and *Ruyschia* (Marcgraviaceae). *Pollen et Spores*, 13, 199–232.
- Sosef, M. S. M., Degreef, J., Engledow, H., Meerts, P.** (2021). *Clasificación botánica y nomenclatura, una introducción*. Meise Botanic Garden.
- Thiers, B.** (2023). *Index Herbariorum: a global directory of public herbaria and associated staff*. <https://sweetgum.nybg.org/ih>
- Trujillo, W. & Callejas, R.** (2015). *Piper andakiensis* (Piperaceae) una especie nueva de la vertiente amazónica de la cordillera Oriental de Colombia. *Caldasia*, 37, 261–269. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v37n2.54379>
- Trujillo, W., Trujillo-T., E., Jaramillo, M. A.** (2021). *Piper callejasii* (Piperaceae) a new species from the Eastern slopes of the Andes, Northern South America. *Novon*, 29, 200–205. <https://doi.org/10.3417/2021659>
- Trujillo, W., Trujillo-T., E., Ortiz, F. A., Toro, D., Jaramillo, M. A.** (2022). New *Piper* species from the Eastern slope of the Andes in Northern South America. *Phytokeys*, 206, 25–48. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.206.75971>
- UICN.** (2012). *Categorías y criterios de la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza UICN. Versión 3.1*. Segunda edición. Information Press.
- Wiens, J. J. & Servedio, M. R.** (2000). Species delimitation in systematics: inferring diagnostic differences between species. *Proceedings of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 267 (1444), 631–636. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1049>
- Zotz, G., Almeda, F., Bautista-Bello, A. P., Eskov, A., Giraldo-Cañas, D., Hammel, B., Harrison, R., Köster, N., Krömer, T., Lowry II, P. P., Moran, R. C., Plunkett, G. M., Weichgrebe, L.** (2021). Hemiepiphytes revisited. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 51, 125620. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2021.125620>

Artículo original

Myrcia coquiensis (Myrtaceae), una nueva especie de los bosques húmedos tropicales del Chocó, Colombia

Myrcia coquiensis (Myrtaceae), a new species from the tropical humid forests of Chocó, Colombia

● Carlos Parra-O.^{1,*}, Gian Paolo Daguer², Fausto Moreno Bonilla³

¹Herbario Nacional Colombiano (COL), Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

²Consultor independiente, Bogotá, Colombia

³Consultor independiente, Nuquí, Chocó, Colombia

Resumen

Se describe e ilustra una nueva especie de *Myrcia* sect. *Calypttranthes* de Colombia. Se discuten las afinidades taxonómicas de la nueva especie, algunas de sus particularidades morfológicas, los hábitats en donde crece y se incluye una evaluación de su estado de conservación.

Palabras clave: Chocó biogeográfico; Flora de Colombia; *Myrcia* sect. *Calypttranthes*; Plantas neotropicales.

Abstract

A new species of *Myrcia* sect. *Calypttranthes* from Colombia is described and illustrated. Taxonomic affinities of the new species are included, as well as some of its morphological features, its habitat, and the evaluation of its conservation status.

Keywords: Chocó Biogeographic Region; Colombian Flora; *Myrcia* sect. *Calypttranthes*; Neotropical plants.

Introducción

Myrcia DC. (Myrtaceae) es un género de árboles, arbustos y subarbustos que, en el sentido amplio, es decir, incluyendo a *Calypttranthes* Sw. y *Marlierea* Cambess., tiene cerca de 800 especies que crecen naturalmente en el Caribe y desde el sur de Estados Unidos de América (Florida) hasta Argentina (Lucas *et al.*, 2018; Lucas *et al.*, 2019). En Colombia existen cerca de 70 especies del género distribuidas en todas las regiones biogeográficas del país, con mayor diversidad en la Amazonia, los Andes y la Guayana. Lucas *et al.* (2018) propusieron una nueva clasificación taxonómica dentro de *Myrcia* y delimitaron nueve secciones, una de las cuales (*Myrcia* sect. *Calypttranthes*) contiene la mayor parte de las especies del género anteriormente conocido como *Calypttranthes*. Las especies de *Myrcia* sect. *Calypttranthes* se caracterizan por tener ramificación vegetativa simpodial, pelos simples o en forma de 'T', inflorescencias generalmente en panículas pareadas que en ocasiones están reducidas, cáliz floral cerrado y caliptrado en el que la caliptra se desprende como una unidad en la antesis, hipanto floral extendido sobre el ovario en forma de un tubo corto, y ovario usualmente bilocular con dos óvulos por lóculo (Lucas *et al.*, 2018; Burton *et al.*, 2022).

En el marco del continuo estudio taxonómico de las Myrtaceae de Colombia que lleva a cabo el primer autor de este artículo, se identificó a partir de especímenes de herbario una posible nueva especie de *Myrcia* sect. *Calypttranthes*, cuyos frutos se desconocían.

Citación: Parra-O. C., Daguer GP, Moreno Bonilla F. *Myrcia coquiensis* (Myrtaceae), una nueva especie de los bosques húmedos tropicales del Chocó, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):307-313, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2567>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Carlos Parra-O; caparrao@unal.edu.co

Recibido: 22 de febrero de 2024

Aceptado: 23 de abril de 2024

Publicado en línea: 30 de abril de 2024



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

La difusión e intercambio de material fotográfico de plantas colombianas realizada por el grupo “Frutas de Colombia” (<https://www.facebook.com/groups/382172052552184>), cofundado y liderado por el segundo autor de este artículo, permitió identificar al primer espécimen de esta especie conocido hasta el momento con frutos maduros. El estudio detallado del espécimen y del material observado en varios herbarios, permitió proponer la nueva especie que se describe e ilustra a continuación.

Materiales y métodos

Se empleó la terminología utilizada por **Systematics Association Committee for Descriptive Biological Terminology** (1962), **McVaugh** (1958; 1968), **Landrum & Kawasaki** (1997) y **Beentje** (2010) para la definición de los caracteres morfológicos. Se estudiaron especímenes de *Myrcia* sect. *Calyptanthes* en los herbarios AFP, CAS, CAUP, CDMB, CHOCO, COAH, COL, CUVC, FAUC, FMB, HECASA, HORI, HUA, HUAZ, HUC, HUH, ICESI, JAUM, JBB, JGBP, K, LLANOS, MA, MEDEL, MO, NY, PSO, SURCO, TOLI, TULV, UDBC, UIS, UPTC, UTM y VALLE (los acrónimos de los herbarios siguen a **Thiers**, 2024), en tanto que sus caracteres vegetativos y reproductivos se analizaron utilizando un estereomicroscopio. El análisis de conservación se elaboró siguiendo las categorías y criterios de la **UICN** (2022), y la Extensión de Presencia (EOO) y el Área de Ocupación (AOO) se calcularon mediante la herramienta en línea Geospatial Conservation Assessment Tool (GeoCAT, <http://geocat.kew.org/>) (**Bachman et al.**, 2011).

Resultados y discusión

Myrcia coquiensis C. Parra-O., G. P. Daguer & F. Moreno, sp. nov. (**Figuras 1–2**). **TIPO:** Colombia. **Chocó:** Nuquí, corregimiento de Coquí, cerca de la posada Palo de Agua, 20 nov 2021 (fr), *F. Moreno s.n.* (holotipo: COL # 627948!).

Diagnosis. This species is most similar to *Myrcia neomacrocarpa*, from which it differentiates by having leaf blades ovate, widely ovate or widely elliptic (versus leaf blades narrowly elliptic in *M. neomacrocarpa*), bracts and bracteoles persistent (vs. bracts and bracteoles deciduous), bracteoles 2.5–4.5 mm long (vs. ca. 1 mm long), fruits 1.7–2.3 cm diam. (vs. 3.5–4 cm diam.), and seeds 7.5–11 mm long (vs. ca. 20 mm long).

Descripción. Árboles de 3–9 m de altura; tricomas en forma de ‘T’, adpresos, de 0,1 mm de largo o menores, marrón-amarillentos. **Ramitas** jóvenes grisáceo-amarillentas, semiteretes a teretes, glabras; ramitas viejas no vistas. **Hojas** pecioladas, pecíolo cuando seco marrón oscuro, 6,5–8,8 mm de largo, 3–4,5 mm de diámetro, ligeramente rugoso, glabro, acanalado por la superficie adaxial; láminas ovadas, anchamente ovadas o anchamente elípticas, 17–29 × 9,5–15 cm, coriáceas, discoloras, la haz glabra, con glándulas esféricas inmersas marrón-verdosas, el envés glabro, con glándulas esféricas prominentes marrón-verdosas a marrón-anaranjadas (en seco); ápice acuminado, el acumen de 10 mm de largo; base obtusa; margen entera; nervio primario por la haz sulcado y glabro, por el envés prominentemente convexo y glabro; nervios secundarios 17–22 (con algunos nervios intersecundarios), por la haz y el envés prominentes a ligeramente prominentes y glabros; nervio marginal presente, distanciado 4–6,3 mm de la margen, nervio inframarginal exterior presente, distanciado 1,3–1,8 mm de la margen. **Inflorescencias** en panículas pareadas con las ramas reducidas, generalmente terminales, en ocasiones axilares, 2–6 cm de largo, marrón-amarillentas a marrón oscuras en seco, con ejes aplanados a subteretes, glabros a escasamente pubescentes, con 11–21 flores por panícula, las flores agrupadas en grupos de 3 (4) a lo largo de las ramas de la panícula o solitarias en el ápice de la panícula; pedúnculo de la inflorescencia generalmente desarrollado, en ocasiones extremadamente reducido, aplanado, 1–3,5 cm de largo, 1,5–3 mm de ancho, glabro a escasamente pubescente; brácteas de la inflorescencia 1–2, persistentes después de la antesis, estrechamente ovadas o casi lanceoladas, 8,5–14 × 3,5–4 mm, escasa a medianamente pubescentes, marrón claro a oscuras en seco; bráctea asociada a cada triplete de flores (o a una flor individual) persistente después de la antesis, anchamente ovada, 6–7,5 × 6,3–7,5 mm, escasa a medianamente pubescente, marrón claro a oscura



Figura 1. Holotipo de *Myrcia coquiensis* C. Parra-O., G. P. Daguer & F. Moreno [*F. Moreno s.n.* (COL # 627948)]. Foto: Carlos Parra-O.

en seco; bractéolas ausentes en la flor central de cada triplete, 2-3 en las flores laterales de la triplete o cuando la flor es solitaria, persistentes después de la antesis, axilares al botón, ovadas a estrechamente ovadas, 2,5-4,5 × 1,5-2,7 mm, escasa a medianamente pubescentes, marrón claras en seco. Botones florales fusiformes, acuminados, 5-6 mm de largo, 3-3,7 mm de diámetro, escasa a medianamente pubescentes, marrones en seco; cáliz

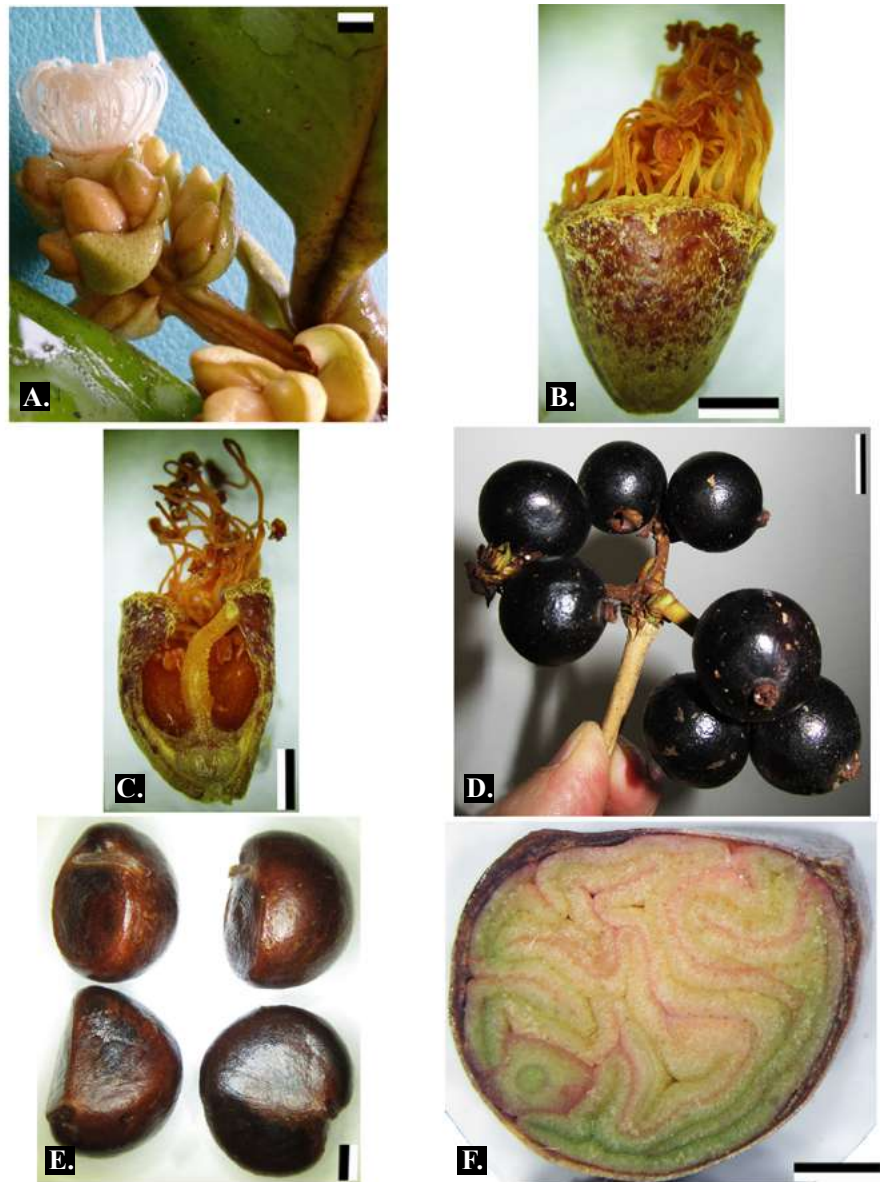


Figura 2. *Myrcia coquiensis* C. Parra-O., G. P. Daguer & F. Moreno. **A.** Inflorescencia y flor; **B.** flor; **C.** Corte longitudinal de la flor que muestra el hipanto y el ovario; **D.** Infrutescencia; **E.** Semillas; **F.** Corte transversal del embrión. A.-C. [*F. Moreno s.n.* (COL # 627949)]; D.-F. [del holotipo *F. Moreno s.n.* (COL # 627948)]. Escala para A.-C. = 1 mm; escala para D. = 1 cm; escalas para E.-F. = 2 mm. Fotos: F. Moreno (A); C. Parra-O. (B-F)

completamente cerrado abriéndose en antesis en forma de caliptra, caliptra de 3,3-3,5 mm de diámetro, medianamente pubescente en la superficie externa, glabra en la superficie interna; pétalos ausentes; hipanto 3,5-4 mm de largo, 2,5 mm de diámetro, prolongado 2,5 mm por encima del ovario, escasa a medianamente pubescente por fuera y glabro por dentro. **Androceo** con ca. 40 estambres; filamento 2-4,5 mm de largo; antera globosa, 0,3-0,4 mm de largo, conectivo con una glándula apical; disco 2,5 mm de diámetro, glabro. **Gineceo** con ovario 0,8-1,2 mm de diámetro, 2 lóculos, con 2 óvulos por lóculo; estilo filiforme, 7,5 mm de largo, glabro; estigma 0,2 mm de ancho. **Fruto** globoso, 1,7-2,3 cm de diámetro, de color negruzco cuando maduro, sésil, con la superficie lisa, generalmente

glabro pero glabrescente a escasamente pubescente sólo en el ápice, con numerosas glándulas esféricas sobre el epicarpio. **Semillas** 1-3, subreniformes, con 1-2 superficies planas, 7,5-11 × 6-9 mm, cubierta seminal papirácea, lisa, de color marrón-naranja, sin glándulas; embrión de tipo mircoide con los cotiledones libres, contortuplicados, más anchos que el hipocótilo y rodeados por este.

Etimología. El epíteto específico de la nueva especie hace referencia al corregimiento de Coquí en el departamento del Chocó, Colombia, donde fue recolectado el tipo.

Distribución geográfica y hábitat. *Myrcia coquiensis* crece en bosques húmedos tropicales (región del Chocó biogeográfico) del departamento del Chocó, entre el nivel del mar y los 100 m de altitud. Esta especie, aparentemente, es endémica de Colombia.

Fenología. *Myrcia coquiensis* ha sido recolectada con botones y flores en febrero, marzo, mayo y junio, y con frutos, en agosto y noviembre.

Nombre común. “Quinguejo” (*Moreno s.n.* COL # 627948).

Conservación. Esta especie se ha encontrado en cuatro localidades del departamento del Chocó, separadas por un mínimo de 160 km; con una Extensión de Presencia (EOO) de 1.065,837 km² y un Área de Ocupación (AOO) de 16 km², su estado de conservación se categorizó como ‘En Peligro’ (EN) criterio B1,2, siguiendo los criterios de las listas rojas de la UICN (2022). Además, cuatro de los seis especímenes aquí estudiados fueron recolectados en las décadas de 1960, 1980 y 1990, por lo que sería importante regresar a esas localidades y buscar poblaciones de estas especies, con el fin de corroborar su presencia en esos bosques y observar el grado de afectación antrópica en que se encuentran actualmente dichos ecosistemas.

Comentarios. *Myrcia coquiensis* es de las pocas especies de *Myrcia* sect. *Calyptranthes* cuyas brácteas y bractéolas son persistentes luego de la antesis, e incluso permanecen después de la maduración del fruto. Entre las especies conocidas en Colombia de *Myrcia* sect. *Calyptranthes*, *Myrcia coquiensis* es similar a *Myrcia neomacroparva* A.R. Lourenço & E. Lucas (= *Calyptranthes macroparva* B. Holst & M. L. Kawas.) y ambas crecen en los bosques húmedos tropicales del Chocó; en la diagnosis se mencionan los caracteres que diferencian estas dos especies. *Myrcia neobracteata* A.R. Lourenço & E. Lucas (= *Calyptranthes bracteata* M. L. Kawas. & B. Holst) también tiene inflorescencias con brácteas persistentes, pero se diferencia de *Myrcia coquiensis* por las láminas foliares elípticas a angostamente elípticas (versus ovadas, anchamente ovadas o anchamente elípticas en *M. coquiensis*), por los botones florales obovoides (versus fusiformes) y por tener cerca de 5 flores por panícula (versus 11-21).

Las inflorescencias de *Myrcia coquiensis* presentan variación en cuanto a la presencia de ramificaciones laterales reducidas, ya que en las más pequeñas tales ramificaciones no se desarrollan, en tanto que en las más grandes sí son evidentes dichas ramificaciones, como se observa en una inflorescencia del holotipo y en las de *Duke 11666* (MO). Además, se observaron algunas inflorescencias muy reducidas, al parecer axilares, en las que prácticamente no se desarrolla el pedúnculo, como en *Duke 9680* (HUH); no obstante, es necesario estudiar más especímenes de esta especie para determinar si ese tipo de inflorescencias reducidas son frecuentes o raras. Los frutos de *Myrcia coquiensis* comienzan inicialmente su maduración exhibiendo un color vinoso claro que se convierte en vinoso oscuro, para finalmente tornarse negruzcos, con la superficie brillante.

Galeano (2000) reportó la presencia de una Myrtaceae indeterminada (*Galeano 5145*) en los bosques del golfo de Tribugá, en la costa del Pacífico (Chocó), que se conoce comúnmente en esa zona como “quinquejo de monte”; no fue posible examinar el espécimen mencionado por **Galeano** (2000), ya que no está depositado en COL. Dentro de las Myrtaceae colombianas, el nombre “quinquejo” es bastante único y particular, y hasta el momento sólo se conoce para referirse a *Myrcia coquiensis*. Teniendo en cuenta que el golfo de Tribugá y la localidad tipo de *M. coquiensis* (Coquí) están relativamente cerca (menos de 30 km entre ambas localidades), que los nombres comunes de esta nueva especie y el reportado por **Galeano** (2000) son casi idénticos y que el tipo de bosque

en ambas localidades es similar, es posible que la especie reportada por Galeano sea *M. coquiensis*. Galeano reportó que el “quinquejo de monte” es utilizado como alimento por la comunidad afrocolombiana del golfo de Tribugá.

Especímenes examinados (paratipos): COLOMBIA. Chocó: ‘beach forest n. of Curiche’, 1 feb 1967 (fl), *J. A. Duke 9680* (HUH!, MO-n.v., NY!); ‘vicinity of Curiche’, 23-25 may 1967 (bot), *J. A. Duke 11666 (1)* (MO!); Bahía Solano, colina de Punta Huina, 31 ago 1989 (fr), *J. Espina, F. García & E. Morales 3139* (HUA!); Nuquí, corregimiento de Coquí, cerca de la posada Palo de Agua, 29 mar 2021 (bot, fl), *F. Moreno s.n.* (COL # 627949!); Parque Nacional de Utría, playa ubicada al sureste de las bocas del río San Pichí, 6°20’N, 77°20’W, 0-100 m, 10 jun 1990 (fl), *F. García & E. Agualimpia 461* (CHOCO-n.v., FMB, MO-n.v.).

Agradecimientos

A Alejandra Salamanca Osorio, por compartir imágenes de las frutas nativas de Coquí en el grupo “Frutas de Colombia” y por el contacto que permitió obtener el material botánico. También agradecemos a un evaluador anónimo por sus útiles comentarios y sugerencias para mejorar el manuscrito final. El primer autor agradece a los curadores y directores de los herbarios AFP, CAS, CAUP, CDMB, CHOCO, COAH, COL, CUVC, FAUC, FMB, HECASA, HORI, HUA, HUAZ, HUC, HUH, ICESI, JAUM, JBB, JBBP, K, LLANOS, MA, MEDEL, MO, NY, PSO, SURCO, TOLI, TULV, UDBC, UIS, UPTC, UTMIC y VALLE, por permitir el acceso a sus colecciones, y al Herbario Nacional Colombiano (COL) – Instituto de Ciencias Naturales – de la Universidad Nacional de Colombia, por todo el apoyo recibido durante la elaboración de este trabajo.

Contribución de los autores

CPO: compilación, análisis de la información y escritura del artículo; GPD: obtención del material botánico y revisión del manuscrito. FMB: búsqueda y recolección del material botánico y toma de fotografías.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Bachman, S., Moat, J., Hill, A., de la Torre, J., Scott, B.** (2011). Supporting Red List threat assessments with GeoCAT: geospatial conservation assessment tool. *Zookeys*, 150, 117-126. <https://doi.org/10.3897/zookeys.150.2109>
- Beentje, H.** (2010). *The Kew Plant Glossary: an illustrated dictionary of plant terms*. Royal Botanic Gardens.
- Burton, G. P., Canteiro, C., Fernandes, T., Grice, H., Lourenço, A. R., Parra-O., C., Santos, M. F., Lucas, E.** (2022). A monographic conspectus of *Myrcia* sect. *Calyptanthus* (Myrtaceae) from South and Central America. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 107, 87-136. <https://doi.org/10.3417/2022726>
- Galeano, G.** (2000). Forest use at the Pacific Coast of Chocó, Colombia: a quantitative approach. *Economic Botany*, 54(3), 358-376. <https://doi.org/10.1007/BF02864787>
- IUCN Standards and Petitions Committee.** (2022). *Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 15.1.* <http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>.
- Landrum, L. & Kawasaki, M. L.** (1997). The genera of Myrtaceae in Brazil: an illustrated synoptic treatment and identification keys. *Brittonia*, 49(4), 508-536. <https://doi.org/10.2307/2807742>
- Lucas, E. J., Amorim, B. S., Lima, D. F., Lima-Lourenço, A. R., Nic Lughadha, E. M., Proença, C. E. B., Rosa, P. O., Rosário, A. S., Santos, L. L., Santos, M. F., Souza, M. C., Staggemeier, V. G., Vasconcelos, T. N. C., Sobral, M.** (2018). A new infra-generic classification of the species-rich Neotropical genus *Myrcia* s.l. *Kew Bulletin*, 73, 9-21. <https://doi.org/10.1007/s1225-017-9730-5>

-
- Lucas, E. J., Holst, B., Sobral, M., Mazine, F. F., Nic Lughadha, E. M., Proença, C. E. B., Ribeiro da Costa, I., Vasconcelos, T. N. C.** (2019). A New Subtribal Classification of Tribe Myrteae (Myrtaceae). *Systematic Botany*, 44(3), 560-569. <https://doi.org/10.1600/036364419X15620113920608>
- McVaugh, R.** (1958). Flora of Peru—Myrtaceae. *Field Museum of Natural History, Botanical Series*, 13 part 4(2), 569-818.
- McVaugh, R.** (1968). The genera of American Myrtaceae - An interim report. *Taxon*, 17, 354-418. <https://doi.org/10.2307/1217393>
- Systematics Association Committee for Descriptive Biological Terminology** (1962). II. Terminology of Simple Symmetrical Plane Shapes (Chart 1). *Taxon*, 11(5), 145-156. <https://doi.org/10.2307/1216718>
- Thiers, B.** (2024). *Index Herbariorum: a global directory of public herbaria and associated staff*. <https://sweetgum.nybg.org/ih/>.

Artículo original

Nuevos registros de la marmosa grácil duende *Gracilinanus dryas* (Marsupialia: Didelphidae) en la cordillera Oriental de Colombia, con notas sobre su biología reproductiva y ontogenia

New records of the wood sprite gracile mouse opossum *Gracilinanus dryas* (Marsupialia: Didelphidae) from the Colombian Eastern Cordillera with notes on its reproductive biology and ontogeny

● Camilo Ernesto Angarita-Yanes

Biólogo, investigador independiente

Resumen

Gracilinanus dryas (Thomas, 1898) es un pequeño marsupial que se distribuye desde la cordillera de Mérida en Venezuela hasta la cordillera Oriental de Colombia, sobre los 2.200 m s.n.m. Su presencia en nuestro país sólo estaba respaldada por dos ejemplares procedentes de Bogotá recolectados hace 72 años. Desde entonces, la especie carecía de registros en campo, así como de especímenes en las colecciones biológicas nacionales. En este artículo se reportan cinco nuevos ejemplares de *G. dryas* en Colombia, recolectados en dos sitios cercanos a la ciudad de Pamplona, departamento de Norte de Santander, con lo que se completan siete ejemplares de esta especie reportados en tres localidades del país. A partir de las muestras, se recogieron los datos morfométricos, ontogénicos y reproductivos (rasgos externos y cráneo-dentales, escroto, región mamaria), correspondientes a individuos subadultos y adultos. La información es novedosa y abre el camino a estudios adicionales de la especie. A pesar de los nuevos registros, sigue habiendo un amplio vacío de reportes de *G. dryas* en la cordillera Oriental colombiana, lo que se explicaría por su rareza, el uso de métodos inadecuados de muestreo e identificaciones erróneas. Aunque los resultados representan un importante aporte al conocimiento de este marsupial en el país, se requieren muestras adicionales, así como análisis morfológicos y moleculares, para esclarecer sus posibles discrepancias taxonómicas, variaciones intraespecíficas y patrones de distribución, más aún cuando la especie se ha categorizado recientemente en Colombia como “En Peligro” (EN).

Palabras clave: Bosque altoandino; Especie rara; Norte de Santander; Pequeños mamíferos no voladores; Vacío de distribución; Zarigüeya ratón.

Abstract

Gracilinanus dryas (Thomas, 1898) is a small marsupial distributed from the Mérida Mountain range in Venezuela to the Eastern Andes in Colombia at 2200 m a.s.l. However, its presence in our country was supported only by two specimens from Bogotá collected 72 years ago. Since then, no field findings of the species have been reported, nor have specimens been registered in national biological collections. Here, we report five new *G. dryas* specimens for Colombia collected in two sites near the city of Pamplona, department of Norte de Santander, thus completing seven specimens of this species from three locations in the country. The morphometric, ontogenetic, and reproductive data (external and craniodental features, scrotum, mammary field) corresponded to subadult and adult individuals. This new information requires further studies on the species, as there is a large gap in the knowledge of *G. dryas* in the Colombian Eastern Andes, probably due to its rarity, inadequate sampling methods, and erroneous identifications. Although the new

Citación: Angarita-Yanes CE. Nuevos registros de la marmosa grácil duende *Gracilinanus dryas* (Marsupialia: Didelphidae) en la cordillera Oriental de Colombia, con notas sobre su biología reproductiva y ontogenia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):314-324, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2545>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

Correspondencia:

Camilo Ernesto Angarita –Yanes;
ceangarita.06@gmail.com

Recibido: 31 de diciembre de 2023

Aceptado: 9 de mayo de 2024

Publicado en línea: 12 de junio de 2024



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

records are an important contribution to the study of the species in the country, additional samples should be collected, and morphological and molecular analyses done to clarify possible taxonomic discrepancies, intraspecific variations, and distribution patterns, especially now that the species has been categorized as Endangered (EN) in Colombia.

Keywords: High Andean forest; Rare species; Norte de Santander; Small non-volant mammals; Distribution gap; Mouse opossum.

Introducción

Gracilinanus Gardner & Creighton, 1989 es un género de pequeñas zarigüeyas arborícolas (10-50 g) exclusivo de los bosques tropicales y subtropicales suramericanos, presente desde las Guayanas, pasando por Venezuela, Colombia y Perú, hasta el noroeste de Argentina, el norte de Uruguay y el sureste de Brasil (D'Elia & Martínez, 2006; Creighton & Gardner, 2008; Voss & Jansa, 2009; Olmos *et al.*, 2019). Actualmente el género incluye siete especies válidas: *G. aceramarcae* (Tate, 1931); *G. agilis* (Burmeister, 1854); *G. dryas* (Thomas, 1898); *G. emiliae* (Thomas, 1909); *G. marica* (Thomas, 1898); *G. microtarsus* (Wagner, 1842) y *G. peruanus* (Tate, 1931) (Voss, 2022).

Con excepción de *G. agilis* y *G. microtarsus*, los miembros de este género no son comunes en las colecciones científicas y sus distribuciones geográficas están poco documentadas (Voss & Jansa, 2009). Es el caso de las tres especies reportadas en Colombia: *G. dryas*, *G. emiliae* y *G. marica* (Ramírez-Chaves *et al.*, 2024), las cuales, además, tienen la más baja representación de localidades de registro, en comparación con los países vecinos donde también se distribuyen (Brown, 2004; Creighton & Gardner, 2008).

En el caso de la marmosa grácil duende (*G. dryas*), su presencia en Colombia está validada solamente por dos ejemplares procedentes de una sola localidad, El Boquerón de San Francisco (Bogotá, departamento de Cundinamarca), en la cordillera Oriental (4°36'1,80"N, 74°3'31,69"O; 2700-3000 m s.n.m.). Ambos especímenes datan de 1952 y están actualmente depositados en el Museo Field de Historia Natural de Chicago, Estados Unidos (Hershkovitz, 1992). La mayoría de los registros conocidos de esta zarigüeya provienen de Venezuela, en particular de la cordillera de Mérida (diez localidades), así como del macizo de Tamá (dos localidades) en el estado Táchira, cerca de la frontera con Colombia (Brown, 2004).

Se sabe que la especie habita en bosques montanos por encima de los 2200 m s.n.m.; con frecuencia se encuentra entre la vegetación boscosa y húmeda, en donde abundan las epifitas, lianas y bromelias (Handley, 1976; Cuartas-Calle & Arango, 2003; Pérez-Hernández *et al.*, 2016). Sin embargo, debido a su rareza, no existe mucha información sobre su distribución, diferencias con otras especies, variación intraespecífica y aspectos de su biología y ecología (Pérez-Hernández *et al.*, 1994; Voss, 2022). En cuanto a las amenazas que enfrenta, aunque *G. dryas* está categorizada como de preocupación menor (LC) a nivel global según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Pérez-Hernández *et al.*, 2016), la Resolución 0126 de 2024 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia la cataloga como una especie "en peligro" (EN) por el riesgo de extinción, debido, especialmente, a la deforestación de los bosques remanentes donde habita (Pérez-Hernández *et al.*, 2016).

Ante el desconocimiento de este pequeño marsupial y su estatus de riesgo en el país, cualquier aporte que permita conocer más sobre la especie es bienvenido. En ese sentido, se presentan aquí cinco nuevos registros de *G. dryas* en la cordillera Oriental de Colombia, con datos nuevos sobre su biología reproductiva y ontogenia.

Materiales y métodos

Se revisaron cinco ejemplares de *G. dryas* depositados en la Colección de Zoología General de la Universidad de Pamplona, departamento de Norte de Santander, Colombia, entregados bajo el permiso marco de recolección N° 200 del 13 de abril de 2015 expedido

por la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental: Corponor. Se usan aquí los códigos del recolector, porque la colección biológica no cuenta aún con números de catálogo (Sierra-Leal *et al.*, 2023).

Se transcribió la información registrada en los formatos de campo referentes a cada espécimen, así como las medidas corporales apuntadas en las etiquetas: longitud total (LT), longitud de la cola (LC), longitud de la pata (P) y longitud de la oreja (O). La longitud cabeza-cuerpo (LCC) se obtuvo restando la LC de la LT. Asimismo, se tomaron diez medidas cráneo-dentales a cada ejemplar con un calibrador digital (0,1 mm), siguiendo lo propuesto por Voss *et al.* (2005): longitud condilobasal (LCB), longitud del nasal (LN), ancho del nasal (AN), constricción interorbital (CIO), ancho cigomático (AC), longitud del paladar (LP), ancho del paladar (AP), hilera dental superior (C1-M4), longitud molares superiores (LMS) y longitud molares 1-3 (M1-M3).

Se estableció también la edad de los individuos según la clasificación de Voss *et al.* (2001), en la cual se considera juveniles a los ejemplares con el dP3 (premolar 3 deciduo) en su sitio; subadultos a aquellos en que el dP3 se ha caído, pero el P3 o el M4 están parcialmente erupcionados, y adultos a los que tienen la dentición permanente completa. Además, se examinaron las fotografías y se obtuvieron las medidas morfométricas del holotipo de *G. dryas* (B.M.1898.5.15.2: La Culata, Venezuela), disponible en el portal de datos del Museo de Historia Natural de Londres (Natural History Museum, 2014), y de los ejemplares colombianos custodiados por el Museo Field de Historia Natural de Chicago (FMNH 70981-82). Se obtuvieron, asimismo, las medidas de otros especímenes venezolanos, con el fin de comparar las muestras de ambos países.

Resultados

Gracilinanus dryas (Thomas, 1898)

Material examinado

Colombia, Norte de Santander, Pamplona, reserva El Volcán, entre las veredas El Totumo y Altogrande

CAY-137: Macho adulto. Escroto colgante con pelo blanco disperso. Marcada ausencia de la glándula gular. Ejemplar capturado el 25 de febrero de 2017 a 3.215 m s.n.m. Método de conservación: piel, cráneo y esqueleto parcial; **CAY-174:** Hembra adulta. Con fórmula mamaria en la región abdominal inguinal de 2-1-2=5 (der.-med.-izq.= total), dispuestos los pares de pezones laterales en configuración semicircular. Región mamaria naranja contrastante. Ejemplar capturada el 28 de agosto de 2017 a 3.214 m s.n.m. Método de conservación: en alcohol, cráneo extraído; **CAY-183:** Macho subadulto con parches melánicos de muda bajo la piel en las regiones de la cabeza, la cruz, el lomo y la grupa. Escroto pequeño recubierto de pelaje blanco contrastante y sujeto a la región inguinal. Ejemplar capturado el 31 de agosto de 2017 a 3.188 m s.n.m. Método de conservación: piel y cráneo; **CAY-184:** Macho subadulto. Escroto pequeño recubierto de pelaje blanco contrastante y sujeto a la región inguinal. Ejemplar capturado el 31 de agosto de 2017 a 3.179 m s.n.m. Método de conservación: en alcohol, cráneo extraído.

Colombia, Norte de Santander, Pamplona, sector La Lejía

ALR-02: Ejemplar adulto de sexo indeterminado, encontrado muerto cerca de una vía principal el 27 de marzo de 2017. Piel y cráneo parcialmente completos.

Observaciones

Los ejemplares de la reserva El Volcán se capturaron en trampas de caída no cebadas, de 25 cm de profundidad, ubicadas en las coordenadas 7°20'44,02"N- 72°40'54,41"O, entre los 3.155-3.216 m s.n.m (Figura 1), zona correspondiente al ecosistema de bosque altoandino según Van der Hammen & Otero, 2007 (Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2545/4019>). También se registraron en este lugar otras especies de pequeños mamíferos no voladores: *Cryptotis tamensis*, *Microroryzomys minutus*,

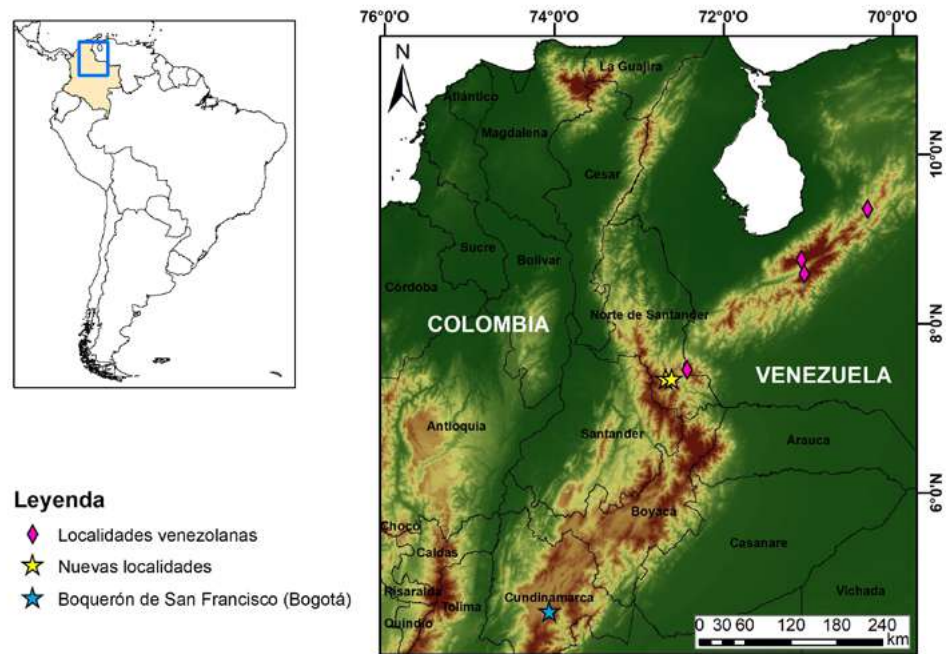


Figura 1. Nuevas localidades de registro de *Gracilinanus dryas* en la cordillera Oriental de Colombia y localidades históricas de la especie en el país y en Venezuela. La información sobre las localidades venezolanas se encuentra en la tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2545/????>.

Neomicroxus bogotensis, *Nephelomys meridensis*, *Rhipidomys fulviventor* y *Thomasomys hylophilus* (Angarita-Yanes, 2017). El ejemplar ALR-02 fue colectado a unos 7 km al este de la reserva (07°20'46,77"N; 72°36'47,42"O: 2.633 m s.n.m) por Alba Roa y Astrid Araque, docentes de la Universidad de Pamplona (Figura 1).

Identificación

Debido a que *Gracilinanus* se confunde frecuentemente con pequeños marsupiales de los géneros *Marmosa* y *Marmosops* (Pérez- Hernández *et al.*, 1994; Costa *et al.*, 2003), se tuvo en cuenta el siguiente conjunto de caracteres diferenciales para la identificación de los ejemplares: a nivel craneal, presencia exclusiva de fenestras maxilares en el paladar, en conjunto con las fenestras maxilopalatinas y palatinas; proceso anteromedial del ala timpánica del alisfenoides presente y crestas supraorbitales ausentes (en contraste con *Marmosa*); bula timpánica relativamente grande; caninos inferiores cortos y romos, sin llegar a ser premolariformes (Figura 2). A nivel externo, manos paraxónicas (dIII=dIV) (mesaxónicas en *Marmosops*: dIII>dIV); colas prensiles unicoloradas, mucho más largas que la longitud de cabeza-cuerpo (LCC: 75-130 mm), con escamas en disposición anular (disposición espiral en *Marmosa* y *Marmosops*) (Hershkovitz, 1992; Voss *et al.*, 2004; Voss & Jansa, 2009) (Figuras 3 y 4). Ahora bien, a semejanza de *Marmosa* y *Marmosops*, los *Gracilinanus* también presentan antifaces anchos y negros dilatados hacia el lateral del hocico (Figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2545/4019>) y las hembras carecen de marsupio (Voss & Jansa, 2009) (Figura 5C).

En comparación con las demás especies presentes en Colombia, *G. dryas* se diferencia de *G. marica* por tener un cráneo más alargado y estrecho, además de un proceso coronoide angosto y curvado, pelaje largo y sedoso de color castaño oscuro en el dorso y de un canela intenso en la región ventral (dorso castaño rojizo y vientre blanco en *G. marica*); en ambas especies la base de los pelos es de un color grisáceo, excepto en las mejillas y el mentón (Pérez- Hernández *et al.*, 1994; Creighton & Gardner, 2008; Voss *et al.*, 2009) (Figuras

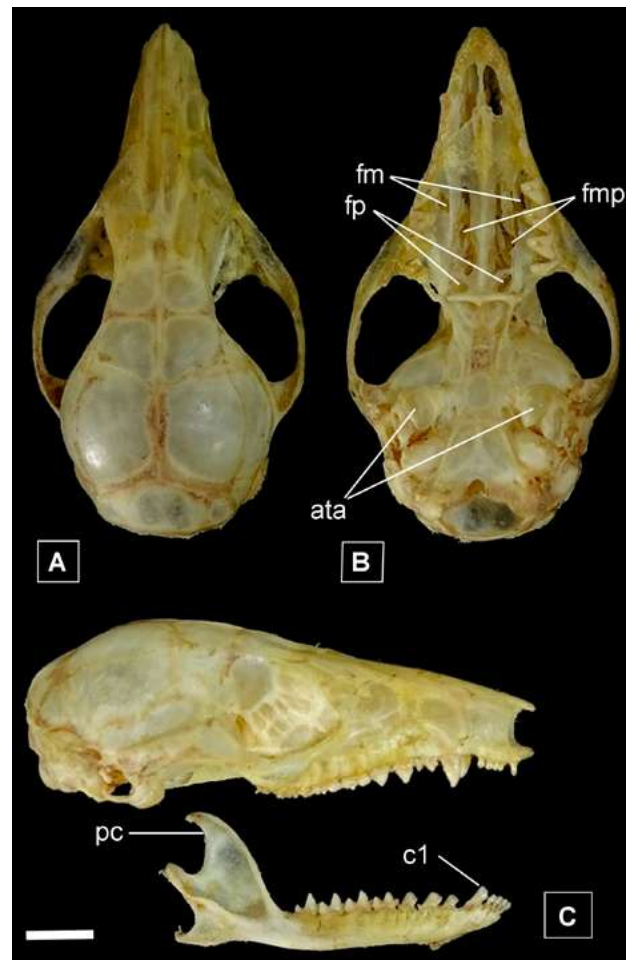


Figura 2. Cráneo de *Gracilinanus dryas*: vista dorsal (A), ventral (B) y lateral (C) del espécimen CAY-137. (ata): ala timpánica del alisfenoides; c1: canino inferior; fm: fenestras maxilares; fmp: fenestras maxilopalatinas; fp: fenestras palatinas; pc: proceso coronoide. Escala de la barra: 5 mm

2 y 3). En cuanto a *G. emiliae*, esta presenta unas marcadas márgenes supraorbitales en el cráneo, cúspide accesoria en el canino superior y fenestras maxilares pequeñas o ausentes, así como un pelaje castaño rojizo en el dorso y blanco no bicoloreado en la región ventral (Voss *et al.*, 2009).

En lo que atañe al pelaje dorsal, si bien en *G. dryas* se lo ha descrito como castaño oscuro (*chestnut brown* o *dark brown* en inglés), los especímenes de Pamplona (Figura 3), Mérida (B.M.1898.5.15.2) y Bogotá (FMNH 70981-82) presentaron una mayor afinidad con los matices de color leonado (*tawny*, es decir, un naranja-marrón), exhibiendo los de Pamplona una tonalidad intermedia entre la de estos tres ejemplares.

Biología reproductiva y ontogenia

Se hallaron diferencias externas entre los individuos adultos y subadultos, exceptuando sus dimensiones. Entre estas vale la pena destacar las siguientes: los adultos presentaron un pelaje largo, abundante y laxo (11 mm), con las colas de color canela; en los subadultos, por el contrario, el pelaje era un poco más corto (10 mm) y apelmazado, con las colas de color pardo rosáceo. En los adultos el pelaje de la grupa era más largo, con las escamas de la cola cubiertas de pequeñas cerdas plateadas y oscuras. Los subadultos, en cambio, no presentaban un pelaje largo en sus cuartos traseros y sus colas estaban cubiertas de finas cerdas plateadas (Figuras 3 y 4).



Figura 3. Vistas dorsal y ventral de un ejemplar adulto (CAY-137: A, C) y de un subadulto (CAY-183: B, D) de *Gracilinanus dryas*. Escala de la barra: 20 mm.

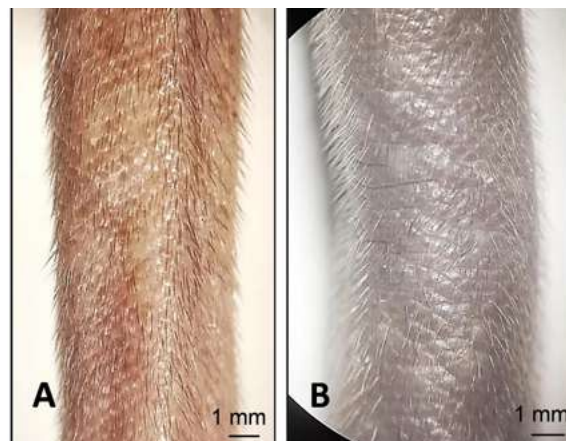


Figura 4. Detalle de las colas en CAY-137 (A) y CAY-183 (B); se aprecia la diferencia en sus tonalidades. Nótese las escamas en disposición anular.

En los ejemplares machos se advirtió un escroto recubierto de pelaje blanco en los subadultos CAY 183-84 (**Figura 5A**) y con escaso pelo en el adulto CAY-137 (**Figura 5B**). Asimismo, en este último individuo se encontró una coloración azulada en los testículos, aspecto también reportado en *G. agilis* y *G. microtarsus*, así como en varios pequeños y medianos marsupiales (Nogueira *et al.*, 2004). En cuanto a la región mamaria de las hembras, Hershkovitz (1992) señaló que en *Gracilinanus* no está pigmentada, sin embargo, en CAY-174 se evidenció una tonalidad naranja contrastante en la región abdominal inguinal (**Figura 5C**).

Medidas morfométricas

En la **tabla 1** se exponen los datos de morfometría de los ejemplares revisados de *G. dryas*. Los valores hallados fueron consistentes con los intervalos reportados para la especie, excepto en CAY-184, que mostró números bajos en LN y AC, así como en la LMS de CAY-137. Asimismo, los valores de AN fueron notoriamente más altos en los *G. dryas* de Bogotá.

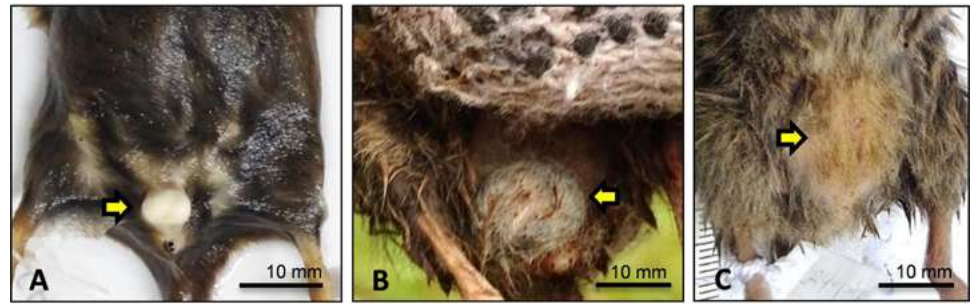


Figura 5. Algunos rasgos reproductivos en *Gracilinanus dryas*: (A) Escroto en un macho subadulto (CAY-184); (B) macho adulto (CAY-137); (C) campo mamario conspicuo en una hembra adulta (CAY-174)

Tabla 1. Medidas externas y cráneo-dentales (mm) de especímenes de *Gracilinanus dryas* procedentes de la cordillera Oriental de Colombia, y la cordillera de Mérida y el macizo de Tamá en Venezuela. Las muestras venezolanas están referenciadas en la **tabla 1S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2545/????>.

	Cordillera Oriental de Colombia					Cordillera de Mérida y macizo de Tamá ^a	
	Norte de Santander				Cundinamarca	Mérida, Táchira y Trujillo	
	CAY 183	CAY 184	CAY 137	CAY 174	ALR 02	FMNH 70981-82 ^b	
Edad	Subadulto	Subadulto	Adulto	Adulto	Adulto	Adultos	Adultos
Sexo	Macho	Macho	Macho	Hembra	Indeterminado	2 machos	4 machos; 3 hembras
LCC	89	92	100	105	—	106; 111	100 (94-112) 7
LC	146	140	135	145	—	145; 145	148,7 (132-158) 7
P	18	18	17	17	—	18; 19	18 (17-19) 7
O	18	18	20	19	—	19; 19	19,1 (16-21) 7
LCB	26,9	26,2	27,0	27,9	—	27,8; 27,5	27,0 (26,2-28,2) 7
LN	12,0	11,0	12,2	13,1	11,9	13,1; 12,1	12,3 (11,8-13,0) 6
AN	3,1	3,1	3,1	3,2	3,0	4,1; 3,7	3,2 (3,0-3,4) 7
CIO	5,1	4,8	5,0	5,3	4,9	5,0; 5,2	5,0 (4,9-5,1) 7
AC	14,2	13,9	14,9	14,9	14,3	[15,0; 14,5] ^c	14,5 (14,3- 14,8) 7
LP	15,7	14,9	15,4	16,0	15,4	15,7; 15,8	15,3 (14,9-16,0) 6
AP	8,3	8,2	8,6	8,7	8,3	8,2; 8,2	8,2 (7,9-8,5) 7
C-M4	11,0	10,5	10,2	10,9	10,5	10,3; 10,5	10,5 (10,2-10,9) 7
LMS	5,5	5,6	5,0	5,3	5,3	5,4; 5,5	5,6 (5,4-5,8) 7
M1-M3	4,7	4,7	4,4	4,8	4,7	4,4; 4,5	4,8 (4,6-5,0) 7
LCC/LC	1,64	1,52	1,35	1,38	—	1,36; 1,30	1,49 (1,19- 1,68) 7

^aSe presenta la media, el rango observado (entre paréntesis) y el tamaño de la muestra.

^bLCC, LC, P, y O tomadas de Hershkovitz (1992)

^cArcos cigomáticos de la derecha rotos

Discusión

De los cuatro individuos de *G. dryas* procedentes de la reserva, tres fueron recolectados en el mes de agosto (dos machos subadultos y una hembra adulta). En el sitio hay un aumento progresivo de la precipitación en agosto, que alcanza un pico máximo de lluvias en octubre

(Murcia-Rodríguez, 2012), en tanto que el otro individuo fue capturado en febrero, un mes de transición entre el periodo más seco y uno más húmedo en abril. Por ello sería importante indagar en muestreos posteriores si la estacionalidad de las lluvias incide en los patrones de actividad reproductiva y en la dispersión de inmaduros de esta especie.

En cuanto a la ausencia de la glándula gular en CAY-137 (Figura 3C), Voss & Jansa (2009) evidenciaron que los signos externos del desarrollo glandular, como un parche sin pelos o la decoloración de la zona, tienden a estar bien desarrollados en machos maduros de *Gracilinanus*, así que este ejemplar, a pesar de ser un macho adulto, no se encontraría en su estadio máximo de madurez, lo que se confirma por su menor tamaño con respecto a la hembra adulta CAY-174 (Tabla 1). Según Hershkovitz (1992), los machos son más grandes que las hembras de la misma edad. No obstante, géneros que exhiben glándulas gulares en sus estadios adultos, como *Marmosa*, *Marmosops* y *Monodelphis*, incluyen algunas especies que no llegan a desarrollarlas (Voss & Jansa, 2009). Este aspecto se podría evaluar mejor a medida que se obtengan más ejemplares machos de *G. dryas* o se revisen con detalle muestras ya existentes.

Con referencia a la pigmentación de los testículos en CAY-137, autores como Nogueira *et al.* (2004) mencionan que, aun cuando se ha sugerido un posible vínculo de este rasgo con la regulación de la temperatura corporal en las gónadas, hasta el momento no parece haber correlación con las condiciones climáticas locales, aunque este es un tema poco abordado que debe considerarse en futuras investigaciones. En cuanto a CAY-174, su fórmula mamaria (2-1-2=5) es la primera que se conoce para la especie, aunque difiere de las encontradas en otros miembros del género: *G. microtarsus* (5-1-5=11), *G. agilis* (4-1-4=9), *G. marica* (3-1-3=7). Sin embargo, hay que señalar que estos datos corresponden a muestras muy pequeñas y que, además, el carácter parece variar dependiendo del tamaño de la camada y del uso o no de las mamas (Hershkovitz, 1992).

Por otro lado, las variaciones halladas en el pelaje y la morfología de *G. dryas* pueden obedecer a simples disimilitudes intraespecíficas regidas por la ontogenia, la sexualidad, la geografía e, incluso, el comportamiento, como se ha visto en el género *Monodelphis* (Pavan, 2022). Sin embargo, Voss (2022) ha reportado rasgos corporales muy variados en ejemplares de la cordillera de Mérida que podrían corresponder a especies distintas. Se señala también que la especie ha recibido poca atención en los procesos de revisión y, hasta el momento, no ha sido incluida en ningún análisis filogenético, a pesar de que su estatus taxonómico con respecto a *G. marica* es incierto. Por consiguiente, se requeriría de un mayor número de especímenes de *G. dryas* para un exhaustivo estudio morfológico y molecular que pueda dilucidar estas cuestiones.

También sería necesario evaluar si existe un flujo génico permanente entre las poblaciones de *G. dryas* de la cordillera de Mérida y de la cordillera Oriental de Colombia, más aún cuando entre estas masas orográficas existe una brecha altitudinal, conocida como la depresión del Táchira (960 m s.n.m.), un valle árido cuya repercusión en la distribución de especies de mamíferos ya se ha demostrado (Gutiérrez *et al.*, 2015). Aunque los datos morfométricos expuestos en la tabla 1 son de ejemplares procedentes de uno y otro lado de la depresión, no se evidenciaron discrepancias visibles, por lo que sólo la genética podría terminar de confirmarlas o refutarlas.

En general, la diversidad de especies de *Gracilinanus* está todavía subestimada, y se requieren muestreos adicionales que permitan esclarecer los verdaderos límites de su distribución y la composición real del grupo (Semedo *et al.*, 2015). En Colombia se han identificado tres especímenes de este género que podrían corresponder a un nuevo taxón, ya que sus características difieren de las especies hasta ahora reportadas (Voss *et al.*, 2009). Por ello, es muy probable que sus miembros se incrementen con futuros trabajos de revisión (Voss & Jansa, 2009).

Los nuevos registros de *G. dryas* distan unos 23 km al suroeste de la localidad más cercana de la especie en Venezuela (estado Táchira) y unos 338 km al norte de Bogotá, lo que implica un amplio vacío de su distribución sobre la cordillera Oriental de Colombia en los departamentos de Santander y Boyacá (Figura 1). Pérez-Hernández *et al.* (2016)

consideran a *G. dryas* es una especie rara y difícil de atrapar debido a sus hábitos arbóreos, aunque suele buscar frutas, insectos y otros pequeños invertebrados en el suelo del bosque. Es en estas ocasiones que puede ser capturada en trampas de caída, como ocurrió con los ejemplares de la reserva El Volcán. Esta metodología ha demostrado ser un buen complemento para registrar especies poco conocidas (Umetsu *et al.*, 2006), por lo tanto, su uso debería contemplarse siempre que se pueda en muestreos de micromamíferos terrestres.

La razón de que hasta ahora no se hubieran reportado nuevos individuos de *G. dryas* en Colombia involucra varios aspectos: Gómez-Valencia *et al.* (2021) recopilaron 35 estudios de pequeños mamíferos no voladores presentes en las tres cordilleras colombianas (algunos datan de los años 80), y encontraron una mayor representación en la cordillera Oriental (50 %), sobre todo en localidades por encima de los 2.500 m s.n.m. En este extenso ramal andino se han hecho trabajos sobre el grupo, por lo que la ausencia de registros de la especie no necesariamente se debe a la falta de muestreo, sino, probablemente, a que no se emplearon métodos como el de las trampas de caída y a la rareza de estos marsupiales.

Sin embargo, tampoco puede descartarse el hecho de que la presencia de *Gracilinanus* en el país esté subestimada debido a la identificación errónea de ejemplares. Cada tanto se observan supuestos individuos de *Marmosa* y *Marmosops* sin un epíteto específico en listados correspondientes a ecosistemas montanos del país, lo que arroja dudas sobre sus verdaderas afiliaciones. Si a esto se suma la ausencia de capturas y de una revisión detallada por parte de taxónomos expertos, algunos *Gracilinanus* podrían pasar desapercibidos. Son varios los factores que podrían aplicarse también a especies poco conocidas. En consecuencia, se recomendaría un examen cuidadoso de estos especímenes para validar sus identidades taxonómicas.

En cuanto a su reciente categorización en Colombia como especie en peligro (EN), reservas como El Volcán pueden constituirse en refugios tanto de *G. dryas* como del resto de la fauna andina que presente algún riesgo (López-Arévalo *et al.*, 2021). Estas áreas estratégicas terminan funcionando como archipiélagos y conservando las diversidades alfa y beta, especialmente en ecosistemas montañosos y fragmentados por la intervención antrópica (Moctezuma *et al.*, 2018). Ante esto, se sugiere la búsqueda de ejemplares en las áreas protegidas establecidas a lo largo de la cordillera Oriental, así como una evaluación más detallada del estado de sus poblaciones.

Por lo pronto, con estos nuevos registros se busca incentivar el estudio de la especie y, en general, de los *Gracilinanus*, que son tan poco conocidos y que merecen la mayor atención. Que los apuntes aquí presentados sean el punto de partida de nuevas preguntas y futuras investigaciones en torno a estos enigmáticos marsupiales.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2545/4019>

Agradecimientos

Al guardabosque de la reserva El Volcán, Gerardo Carvajal, por su colaboración durante mi estancia en la zona. A la Colección Zoológica de la Universidad de Pamplona por recibir los especímenes y permitirme su revisión. Al biólogo Alberto Peña por las fotografías de las figuras 2 y 3. A Robert S. Voss, curador del departamento de Mastozoología del Museo Americano de Historia Natural (Nueva York, Estados Unidos), por facilitarme las medidas de los especímenes venezolanos. A Lauren Nassef y Adam Ferguson del Museo Field de Historia Natural de Chicago por las fotos y medidas de los ejemplares FMNH 70981-82. A los revisores por sus comentarios y sugerencias.

Conflicto de intereses

El autor no declara ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Angarita-Yanes, C. E.** (2017). *Preferencia de microhábitat de pequeños mamíferos no voladores en un sector de bosque alto andino del municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia* [Trabajo de Pregrado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Huloago Universidad de Pamplona. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/698>
- Brown, B. E.** (2004). Atlas of New World Marsupials. *Fieldiana Zoology (new series)* 102, 1-308. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.3410>
- Costa, L. P., Leite, Y. L., Patton, J. L.** (2003). Phylogeography and systematic notes on two species of gracile mouse opossums, genus *Gracilianus* (Marsupialia: Didelphidae) from Brazil. *Proceedings-Biological Society of Washington*, 116(2), 275-292.
- Creighton, G.K. & Gardner A.L.** (2008). Genus *Gracilianus* Gardner and Creighton, 1989. En A.L. Gardner. (Ed.), *Mammals of South America Vol. 1. Marsupials, Xenarthrans, Shrews, and Bats* (43-50). Chicago University Press.
- Cuartas-Calle, C. & Arango, J. M.** (2003). *Marsupiales, cenoléstidos e insectívoros de Colombia*. Editorial Universidad de Antioquia.
- D'Elía, G. & Martínez, J.A.** (2006). Registros uruguayos de *Gracilianus* Gardner y Creighton, 1989, y *Cryptonanus* Voss, Lunde y Jansa, 2005 (Didelphimorphia, Didelphidae). *Mastozoología Neotropical*, 13(2), 245-249.
- Gómez-Valencia, B., López-Arévalo, H. F., Gómez-Laverde, M.** (2021). Pequeños mamíferos no voladores de la Reserva Rio Blanco y aporte de localidades para la identificación de patrones ecológicos en los Andes colombianos. *Caldasia*, 43(2), 396-399. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v43n2.85463>
- Gutiérrez, E. E., Maldonado, J. E., Radosavljevic, A., Molinari, J., Patterson, B. D., Martínez-C., J. M., Rutter, A. R., Hawkins, M. T. R., Garcia, F. J., Helgen, K. M.** (2015). The taxonomic status of *Mazama bricenii* and the significance of the Táchira depression for mammalian endemism in the Cordillera de Mérida, Venezuela. *Plos one*, 10(6), 24pp. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129113>
- Handley Jr, C. O.** (1976). Mammals of the Smithsonian Venezuelan project. *Brigham Young University Science Bulletin, Biological Series*, 20(5), 1-89. <https://doi.org/10.5962/bhl.part.5667>
- Hershkovitz, P.** (1992). The South American gracile mouse opossums, genus *Gracilianus* Gardner and Creighton, 1989 (Marmosidae, Marsupialia): a taxonomic review with notes on general morphology and relationships. *Fieldiana Zoology (new series)* 39: i-vi, 1-56. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.3521>
- López-Arévalo, H. F., Liévano-Latorre, L. F., Díaz, O. L. M.** (2021). El papel de las pequeñas reservas en la conservación de mamíferos en Colombia. *Caldasia*, 43(2), 354-365. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v43n2.85466>
- Moctezuma, V., Halffter, G., Arriaga-Jiménez, A.** (2018). Archipelago reserves, a new option to protect montane entomofauna and beta-diverse ecosystems. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3), 927-937. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3.2446>
- Murcia-Rodríguez, M. A., Ochoa-Reyes, M. P., Poveda-Gómez, F. E.** (2012). Respiración del suelo y caída de hojarasca en el matorral del bosque altoandino (Cuenca del Río Pamplonita, Colombia). *Caldasia*, 34(1), 165-185.
- Natural History Museum** (2014). *Specimens* (from *Collection specimens*) [Data set resource]. Natural History Museum. <https://data.nhm.ac.uk/dataset/collection-specimens/resource/05ff2255-c38a-40c9-b657-4ccb55ab2feb>
- Nogueira, J. C., Castro, A. C. S., Câmara, E. V. C., Câmara, B. G. O.** (2004). Morphology of the male genital system of *Chironectes minimus* and comparison to other didelphid marsupials. *Journal of Mammalogy*, 85(5), 834-841. <https://doi.org/10.1644/207>
- Olmos, M. N., d'Hiriart, S., Teta, P.** (2019). Nuevos registros para el género *Gracilianus* Gardner & Creighton 1989 (Didelphimorphia, Didelphidae) en Argentina, con comentarios sobre su situación taxonómica. *Notas Sobre Mamíferos Sudamericanos*, 1(1), 1-7. <https://doi.org/10.31687/saremnms.19.0.08>
- Pavan, S. E.** (2022). Short-Tailed Opossums Genus *Monodelphis*: Patterns of Phenotypic Evolution and Diversification. En *American and Australasian Marsupials: An Evolutionary, Biogeographical, and Ecological Approach* (pp. 1-21). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08419-5_10

- Pérez- Hernández, R., Soriano, P., Lew, D.** (1994). *Marsupiales de Venezuela*. Cuadernos Lagoven, Caracas, Venezuela.
- Pérez-Hernández, R., Ventura, J., López- Fuster, M.** (2016). *Gracilinanus dryas*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.20161.RLTS.T9418A22169714>
- Ramírez-Chaves, H. E., Leuro-Robles, N. G., Castaño-Rivera, A., Morales-Martínez, D. M., Suárez-Castro, A. F., Rodríguez-Posada, M. E., Zurc, D., Concha-Osbahr, D. C., Trujillo, A., Noguera-Urbano, E. A., Pantoja-Peña, G. E., González-Maya, J. F., Pérez-Torres, J., Mantilla-Meluk, H., López-Castañeda, C., Velásquez-Valencia, A., Zárrate-Charry, D.** (2024): Mamíferos de Colombia. v1.14. Sociedad Colombiana de Mastozoología. Dataset/ Checklist. <https://doi.org/10.15472/k11whs>
- Resolución 0126 de 2024** [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se establece el listado oficial de las especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica continental y marino costera, se actualiza el Comité Coordinador de Categorización de las Especies Silvestres Amenazadas en el territorio nacional y se dictan otras disposiciones. 06 de febrero de 2024.
- Semedo, T. B. F., Brandao, M. V., Carmignotto, A. P., Da Silva Nunes, M., Farias, I. P., Da Silva, M. N. F., Rossi, R. V.** (2015). Taxonomic status and phylogenetic relationships of *Marmosa agilis peruana* Tate, 1931 (Didelphimorphia: Didelphidae), with comments on the morphological variation of *Gracilinanus* from central-western Brazil. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 173(1), 190-216. <https://doi.org/10.1111/zoj.12203>
- Sierra-Leal, J.A., Sarmiento, J., Carrero, D., Acevedo, A., Rodríguez, P.** (2023). Colección de Zoología General de la Universidad de Pamplona. Version 2.4. Universidad de Pamplona. Dataset/Occurrence. <https://doi.org/10.15472/qmwz8a>.
- Umetsu, F., Naxara, L., Pardini, R.** (2006). Evaluating the efficiency of pitfall traps for sampling small mammals in the Neotropics. *Journal of Mammalogy*, 87(4), 757-765. <https://doi.org/10.1644/05-mamm-a-285r2.1>
- Van der Hammen, T. & Otero, G. J.** (2007). Los páramos: archipiélagos terrestres en el norte de los Andes. En M. Morales et al., (Eds). *Atlas de páramos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Voss, R.S., Lunde, D.P., Simmons, N.B.** (2001). The mammals of Paracou, French Guiana: A Neotropical rainforest fauna. Part 2. Nonvolant species. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 263, 1-236. [https://doi.org/10.1206/0003-0090\(2001\)263<0003: tmopfg>2.0.co;2](https://doi.org/10.1206/0003-0090(2001)263<0003: tmopfg>2.0.co;2)
- Voss, R. S., Tarifa, T., Yensen, E.** (2004). An introduction to *Marmosops* (Marsupialia: Didelphidae), with the description of a new species from Bolivia and notes on the taxonomy and distribution of other Bolivian forms. *American Museum Novitates*, 2004(3466), 1-40. [https://doi.org/10.1206/0003-0082\(2004\)466<0001:aitmmd>2.0.co;2](https://doi.org/10.1206/0003-0082(2004)466<0001:aitmmd>2.0.co;2)
- Voss, R. S., Lunde, D. P., Jansa, S. A.** (2005). On the contents of *Gracilinanus* Gardner and Creighton, 1989, with the description of a previously unrecognized clade of small didelphid marsupials. *American Museum Novitates*, 2005 (3482), 1-36. [https://doi.org/10.1206/0003-0082\(2005\)482\[0001:otcogg\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1206/0003-0082(2005)482[0001:otcogg]2.0.co;2)
- Voss, R. S., Fleck, D. W., Jansa, S. A.** (2009). On the diagnostic characters, ecogeographic distribution, and phylogenetic relationships of *Gracilinanus emiliae* (Didelphimorphia: Didelphidae: Thylamyini). *Mastozoología Neotropical*, 16(2), 433-443.
- Voss, R. S. & Jansa, S. A.** (2009). Phylogenetic relationships and classification of didelphid marsupials, an extant radiation of New World metatherian mammals. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 322, 1-177. <https://doi.org/10.1206/322.1>
- Voss, R. S.** (2022). An annotated checklist of recent opossums (Mammalia: Didelphidae). *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 455(1), 1-76. <https://doi.org/10.1206/0003-0090.455.1.1>

Artículo original

La ecología dinámica del hábito alimentario de alevines de bocachico (*Prochilodus magdalenae*) en condiciones controladas

Dynamic ecology of bocachico (*Prochilodus magdalenae*) fingerlings' feeding habits under controlled conditions

Masashi Takatsuka

Exvoluntario Técnico de Acuicultura, Agencia de Cooperación Internacional del Japón - JICA, Bogotá, Colombia

Resumen

Diversas investigaciones han aportado conocimientos biológicos y ecológicos sobre el bocachico (*Prochilodus magdalenae*). Aunque se pensaba que el bocachico no aceptaría alimento concentrado debido a sus hábitos alimentarios naturales, se demostró que ingería alimento concentrado en forma de tortas húmedas. Por otro lado, la curva de crecimiento de las postlarvas puede considerarse un modelo de referencia para el manejo adaptado a cada etapa en un programa de producción, pues los resultados de las pruebas con el método de *bootstrap* han evidenciado una distribución normal, lo que indica que las condiciones de cría, entre ellas, la calidad y la cantidad de alimento, así como otros factores, han sido apropiadas. También se observó que las postlarvas cambiaban sus hábitos alimentarios, pasando del consumo de zooplancton al de organismos presentes en el bentos, y que cuando no había presas en el fondo del estanque de cría, migraban hacia la superficie y allí adoptaban el comportamiento de alimentación llamado “boqueo”; en ese momento las postlarvas tomaban la torta húmeda y se dirigían al fondo para consumirla. Este modelo de hábito alimentario puede considerarse similar al que ocurre en la naturaleza, cuando, después de alimentarse de zooplancton, los bocachicos se dirigen al fondo y se alimentan de flóculos de materia orgánica y fitoplancton. Este es un hallazgo importante para el desarrollo de técnicas de acuicultura sostenible de la especie. Por otra parte, durante el período de alimentación con zooplancton, las postlarvas toman selectivamente cladóceros, principalmente *Moina micrura*, debido a su tamaño y gran capacidad reproductiva; esta especie, además, sufre una descomposición física al pasar por la faringe y el tracto digestivo y su fluido protoplasmático se absorbe directamente en forma de nutrientes, lo que es una característica crucial de alimento vivo ideal para las postlarvas. Se encontró, igualmente, que cuando la cantidad y calidad del zooplancton, particularmente de *M. micrura*, son altas durante la etapa de postlarva, los individuos tienen un crecimiento saludable y rápido. Por último, el estudio del índice intestinal relativo y del contenido digestivo sugiere que el cambio en los hábitos alimentarios comienza cuando las postlarvas alcanzan una longitud de aproximadamente 18 mm y adquieren una capacidad digestiva similar a la de los peces de tallas entre 25 y 30 mm.

Palabras clave: *Prochilodus magdalenae*; Selectividad alimentaria; *Moina micrura*; Índice relativo intestinal.

Abstract

Research has provided biological and ecological knowledge about the bocachico (*Prochilodus magdalenae*). Although this species was believed not to accept concentrated feed due to its natural feeding habits, studies have shown that it does in the form of moist cakes. Besides, the postlarvae growth curve can be considered a reference model for management techniques adapted to each stage in a production program. Indeed, bootstrap test results showed a normal distribution, indicating that the rearing conditions (e.g., quality and quantity of feed) and other factors were appropriate. Also, the postlarvae changed their feeding habits, transitioning from consuming zooplankton to organisms in the benthos. When there was no prey at the bottom of the rearing pond, the postlarvae migrated to the surface and adopted the feeding behavior of “gassing for air”; at this moment, they were provided

Citación: Takatsuka M. La ecología dinámica del hábito alimentario de alevines de bocachico (*Prochilodus magdalenae*) en condiciones controladas. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):325-340, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.2386>

Editor: Arturo Acero

Correspondencia:

Masashi Takatsuka;
estuche8426@gmail.com

Recibido: 28 de noviembre de 2023

Aceptado: 13 de mayo de 2024

Publicado en línea: 6 de junio de 2024



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

with moist cakes, which they took and then moved to the bottom of the pond to consume them. This model is fairly similar to the bocachico natural way of feeding, where, after taking the zooplankton, they move towards the bottom and feed on organic matter floccules and phytoplankton. This is an important finding for the development of sustainable aquaculture techniques for the bocachico. Additionally, during the zooplankton feeding period, they selectively feed on cladocerans, mainly *Moina micrura*, due to their size and high reproductive capacity. *M. micrura* undergoes physical decomposition as it passes through the pharynx and digestive tract, and its protoplasmic fluid is directly absorbed as nutrients, a crucial characteristic of the ideal live food for the postlarvae. When the quantity and quality of zooplankton, particularly *M. micrura*, are high during the postlarval stage, the individuals grow healthily and rapidly. Finally, the relative intestinal index and the digestive tract content suggested that the change in feeding habits begins when the postlarvae reach a total length of approximately 18 mm and their digestive capacity resembles that of adult fish upon reaching a 25-30 mm length.

Keywords: *Prochilodus magdalenae*; *Moina micrura*; Intestinal relative index.

Introducción

Según datos proporcionados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el panorama acuícola en Colombia refleja una distribución desigual en cuanto a las especies cultivadas (**Minagricultura**, 2021). En el 2020 la producción se concentró principalmente en la tilapia, la trucha arcoíris y las cachamas blancas y negras, con cerca de un 93 % del total, en tanto que el bocachico y otras especies representaron el 7 % restante. Esta preocupante situación ha llevado a que el bocachico sea clasificado como una especie vulnerable (VU) (A2c, d) (**Mojica et al.**, 2012). La disminución significativa en la captura de bocachico desde la década de 1990 y el peligro de su extinción, subrayan la urgencia de implementar medidas de conservación y manejo sostenible para esta especie emblemática de la ictiofauna colombiana. Como resultado de esta situación, se importan alrededor de 10,000 Tn de una especie similar, el sábalo (*Prochilodus lineatus*), desde Argentina y Uruguay (**Boletín Estadístico Pesquero**, 2018; **Puertonegocios**, 2019).

Se ha observado que el bocachico se alimenta de barro con materia orgánica acumulado en el fondo de las ciénagas, lo que ha llevado a recomendar su uso en policultivo con peces omnívoros, o en bajas densidades sin alimentación, en estanques de tierra (**Torres & Cohen**, 1993; **García**, 2011). En cuanto a las técnicas de reproducción, hay informes sobre la inducción al desove utilizando hormonas (**Cordero et al.**, 2003; **García et al.**, 2013) y sobre el uso de nauplios de artemia y rotíferos como alimentos vivos en la fase de postlarvas (**Atencio et al.**, 2003; **Prieto & Atencio**, 2008; **Quintero et al.**, 2009). En cuanto al contenido nutricional del alimento concentrado para peces, se han llevado a cabo estudios utilizando alimentos granulados que, cuando tienen un buen equilibrio de aminoácidos, favorecen un crecimiento adecuado (**González & Wills**, 2003; 2009; **González et al.**, 2005).

El bocachico es la especie piscícola más importante para las economías locales y los pescadores artesanales de las ciénagas, así como para la investigación biológica. Sin embargo, la información sobre las técnicas de acuicultura de la especie es limitada. En ese contexto, se hizo un primer experimento alimentando a alevines de bocachico con tortas húmedas para demostrar su capacidad de consumir alimentos concentrados. Se observó que los juveniles y adultos estaban muy alertas y eran sensibles a la mayoría de los movimientos y sonidos del entorno. Además, se determinó que los alimentos concentrados comerciales para peces disponibles en el mercado no eran adecuados para la estructura morfológica y la función bucal de los juveniles y adultos de bocachico. Así mismo, se descubrió que la depredación de larvas de libélula afectaba la supervivencia de los alevines y se observó una mejora significativa en la supervivencia al cubrir los estanques de cría con una malla de 1,27 cm de ojo. Además, se encontraron grandes cantidades de cladóceros en los contenidos del tracto digestivo en los lotes de producción de alevines con mayor número de individuos. En países asiáticos, durante mucho tiempo se han criado los cladóceros en gran densidad utilizando estiércol de pollo fermentado (gallinaza), y en los últimos años, se

ha revisado su utilidad y eficiencia económica como alimento vivo (Nakamoto *et al.*, 2007; Mehrajuddin & Altaff, 2011). En este contexto, se ha investigado el uso de *M. micrura* (Fuentes-Reinés *et al.*, 2019) como alimento vivo para en la producción de postlarvas de bocachico. En este sentido, se llevaron a cabo estudios biológicos y ecológicos orientadas a la cría de alevines de bocachico utilizando *M. micrura*.

Materiales y métodos

Producción de larvas

La producción de alevines comenzó el 26 de septiembre de 2019. Se indujo el desove de una hembra madura y dos machos mediante la aplicación de ovaprim (análogo de la hormona liberadora de gonadotropina del salmón) vía intramuscular. Este procedimiento se llevó a cabo en un estanque circular de cemento de 3 Tn con flujo de agua constante a una temperatura promedio de 25 °C. Se obtuvieron aproximadamente 30,000 larvas que, en dos días, se habían convertido en postlarvas, las cuales fueron trasladadas a un estanque de cemento de 250 Tn ubicado en el exterior del laboratorio.

Desarrollo de postlarvas

La metodología de cría empleada en este estudio se basa en técnicas ampliamente conocidas en el campo de la piscicultura de agua dulce. Es bien sabido que en los estanques de barro utilizados para la cría de carpas (*Cyprinus carpio*) se observa una alta densidad de zooplancton. Sin embargo, en este estudio la metodología fue específica para la cría de postlarvas de bocachico. Dos días antes de la transferencia de las postlarvas al estanque de cría externo (250 Tn), se utilizó un sifón para tomar el agua de un estanque de barro donde se cultivaban carpas (*Cyprinus carpio*) y se había observado abundancia de zooplancton, especialmente de *M. micrura*. Varias especies de zooplancton se habían multiplicado mediante la fermentación con gallinaza. Luego, se añadió agua fresca al estanque de cría de las postlarvas, así como 10 kg de urea disuelta en agua y 1 kg de gallinaza fermentada para promover el crecimiento de las microalgas y, principalmente, de *M. micrura*. La temperatura del agua en el estanque de cría de las postlarvas varió entre 24 y 26 °C; se instaló una línea de aireación proveniente de una bomba industrial (Blower) para mantener el nivel de oxígeno adecuado.

Durante la etapa de postlarva se muestrearon diariamente más de 30 individuos y se midió la longitud total del cuerpo. En los últimos tres días se muestrearon aproximadamente 120 individuos. Se obtuvo una curva de crecimiento basada en los resultados y se generó una figura de distribución. Estos análisis permitieron conocer el crecimiento y el estado de desarrollo de las postlarvas, y el impacto de *M. micrura* como alimento vivo.

Además, para evaluar el estado de desarrollo de las postlarvas, se hizo una prueba de *bootstrap* utilizando los datos de longitud corporal medidos. Esta prueba estima la distribución calculando la estadística para múltiples remuestreos aleatorios de los datos originales (Yoshimura, 2014). Aquí se utilizó Microsoft Excel 2016 MSO para realizar 1.000 remuestreos por cada día de muestreo y estimar la media y el intervalo de confianza de 95 % de la longitud corporal. Para el remuestreo se utilizó la función “muestreo aleatorio de la población” de Excel, utilizando el método de percentiles para calcular los intervalos de confianza, lo que permitió la evaluación estadística de la tendencia de crecimiento de las postlarvas.

Experimento sobre la selectividad alimentaria de las postlarvas

Con el fin de obtener un conocimiento ecológico más detallado de la interacción trófica entre las postlarvas y *M. micrura*, se observó el comportamiento de selectividad alimentaria de cinco postlarvas utilizando zooplancton concentrado, principalmente *M. micrura*, copépodos y rotíferos en frascos de un litro con filtrado del estanque exterior durante el primer día de cría. Las postlarvas se dejaron en el frasco durante una hora y luego se recolectaron. Posteriormente, mediante laparotomía se observó el contenido del tracto digestivo de *M. micrura*, de los copépodos y de los rotíferos. Se contaron las cantidades de cada uno y se midió la altura corporal de *M. micrura* separada de las postlarvas.

Observación en el estanque de cría de 250 Tn

Durante el período hasta la cosecha, se monitoreaba visualmente el estanque de cría a las 7:00, 11:00, 13:00 y 15:00 horas para observar el movimiento específico en la superficie del agua del estanque. Es necesario señalar que la metodología de observación empleada en este estudio se fundamenta en la experiencia del investigador en el campo de la acuicultura, y no en un protocolo específico citado en la literatura. Sin embargo, constituye una herramienta básica para la recopilación de datos en estudios de este tipo, debido a diferencias en las condiciones ambientales, especies cultivadas y recursos disponibles.

Reproducción de *M. micrura*

Con el fin de comprender la tendencia de reproducción de *M. micrura* en el estanque de cría, se recolectó diariamente a las 7:00 am un litro de agua agitado por aireación, y se contabilizó el número de individuos de *M. micrura*, como parte de las tareas rutinarias de monitoreo en la gestión de la cría de postlarvas. A partir del número de individuos obtenido, se calculó la densidad y se evaluó de manera integral el estado de *M. micrura* en el estanque de cría, así como de la alimentación y el crecimiento de las postlarvas. Dado que no se ha establecido una técnica para controlar directamente la proliferación de *M. micrura*, estas observaciones permitieron determinar si se estaba manteniendo la densidad de alimento necesaria para un crecimiento saludable de las postlarvas.

Índice relativo intestinal

Para evaluar el desarrollo de la función digestiva, se calculó el índice relativo intestinal (IRI) (Nakagawa, 2002). Este índice se obtiene dividiendo la longitud del tracto digestivo por la longitud total del cuerpo. El IRI se midió en individuos en diferentes etapas de desarrollo, desde postlarvas hasta peces adultos. Para obtener las medidas necesarias, se diseccionaron postlarvas para extraer el tracto digestivo y colocarlo en un portaobjetos o placa de Petri. A medida que los peces crecen, el intestino se pliega, por lo que se intentó enderezarlo mediante una disección cuidadosa. Sin embargo, no siempre fue posible lograr una extensión completamente recta del intestino. Por esta razón, los valores del IRI calculados se consideraron una estimación aproximada de la relación entre la longitud del tracto digestivo y la del cuerpo.

Resultados

Crecimiento y desarrollo de postlarvas

Después del desove, la fecundación y la eclosión, se obtuvieron aproximadamente 30,000 larvas, las cuales se convirtieron en postlarvas con la apertura de la boca al cabo de dos días de la eclosión. Al tercer día se trasladaron al estanque de cemento de 250 Tn ubicado en el exterior del laboratorio, donde se criaron durante 12 días. Al final de este período de crianza, las postlarvas alcanzaron una longitud total media del cuerpo de 24,17mm y fueron cosechadas, con una tasa de supervivencia de aproximadamente 73 %. (**Figura 1 y tabla 1**).

En el momento de la cosecha, en el día 12 de cría, los valores reales de la longitud total del cuerpo no mostraron una distribución normal. Para explorar la verdadera tendencia de la población de postlarvas en el estanque de cría de 250 Tn, se hizo una prueba de *bootstrap* (Yoshimura, 2013). Se estimaron distribuciones basadas en los valores reales de los tres días anteriores, incluido el día de la cosecha. Todas estas distribuciones estimadas mostraron una distribución cercana a la normal (**Figura 2**).

Selectividad alimentaria de postlarvas según el experimento

Las postlarvas fueron observadas alimentándose selectivamente de Cladoócera, especialmente de *M. micrura*. Se preparó un frasco con un litro con zooplancton de muy alta densidad, filtrado del estanque de cría a través de un tamiz de 150 μ m. A pesar de la presencia de una gran densidad de copépodos y rotíferos en el frasco, las postlarvas se alimentaron selectivamente de 54 individuos de *M. micrura* y un crustáceo de la clase Ostracoda.

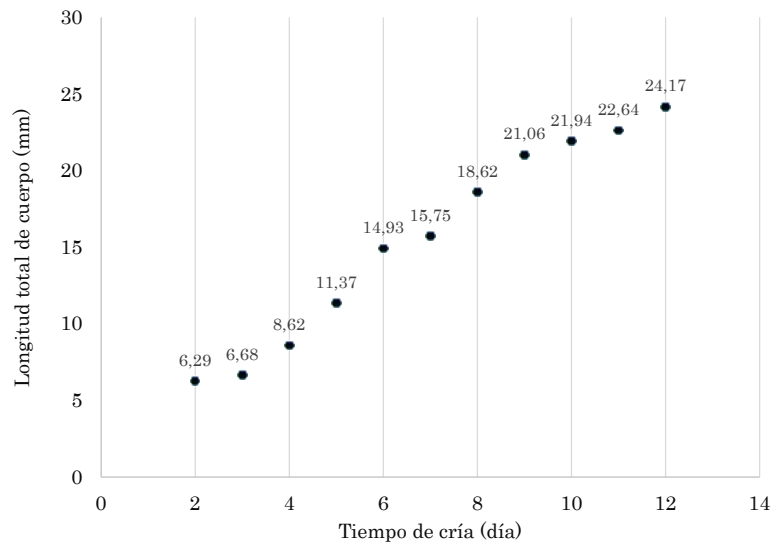


Figura 1. Crecimiento de las postlarvas de bocachico representado por la media de la longitud total

Tabla 1. Mediana de la longitud total (Q2) y cuartiles inferior (Q1) y superior (Q3) de las postlarvas de bocachico (*P. magdalenae*) durante el período de cría. Los cuartiles indican la dispersión del crecimiento y la amplitud de la distribución de los datos.

Día	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q1(mm)	6,20	6,50	8,36	11,00	14,30	15,20	17,60	20,00	20,80	21,00	22,60
Q2(mm)	6,30	6,63	8,64	11,45	14,93	15,70	18,65	21,70	22,40	23,00	24,50
Q3(mm)	6,40	6,90	8,90	12,00	15,60	16,50	19,60	22,50	23,50	24,60	26,40

El número de individuos de cada tipo de zooplancton encontrado en los tractos digestivos de las cinco postlarvas de bocachico fue el siguiente: postlarva 1: 11; postlarvas 2 y 3: 12 cada una; postlarva 4: 13, y postlarva 5: 6, en tanto que no se encontraron copépodos ni rotíferos, y solo se halló un ostrácodo.

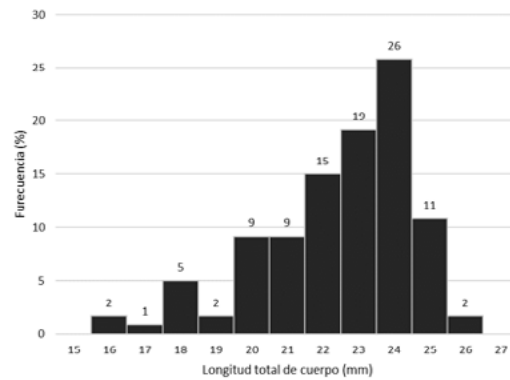
Se midió el tamaño de *M. micrura* ingerida por cinco postlarvas. La altura corporal de los cladóceros osciló entre 200 y 500 μm . La mayoría de los individuos presentaron una altura corporal entre 300 y 400 μm . Esto indica que, durante el segundo día de apertura bucal, las postlarvas se alimentaron selectivamente de especímenes de ese tamaño. Además, según los datos, la proporción entre el ancho y la altura corporal fue aproximadamente de 50 %, lo que sugiere que las postlarvas tuvieron una boca abierta de entre 100 y 250 μm durante la depredación, lo cual coincide con las mediciones reales de las mandíbulas de las postlarvas (**Figura 3**).

Nutrición a través de presas exógenas

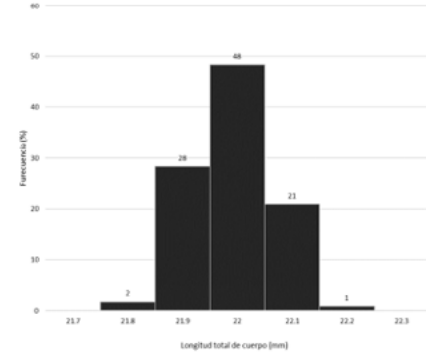
En el quinto día (**Tabla 2**) se observó que las postlarvas se alimentaron en gran cantidad de copépodos y rotíferos. Las fotografías tomadas de los contenidos dentro de los tractos digestivos mostraron presencia de zooplancton (**Figura 4**).

Influencia de *M. micrura* en el cambio de hábitos alimentarios

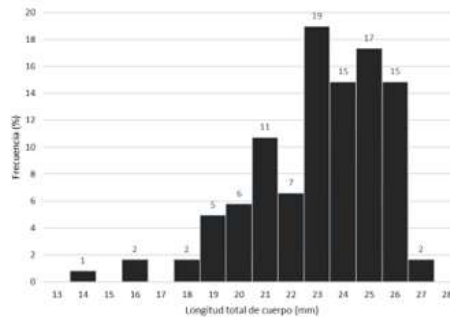
Como se ve en la **tabla 2**, estos resultados indican que la densidad de *M. micrura* y el contenido digestivo de las postlarvas varían a lo largo del tiempo de cría en el estanque. La presencia de *M. micrura* es alta al principio, pero posteriormente disminuye, mientras que otras presas como rotíferos, copépodos y organismos bentónicos se vuelven más importantes en la alimentación de las postlarvas.



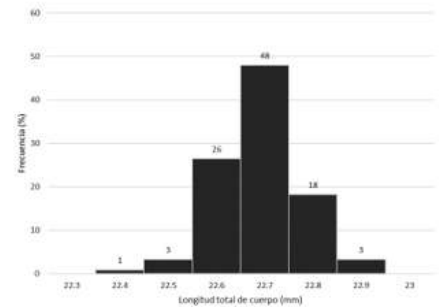
Día 10, n = 120
 Media: 21,99 (IC95%: 21,63 - 22,35)
 Mediana: 22,3 (IC95%: 21,95 - 22,55)
 Valor mínimo: 15,7
 Valor máximo: 25,1
 Desviación estándar: 2,2



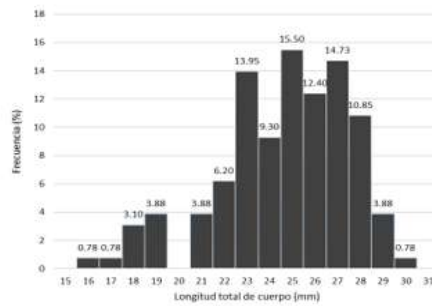
Día 10, n = 120
 Iteraciones de Bootstrap = 1,000
 Valor medio: 21,93908
 Mediana: 21,93910
 Valor mínimo: 21,8032
 Valor máximo: 22,1211
 Desviación estándar: 0,07672



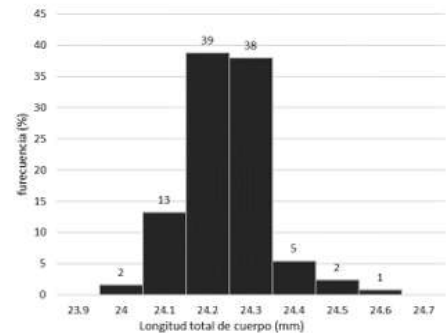
Día 11, n=121
 Media: 22,82 (IC95%: 22,30 - 23,34)
 Mediana: 23,40 (IC95%: 22,75 - 23,90)
 Mínimo: 13,8
 Valor máximo: 26,9
 Desviación estándar: 2,27



Día 11, n=121
 Iteraciones de Bootstrap=1,000
 Valor medio: 22,64919
 Mediana: 22,65478
 Valor mínimo: 22,47311
 Valor máximo: 22,80946
 Desviación estándar: 0,07604



Día 12, n=129
 Media: 24,78 (IC95%: 24,28 - 25,28)
 Mediana: 25,80 (IC95%: 25,10 - 26,50)
 Valor mínimo: 15,6
 Valor máximo: 29,6
 Desviación estándar: 2,44



Día 12, n=129
 Iteraciones de Bootstrap=1,000
 Valor medio: 24,17712(CI 95%: 23,98 - 24,38)
 Mediana: 24,17742(CI95%: 24,12 - 24,18)
 Valor mínimo: 23,9669
 Valor máximo: 24,3561
 Desviación estándar: 0,108991

Figura 2. Distribuciones de frecuencia de la longitud total del cuerpo de postlarvas de bocachico (*P. magdalenae*) y resultados de la prueba de *bootstrap*

En primer lugar, mediante la observación del tracto digestivo se confirmó que las postlarvas se alimentaron selectivamente de *M. micrura* durante el segundo y tercer días. Sin embargo, la tasa de reproducción de *M. micrura* en el estanque de cría no fue suficiente para satisfacer la cantidad requerida por las postlarvas en el cuarto y quinto días, lo que las llevó a alimentarse de copépodos y rotíferos alternativamente durante este período. No obstante, en el sexto día se observó una recuperación en la población de *M. micrura* en el estanque de cría, lo que coincidió con un cambio en la alimentación de las postlarvas, que volvieron a alimentarse exclusivamente de *M. micrura*. Este patrón sugiere que *M. micrura* posee una alta capacidad reproductiva, un requisito clave para mantener su papel como principal alimento vivo de las postlarvas y recuperarse rápidamente de la presión que representa su consumo por parte de estas.

En segundo lugar, mediante la observación del contenido del tracto digestivo se demostró que las postlarvas cambiaron su dieta de zooplancton a bentos en el período posterior. Hasta el séptimo día, consumieron abundante zooplancton, principalmente *M. micrura*, pero a partir del octavo día comenzaron a alimentarse de algas verdes y diatomeas en el fondo del estanque, lo que indicó el cambio en su dieta hacia el consumo de organismos bentónicos.

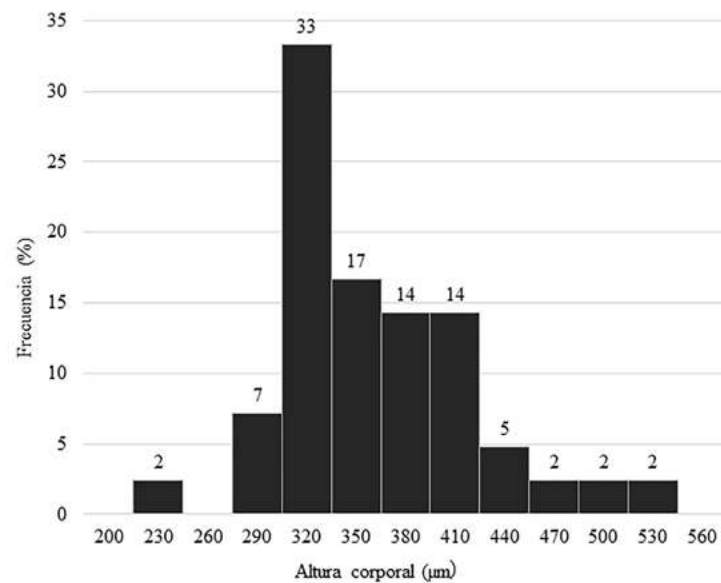


Figura 3. Proporción de la altura corporal de *M. micrura* en trectos digestivos de cinco postlarvas de bocachico (*P. magdalanae*)

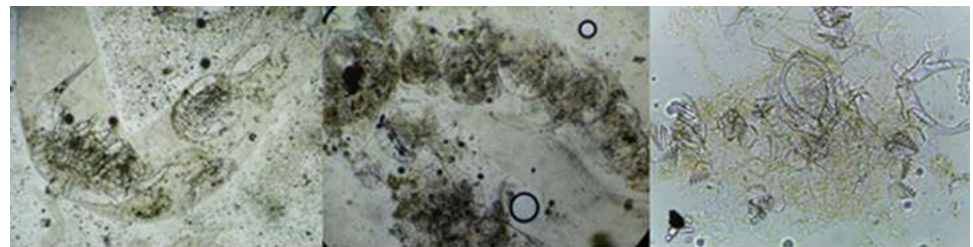


Figura 4. Fotografías del zooplancton ingerido en el tracto digestivo de la postlarva de bocachico (*P. magdalanae*) en condiciones controladas. Izquierda: dos copépodos sin digerir. Centro: *M. micrura* digerida y copépodos sin digerir. Derecha: aparato masticador (mástax) de rotíferos y dos ganchos grandes de *Asplanchna sp.*

Tabla 2. Monitoreo del proceso de alimentación y observaciones de la conducta durante la cría de postlarvas de bocachico (*P. magdalenae*)

Día	Densidad de <i>Moina micrura</i> en el estanque de cría (ml)	Contenidos del tracto digestivo			Observación / Operación
		<i>Moina micrura</i>	Copépodos	Rotíferos	
1		Estanque circular interior			
2	0,001	7	0	1	Postlarvas fueron transferidas al estanque exterior de cría desde el interior.
		7	0	0	
		4	0	0	
3	No se registraron datos	5	0	1	Ninguna observación particular en la capa superior de agua
		4	0	0	
		4	0	0	
4	0,176	3	2	2	Ninguna observación particular en la capa superior de agua
		5	2	0	
		4	2	0	
		0	5	8	
		9	1	0	
		5	3	5	
5	0,34	4	18	6	Ninguna observación en la capa superior de agua
		8	11	1	
		5	36	2	
		5	27	0	
		3	28	0	
6	0,355	65	0	0	Ninguna observación en la capa superior de agua
7	0,46	122+	0	0	Ninguna observación en la capa superior de agua
8	0,355	Las algas verdes y las diatomeas constituyeron la mayoría. Poca cantidad de <i>M. micrura</i>			Ninguna observación en la capa superior de agua
9	No se registraron datos	Las algas verdes y las diatomeas constituyeron la mayoría. Poca cantidad de <i>Nicha sp.</i> , especialmente de <i>M. micrura</i>			Ninguna observación en la capa superior de agua
10	0,069	Las algas verdes y las diatomeas fueron la mayoría. Poca cantidad de <i>M. micrura</i> Por la tarde, muchos boqueos en la capa superior de agua			Por la mañana, ninguna observación particular en la capa superior de agua
11	0,05	Por la mañana, las algas verdes y las diatomeas constituían la mayoría. Poca cantidad de <i>M. micrura</i> , rotíferos y ostrácodos			Por la mañana, muchos boqueos en la capa superior de agua y administración de torta húmeda
		Por la tarde, solamente torta húmeda de concentrado compuesto para acuicultura			Por la tarde, ninguna observación en la capa superior de agua
12	0,109	Solamente la torta húmeda de concentrados compuestos para acuicultura			No hubo boqueo en la capa superior de agua. Se observó una pequeña cría del <i>M. micrura</i> en una esquina de estanque.
13	0,223	Cosecha			No hubo boqueos en la capa superior de agua

Por último, se observó un comportamiento peculiar de las postlarvas durante el período. Los piscicultores locales lo denominan “boqueo” y se refiere a la apertura repetida de la boca en la superficie del agua, similar a los peces que toman aire. No se había podido explicar racionalmente el significado de este comportamiento, pero se descubrió que se

trataba de la búsqueda del alimento necesario para las postlarvas que habían experimentado un cambio en su dieta debido a la escasez de los alimentos necesarios en el fondo del estanque de cría.

De hecho, cuando las postlarvas exhibieron el comportamiento de “boqueo” en la superficie del agua, morían una tras otra si permanecían en el estanque de cría. Ante esta situación, los piscicultores consideraban trasladar los alevines a un estanque de barro, debido, en parte, a la incomprensión de las razones para este comportamiento atípico de las postlarvas en la superficie del agua.

En el día 11, a las 07:00 am, el contenido del tracto digestivo se mantuvo sin cambios respecto al día anterior, con una gran cantidad de algas verdes, diatomeas y una pequeña cantidad de zooplancton. Además, se observó que muchas postlarvas “boqueaban” en la superficie del agua. A partir del día 11, con la administración dos veces al día de una torta húmeda hecha de alimento concentrado en todo el estanque, se observó que el “boqueo” dejó de ocurrir. En la mañana del día 12, las postlarvas ya habían adaptado su comportamiento, y el tracto digestivo estaba lleno de la torta húmeda ingerida el día anterior.

Análisis del índice relativo intestinal

Durante el crecimiento de las postlarvas el intestino se desarrolla en proporción a la longitud del cuerpo. Esto se refleja en un aumento continuo del índice relativo intestinal hasta que la función digestiva alcanza su madurez completa. Por lo tanto, este índice puede servir como un indicador del establecimiento pleno de la función digestiva de las postlarvas. Como se muestra en la **figura 5**, el índice relativo intestinal de los juveniles y adultos de bocachico es aproximadamente 3,0, en tanto que el índice relativo intestinal de las postlarvas durante su fase de crecimiento fluctúa entre 2,5 y 3,0; en este lapso su longitud total es de unos 25 a 30 mm. Esto sugiere que cuando las postlarvas llegan a los 25 a 30 mm desarrollan funciones digestivas comparables a los peces adultos (**Figura 5**).

Para medir la longitud del intestino, se extrajo quirúrgicamente el tracto digestivo de postlarvas y peces adultos y se depositó en un portaobjetos. A medida que los individuos crecen, el intestino se pliega, por lo que se intentó una cirugía para enderezarlo, pero no se logró mantenerlo completamente recto. Por ello, el índice relativo intestinal con respecto a la longitud total del cuerpo debe tomarse como una estimación aproximada.

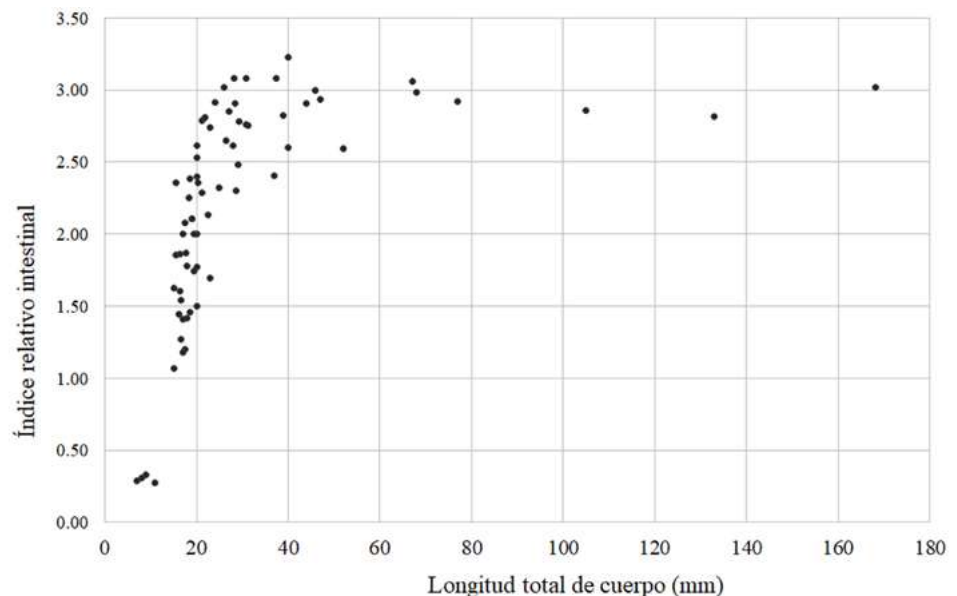


Figura 5. Cambios en el índice relativo intestinal (longitud del intestino / longitud total del cuerpo) a medida que avanza el crecimiento del bocachico (*P. magdalenae*)

Discusión

En el centro acuícola, la producción de alevines de bocachico se llevó a cabo mediante métodos tradicionales, basados en la experiencia práctica. Sin embargo, estos métodos no tienen el respaldo en conocimientos biológicos y técnicos, por lo que se presentaron problemas en la producción planificada. Se hicieron observaciones y experimentos básicos para esclarecer los conocimientos científicos que se requieren para aplicar una tecnología sostenible de producción. En el estudio se obtuvieron conocimientos importantes para mejorar la producción de bocachico, tal como se discute a continuación.

Crecimiento y desarrollo de alevinos

En primer lugar, se discute la curva de crecimiento de las postlarvas de bocachico (*P. magdalenae*) obtenida en este estudio. Este es el primer ejemplo de crecimiento de postlarvas de bocachico durante el período de cría. Además, los resultados de la prueba de *bootstrap* para la población de postlarvas en el estanque de 250 Tn, presentó una distribución normal, lo que indica que las condiciones de cría, como la calidad y cantidad de alimento, así como la temperatura del agua y otros factores, fueron apropiados (Barky, 2000). Así, esta curva de crecimiento puede considerarse un modelo de referencia para el desarrollo del manejo de la cría adaptada a cada etapa en el programa de producción. El uso del modelo de crecimiento en la acuicultura puede mejorar la eficiencia y el rendimiento de la producción de alevines. Al predecir con precisión el tiempo necesario para alcanzar el tamaño de cosecha, los acuicultores pueden determinar el calendario de producción y utilizar los recursos de manera eficiente. La curva de crecimiento que aquí se presenta es el primer paso para desarrollar técnicas de gestión de la producción de bocachico. En el futuro, la incorporación de los factores ambientales, genéticos y nutricionales conducirá al desarrollo de técnicas de acuicultura sostenibles.

En segundo lugar, se estimó que la población del estanque de cría tenía una distribución normal en cuanto al desarrollo de postlarvas, lo que sugiere que los métodos de manejo de cría aplicados fueron adecuados. Sin embargo, la distribución de su longitud total basada en las mediciones, no presentó una forma normal (Figura 2), lo que podría estar relacionado con el comportamiento específico de las postlarvas y los alevines. Estas particularidades podrían haber influido en la distribución observada, por lo que se consideró su impacto en los resultados. Uno de los comportamientos peculiares de las postlarvas fue que siempre se ubicaron cerca de los lugares donde había *M. micrura* en el agua (Sysa, 2006; Czesny, 2011). Cuando las larvas se metamorfosearon en postlarvas, se observaron el tracto digestivo y la vejiga natatoria, los órganos que primero se desarrollan. Las postlarvas digirieron *M. micrura* con el fin de obtener los nutrientes necesarios para su desarrollo, mientras que la vejiga natatoria funcionó para mantener el cuerpo de la postlarva en la misma posición que *M. micrura*, con un mínimo gasto energético para alimentarse. Por otra parte, *M. micrura* se movió vertical y horizontalmente dependiendo del tiempo, el clima, la luz solar y la sombra (Hays, 2003), lo que hizo que las posiciones de las postlarvas cambiaran según estas condiciones.

Por otro lado, en el caso de los alevinos, uno de los comportamientos peculiares fue su sensibilidad a los sonidos y vibraciones, lo que provocó que todos huyeran a un lugar profundo y oscuro en el estanque de cría cuando percibían cambios o movimientos. Sin embargo, cuando comenzaron a alimentarse de torta mojada formaron un cardumen y nadaron enérgicamente en el mismo lugar. Además, cuando se instaló una manguera de aireación en el estanque de cría para suministrar oxígeno, nadaron repetidamente en cardumen hacia la fuerte corriente de agua que se elevaba desde el fondo del estanque. Cuando el aire de la manguera era débil, formaban un cardumen en línea en la pared del estanque de cría y nadaban en largas filas a lo largo de esta. Por otra parte, cuando se vertió agua en el estanque de cría, saltaron por turnos uno a uno hacia la columna de agua que caía. Estos comportamientos peculiares eventualmente condujeron a errores de muestreo.

Tales comportamientos no habían sido registrados anteriormente y se informaron por primera vez en este estudio. Considerando las características de comportamiento descritas, se entiende que eventualmente hayan conducido a errores de muestreo.

Este es el primer estudio observacional detallado realizado en un tanque de reproducción a gran escala de 250 Tn. Se obtuvo un conocimiento valioso sobre las características de comportamiento y la distribución del crecimiento de los alevines. Sin embargo, también quedó claro que existen dificultades en el muestreo cuando se trata de un gran número de individuos, además de otros aspectos que difieren de los experimentos a pequeña escala. En la práctica, el muestreo perfecto es difícil y ciertos errores son inevitables.

Utilización de *Moina micrura* como alimento vivo

La descripción de la preparación del estanque de cría con *M. micrura* proporcionó información relevante. La reproducción de *M. micrura* y los rotíferos en estanques de lodo habitados por carpas es un fenómeno que merece atención (Brian & Bartels, 2015). Se sabe que el comportamiento de alimentación de las carpas perturba el fondo del estanque de lodo, liberando partículas y materia orgánica en el agua. Ello produce un ambiente favorable para la reproducción del zooplancton. Además, durante este proceso las partículas de fitoplancton también se levantan y se convierten así en una fuente importante de alimento para *M. micrura*.

Por otro lado, en esta etapa de postlarvas, lo más importante para ellas es lograr una alimentación eficiente con el mínimo consumo de energía, con el fin de maximizar su crecimiento. Debido a que las postlarvas aún no completan el desarrollo morfológico necesario para escapar de los depredadores, la defensa contra sus enemigos es difícil. En este período las postlarvas permanecen a la misma profundidad que *M. micrura*, con el fin de hacer más eficiente su alimentación y priorizar el crecimiento.

Se puede concluir que *M. micrura* cumple con las condiciones necesarias como organismo alimenticio adecuado para la cría de postlarvas de bocachico. En primer lugar, las postlarvas se alimentaron selectivamente de *M. micrura*, alcanzando así un buen crecimiento. En segundo lugar, la longitud de la mandíbula de las postlarvas correspondió al tamaño de *M. micrura* (Figura 3), lo que indica su idoneidad como alimento vivo (Shirota, 1970; Umeki, 2008). Asimismo, las presas exógenas como *M. micrura* se destruyen físicamente en la faringe o el tracto digestivo de las postlarvas. El cladóceros se descompone al ser ingerido, liberando proteínas coloidales solubles del protoplasma de las células, lo cual resulta altamente beneficioso para las postlarvas (Kanazawa, 2003). De hecho, fue posible observar que las postlarvas con una capacidad digestiva baja fueron capaces de digerir y absorber *M. micrura*. Además, su capacidad reproductiva es notable, como pudo observarse en el estanque de cría (Tabla 2). Por último, *M. micrura* se distribuye naturalmente donde el bocachico vive, es decir, que los piscicultores en estas zonas pueden utilizarlas como alimento vivo con bajo costo.

Modelo del comportamiento alimentario de las postlarvas de bocachico

Durante la producción de alevinos se observaron diferencias significativas en comparación con producciones anteriores. Específicamente, las densidades de *M. micrura* en el estanque de cría fueron relativamente más altas, lo que llevó a un cambio ecológico importante en el comportamiento alimentario durante la etapa posterior de las postlarvas. En los tractos digestivos se encontraron grandes cantidades de zooplancton, así como de *M. micrura*, rotíferos y copépodos. La observación más notable es la ausencia de fitoplancton, pues solo se halló zooplancton. Posteriormente, se observaron cambios significativos en los hábitos alimentarios, con cantidades considerables de fitoplancton encontradas en el tracto digestivo.

A partir de estas observaciones, se puede inferir que las postlarvas cambiaron su comportamiento alimentario, pasando de consumir zooplancton a consumir organismos bentónicos. Además, debido a la alta densidad de postlarvas en el estanque de cría, la mayoría de la biomasa de las presas en el fondo fue consumida, lo que llevó a que las postlarvas se

desplazaran hacia la superficie en busca de nuevas presas, comportamiento conocido como “boqueo”. Cuando las postlarvas realizaban el boqueo en la superficie, se les proporcionó una torta húmeda en el fondo, lo que las llevó a descender y consumir el alimento concentrado. Al día siguiente, se observó que el tracto digestivo estaba lleno de éste.

Se pudo concluir que las postlarvas exhibieron un comportamiento alimentario típico, como se muestra en el modelo de la **figura 6**, el cual se propone como una nueva descripción del comportamiento alimentario a partir de las observaciones detalladas de la producción de alevines bajo observación, y no necesariamente derivada de fuentes publicadas previamente.

Considerando el modelo de comportamiento alimentario en un ambiente de producción (**Figura 6**), el “boqueo” que ocurre en la etapa posterior de la cría parece ser un intento de buscar presas en la superficie del agua, donde los alevines encuentran el alimento concentrado en polvo. Sin embargo, este tipo de alimentación no puede considerarse natural, ya que podrían convertirse en presas de aves como el martín pescador. Además, existe la posibilidad de morir de inanición si no encuentran una presa adecuada. Por el contrario, las postlarvas aceptan como presa la torta húmeda proporcionada en el fondo. Desde esta perspectiva, es razonable suponer que el comportamiento alimentario del bocachico en su entorno natural se asemeja al que se muestra en el modelo de la **figura 7**.



Figura 6. Modelo del comportamiento típico del hábito alimentario de las postlarvas de bocachico (*P. magdalенаe*) en estanque de cría

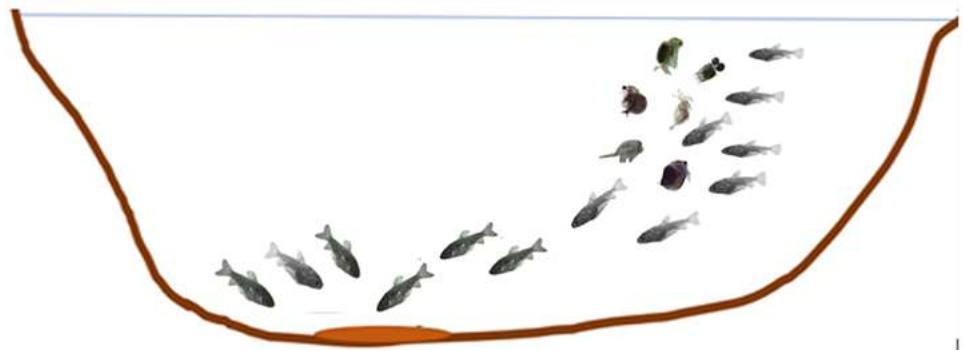


Figura 7. Modelo del comportamiento típico de hábito alimentario de las postlarvas de bocachico (*P. magdalенаe*) en el ambiente natural

Alimentación de las postlarvas e índice relativo intestinal

Se examinó la relación entre el crecimiento y el IRI mediante la observación de la cría en el estanque de 250 Tn, los registros del contenido intestinal y el comportamiento de las postlarvas. Se encontró una correlación lineal entre la longitud intestinal, Y (mm), y la longitud total del cuerpo, X (mm). La ecuación de regresión obtenida fue

$$Y = 4,2689 X - 42,808 \quad (15 \leq X \leq 30), n=48,$$

con un coeficiente de determinación, R^2 , igual a 0,8572. Esto indica que se dio una cierta relación lineal positiva entre la longitud total del cuerpo y la longitud intestinal del bocachico, lo que sugiere que esta se puede estimar a partir de la longitud del cuerpo.

Utilizando el promedio de los valores de longitud del cuerpo, se estimó la longitud intestinal en cada punto y se calculó el IRI correspondiente. Los resultados señalan que el desarrollo intestinal progresa con el crecimiento de las postlarvas, lo que está relacionado con un aumento en el IRI.

Según las observaciones de la **tabla 2**, la mayoría del contenido digestivo del día 8 consistió en algas verdes y diatomeas. En el día 10 se observó el boqueo en el estanque de cría. Según los datos de la longitud total, algunas larvas habían alcanzado un máximo de 20,4 mm en el día 8, y para el día 10 algunas ya habían alcanzado los 25 mm (**Figura 2**). De estas observaciones se puede inferir que el cambio en el comportamiento alimentario de las postlarvas comienza aproximadamente cuando la longitud total del cuerpo llega a los 18 mm en el día 8 de la cría. Sin embargo, el IRI se acerca gradualmente a 2,5, con valores de 2,10 en el día 8, de 2,28 en el día 9 y de 2,31 en el día 10. Esto sugiere que el cambio en el hábito alimentario ocurre al inicio y posteriormente los alevines se adaptan a nuevas fuentes de alimento a medida que el tracto digestivo se desarrolla, lo que aumenta el IRI y estabiliza la función digestiva. Es decir, en el presente estudio, las postlarvas de bocachico comenzaron a cambiar sus hábitos alimentarios al alcanzar una longitud total de 18 mm y un IRI similar al de los peces adultos cuando llegan a los 25 a 30 mm de longitud total (**Kramer & Bryant, 1995; Karachle & Stergiou, 2010**).

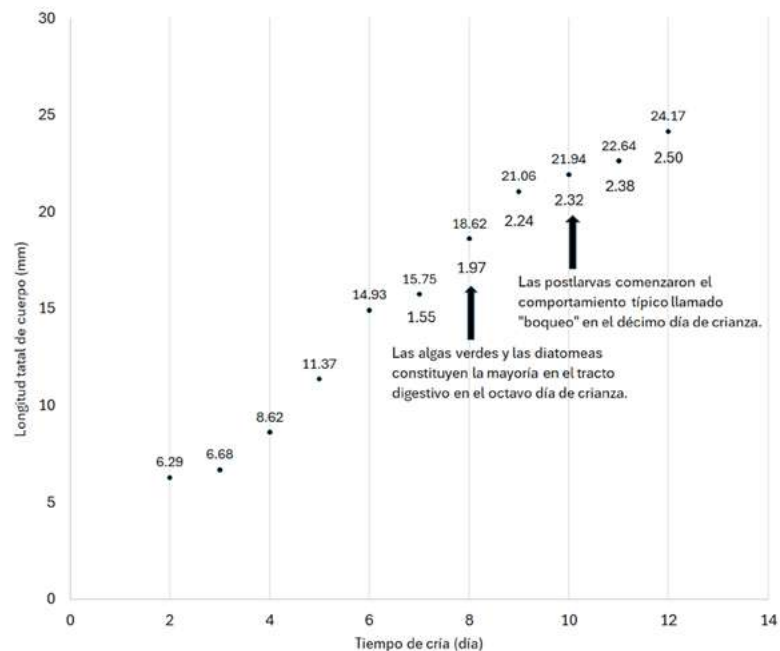


Figura 8. Curva de crecimiento e índice relativo intestinal (IRI) de las postlarvas de bocachico en el estanque de 250 Tn. Cada punto representa la longitud promedio del cuerpo (arriba) y el IRI (abajo) correspondiente a cada día de cría. Se observó un cambio en el contenido intestinal de zooplancton a fitoplancton en el día 8, indicando el inicio de la transición alimentaria. Además, se registró el comportamiento de “boqueo” en el día 10.

El alcanzar un IRI adulto cuando la longitud corporal es relativamente pequeña podría conferir a las postlarvas de bocachico una ventaja en términos de crecimiento y supervivencia (Arévalo, 2023). Una mayor eficiencia digestiva les permitiría mejorar la extracción de nutrientes, favoreciendo un crecimiento más rápido y una mejor condición física (German & Horn, 2006; Zhao *et al.*, 2021), lo que, a su vez, podría aumentar sus posibilidades de evitar la depredación durante las etapas tempranas de desarrollo. Por ello, el desarrollo de un IRI adulto a los 25 mm de longitud podría considerarse un hito importante en la ontogenia del bocachico, que marca la transición hacia una fase de mayor autosuficiencia nutricional y mejores perspectivas de supervivencia (Portella *et al.*, 2014).

Desafíos en el desarrollo de la producción de alevines

Con el fin de adquirir los conocimientos necesarios para la producción, este estudio se centró en la comprensión del comportamiento alimentario del bocachico, lo cual es fundamental para la acuicultura y para mejorar las técnicas de producción mediante experimentos y observaciones continuas. Sin embargo, hay cuatro aspectos importantes que quedan por abordar. Los primeros dos son de carácter técnico y los otros dos se refieren a la estructura del sistema de producción.

Desarrollo de técnicas de cría. Primero debe desarrollarse una técnica de cría de *M. micrura*, un componente crítico en la dieta de las postlarvas, para lo cual deben estudiarse dos elementos: el fitoplancton y el alimento artificial.

En segundo lugar, es necesario introducir bocachicos naturales para mejorar la estructura genética de los peces reproductores. Para ello debe entrenarse a los individuos, de manera que se habitúen a la alimentación con concentrados (Gavery, 2017).

Una vez desarrollados los aspectos técnicos, el siguiente paso es construir un sistema de producción adecuado al objetivo y al lugar de cría, pues los procesos de producción requeridos serán diferentes en una granja de cría moderna y bien equipada de aquellos necesarios en una granja rural con instalaciones mínimas.

En el caso de la liberación en aguas naturales, una característica particular del bocachico es que, después de la metamorfosis, los alevines forman cardúmenes y se mueven a gran velocidad mientras se alimentan. Sin embargo, la variabilidad de su tamaño en estanque puede impedir la formación cohesiva de estos cardúmenes, por lo que, durante la fase de producción, debe evitarse que tal variabilidad sea demasiado grande. Se deben considerar la supervivencia y la adaptación de los individuos liberados en los ecosistemas naturales, ya que el comportamiento de cardumen es esencial en estos entornos.

Se prevé que estos esfuerzos darán lugar a técnicas de cría de alevines más sostenibles. Además, los resultados obtenidos de estos estudios serán de gran valor para el avance de la industria acuícola y fomentarán la adopción de prácticas de cría sostenibles.

Agradecimientos

El presente estudio se llevó a cabo en el Centro Acuícola y Agroindustrial de Gaira, perteneciente al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), ubicado en Santa Marta (Magdalena), Colombia. La investigación se realizó entre abril de 2018 y marzo de 2020, con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), y su objetivo fue el mejoramiento de las técnicas de producción de alevines de bocachico. Agradecemos al Ingeniero Aroldo Daza del Centro Acuícola y Agroindustrial, a los Profesores Pedro Eslava Eljaiek de la Universidad de Magdalena y Víctor Atencio García de la Universidad de Córdoba, a la Ingeniera Pesquera Socorro del Rosario Sánchez Fajardo (SENA) y al Licenciado Juan Fuentes Reinés, por sus valiosos comentarios y el apoyo en las correcciones del manuscrito.

Referencias

Arévalo, E., Cabral, H. N., Villeneuve, B., Possémé, C., Lepage, M. (2023). Fish larvae dynamics in temperate estuaries: A review on processes, patterns and factors that determine recruitment. *Fish and Fisheries*, 24, 466-487. <https://doi.org/10.1111/faf.12740>

- Atencio, G. V., Kerguelén, E., Wadnipar, L., Narváez, A.** (2003). Manejo de la primera alimentación del bocachico (*Prochilodus magdalenae*). *Revista MVZ Córdoba*, 8(1), 254-260. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69380103>
- Atencio, G. V., Kerguelén, E., Naar, E., Petro, R.** (2013). Desempeño reproductivo del bocachico (*Prochilodus magdalenae*) inducido dos veces en un mismo año. *Revista MVZ Córdoba*, 18(1), 3304-3310. <https://doi.org/10.21897/rmvz.192>
- Barki, A., Harpaz, S., Hulata, G., Karplus, I.** (2000). Effects of larger fish and size grading on growth and size variation in fingerling silver perch. *Aquaculture International*, 8 (5), 391-401.
- Cordero, A. C., Pertuz, V. B., Solano, J.** (2003). Reproducción inducida del bocachico (*Prochilodus magdalenae*, Steindachner, 1878) con ovaprim®. *Revista MVZ Córdoba*, 8(2), 335. <https://doi.org/10.21897/rmvz.516>
- Czesny, S. J., Graeb, B. D., Dettmers, J. M.** (2011). Ecological consequences of swim bladder noninflation for larval yellow perch. *Transaction of the American Fisheries Society*, 134(1), 1011-1020. <https://doi.org/10.1577/T04-016.1>
- de la Rosa, J., Fontalvo P.P., Orozco-Berdugo G., Narváez-Barandica J.C.** (2020). Caracterización genética de reproductores de *Prochilodus magdalenae* (Pisces: Prochilodontidae) usados en programas de repoblamiento en Colombia. *Journal of Basic & Applied Genetics*, 31(1), 53-56. <https://doi.org/10.35407/bag.2020.31.01.06>
- Dirección Nacional de Recursos Acuáticos, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay** (2018). *Boletín Estadístico Pesquero*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay
- Fuentes-Reinés, J. M., Eslava-Eljaiek, P., Elmoor-Loureiro, L. M. A.** (2019). Cladocera (Crustacea, Branchiopoda) of a temporary shallow pond from northern Colombia. *Revista Peruana de Biología*, 26(3), 351-366. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v26i3.16779>
- García, J. J., Celis, L. M., Villalba, E. L., Mendoza, L. C., Brú, S. B., Atencio, V. J., Pardo, S. C.** (2011). Evaluación del policultivo de bocachico (*Prochilodus magdalenae*) y tilapia (*Oreochromis niloticus*) utilizando superficies fijadoras de perifiton. *Revista MVZ Córdoba*, 58(2), 71-83.
- Gavery, M. R. & Roberts, S. B.** (2017). Epigenetic considerations in aquaculture. *PeerJ*, 5, e4147.
- German, D. P. & Horn, M. H.** (2006). Gut length and mass in herbivorous and carnivorous prickleback fishes (Teleostei: Stichaeidae): ontogenetic, dietary, and phylogenetic effects. *Marine Biology*, 148(5), 1123-1134.
- González, J. F., Suárez, R., Gil, B., Torres, G.** (2005). Exposición aguda a tres concentraciones de nitrito en juveniles de bocachico (*Prochilodus magdalenae*). *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 52(1), 36-43.
- González-Uribe, R. A. & Wills-Franco, G. A.** (2009). Evaluación de dietas isoenergéticas con varios niveles de proteína y de harina de pescado en alevines de bocachico (*Prochilodus magdalenae*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 12(2), 69-77.
- González-Uribe, R. A. & Wills, A.** (2003). Evaluación del desempeño de los alevinos bocachico (*Prochilodus magdalenae*) steindachneer, 1878 sometidos a dos tipos de dieta. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 50(2), 50-56. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40763920700>
- Gómez, D.** (2014). Ictiofauna y desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena-Cauca. *Biota Colombiana*, 15(2), 3-25.
- Hays, G. C.** (2003). A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migration. *Hydrobiologia*, 503(1), 163-170. <http://dx.doi.org/10.1023/B:HYDR.0000008476.23617.b0>
- Huser, B. & Bartels, P.** (2015). Feeding ecology of carp, en *Biology and Ecology of Carp*. Taylor and Francis Group, eBook ISBN: 9780429171352.
- Kanazawa, A.** (2008). Nutrition of marine fish larva. *Journal of Applied Aquaculture*, 13(1-2), 103-143. https://doi.org/10.1300/J028v13n01_05
- Karachle, P. K. & Stergiou, K. I.** (2010). Gut length for several marine fish: relationships with body length and trophic implications. *Marine Biodiversity Records*, 3, e106.
- Kramer, D. L. & Bryant, M. J.** (1995). Intestine length in the fishes of a tropical stream: 2. Relationships to diet—the long and short of a convoluted issue. *Environmental Biology of Fishes*, 42(2), 129-141.
- Landínez-García, R. M., Narváez J. C., Márquez E. J.** (2020). Population genetics of the freshwater fish *Prochilodus magdalenae* (Characiformes: Prochilodontidae), using species-specific microsatellite loci. *PeerJ*, 8, e10327. <https://doi.org/10.7717/peerj.10327>

- War, M. U. D. & Altaff, K.** (2011). High density culture of Cradoceran *Moina micrura* (Kruz,1874) by using poultry manure. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series B: Biological Sciences*, 54(3), 131-135.
- Dirección de Cadenas Pecuarias, Pesqueras y Acuícolas - Minagricultura.** (2021). Acuicultura en Colombia Cadena de la Acuicultura Cifras del Sector. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Acuicultura/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Mojica, J. I., Usmá, J. S., Álvarez-León, R., Lasso, C. A.** (Eds). (2012). *Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales.
- Nakagawa, H., Umino, T., Sekimoto, T., Ambas, I., Montgomery, W. L., Nakano, T.** (2002). Characterization of the digestive tract of wild ayu. *Fisheries Science*, 68, 341-346.
- Nakamoto, T., Inada, Y., Ushijima, T., Hagiwara, A.** (2007). High Density Large-scale Culture of *Moina macrocopa* by Improvement of Aeration Equipment. *Aquaculture Science*, 55(3), 423-429. <https://agris.fao.org/agrissearch/search.do?recordID=JP2008000066>
- Portella, M. C., Jomori, R. K., Leitão, N. J., Menossi, O. C. C., Freitas, T. M.** (2014). Larval development of indigenous South American freshwater fish species, with particular reference to pacu (*Piaractus mesopotamicus*): A review. *Aquaculture*, 432, 402-417.
- Prieto, G. M. & Atencio, G. V.** (2008). Zooplankton en la larvicultura de peces neotropicales. *Rev. MVZ Córdoba*, 13(2), 1415-1425.
- Puertonegocios.** (2019). *La exportación de sábalo en Argentina*. <https://puertonegocios.com/2019/02/26/la-exportacion-de-sabalo-en-argentina/>
- Quintero, P. V. E., Cardona, A. M., Grisales, F.** (2009). Producción artesanal del rotífero *Philodina* sp. y de algas para la alimentación de postlarvas de bocachico. *Acta Agronómica*, 58(1), 53-56.
- Shirota, A.** (1970). Studies on the mouth size of fish larvae. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 36(4), 353-368. <https://doi.org/10.2331/suisan.36.353>
- Sysa, P., Ostaszewska, T., Olejniczak, M.** (2006). Development of digestive system and swim bladder of larval nase (*Chondrostoma nasus* L.). *Aquaculture Nutrition*, 12(5), 331-339. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2006.00368.x>
- Torres, G. L. A. & Cohen, J. G. L.** (1993). Engorde de Bocachico (*Prochilodus reticulatus magdalenae* STEINDACHNER 1878) comparando tres tratamientos de abonado (Boñiga; Boñiga-taruya; 30-10-5) y ensayando sustratos para perfiton. Tesis para optar el título de Ingeniero pesquero, Facultad de Ingeniería pesquera, Universidad del Magdalena.
- Umeki, K., Imai, T., Goshi, M., Kojima, T., Akiyama, N.** (2008). Changes in Size of Possible to Feed Food Organisms and Food Granules with Growth of Ayu (*Plecoglossus altivelis*) Larvae and Juveniles. *Aquaculture Science*, 56 (4), 469-478.
- Valbuena, D. C.** (2012). Evaluación de la estructura genética de sistemas de reproductores de Bocachico (*Prochilodus magdalenae*) (Pisces: Prochilodontidae) utilizados para repoblamiento. Tesis de pregrado para optar el título de Ingeniero pesquero, Facultad de Ingeniería pesquera, Universidad del Magdalena.
- Yoshimura, H.** (2013). Measuring Correlation Coefficient Confidence intervals from Normally and non-normally Distributed Data. *Memoirs of Nara University*, 41, 271-285.
- Zhao, X., Hu, C., Zhang, M., Ren, C., Ma, Z., Xie, S.** (2021). Ontogenetic development of the digestive system and growth in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) larvae. *Aquaculture Reports*, 20, 100700.

Artículo original

Murciélagos devoradores de insectos de El Tuparro: nuevas revelaciones sobre su distribución

Insect-eating bats from El Tuparro (Vichada, Colombia): New revelations about their distribution

✉ Nathaly Calvo-Roa^{1,*}, ✉ Yaneth Muñoz-Saba¹, ✉ Diego Casallas-Pabón^{1,2}

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

² Applied Biodiversity Foundation Colombia Biología, Bogotá DC, Colombia

Resumen

A partir de la revisión de las colecciones biológicas, se informa sobre nuevas localidades y la extensión de distribución de murciélagos de dos especies de la subfamilia Phyllostominae, *Glyphonycteris sylvestris* y *Micronycteris schmidtorum*. Los nuevos registros involucran la Reserva de la Biósfera El Tuparro ubicada en el departamento del Vichada (Colombia). Se resalta la importancia del estudio detallado de los ejemplares depositados en las bibliotecas de biodiversidad consultadas.

Palabras claves: colecciones biológicas; *Glyphonycteris sylvestris*; *Micronycteris schmidtorum*; parques nacionales naturales.

Abstract

Reviewing several biological collections, we were able to inform of new localities and the extent of the distribution of bats from two species of the Phyllostomidae family: *Glyphonycteris sylvestris* and *Micronycteris schmidtorum*. These records involve the El Tuparro Biosphere Reserve in the department of Vichada (Colombia). We highlight the importance of detailed studies of the specimens deposited in these biodiversity libraries.

Keywords: Biological collections; *Glyphonycteris sylvestris*; *Micronycteris schmidtorum*; national natural parks.

Introducción

Las colecciones son una biblioteca (Simmons & Muñoz-Saba, 2005) con valiosa información sobre la biodiversidad mundial (Siles & Baker, 2020); en ellas pueden encontrarse especies que aún no han sido descritas o cuyos ejemplares no han sido estudiados. En su gran mayoría, estos especímenes son sólo el *voucher* de algún proyecto, pero más allá de esto, no han vuelto a ser tenidos en cuenta. Como lo mencionan Siles & Baker (2020), las colecciones deben considerarse reservorios de la biodiversidad oculta, concepto no necesariamente restringido a especies crípticas.

El Parque Nacional Natural (PNN) El Tuparro, ubicado en el departamento de Vichada (Colombia), es un área de interés biogeográfico por encontrarse en la altillanura de la región Orinoquia, y es la única entre las áreas protegidas con ecosistemas de sabana (Villarreal-Leal & Maldonado-Ocampo, 2007).

Los primeros recolectores de fauna del PNN El Tuparro fueron investigadores de los Cuerpos de Paz de la década de los 70 que, en algunas ocasiones, iban acompañados por investigadores colombianos, entre ellos, Jorge Ignacio Hernández Camacho, conocido como el Mono Hernández, quienes depositaron los ejemplares recolectados en el

Citación: Calvo-Roa N, Muñoz-Saba Y, Casallas-Pabón D. Murciélagos devoradores de insectos del Tuparro: nuevas revelaciones sobre su distribución. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):341-353, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.2611>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Correspondencia:**

Nathaly Calvo-Roa;
ncalvor@unal.edu.co

Recibido: 1 de abril de 2024

Aceptado: 27 de mayo de 2024

Publicado en línea: 12 de junio de 2024



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

Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN) y en el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente (INDERENA) —actualmente custodiadas por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH)—. Muchas de estas sólo ahora están siendo estudiadas.

Aquí se actualiza la información depositada en las colecciones biológicas (**Rodríguez-Mahecha et al.**, 1995) en el marco de una revisión de ejemplares basada en el enfoque de la ecología funcional, que implica observar, analizar y detallar cada ejemplar como un organismo independiente que, a la vez, hace parte de un conjunto. La revisión de los ejemplares almacenados en dichas colecciones ocasionalmente resulta en la descripción de nuevas especies (**Ruiz-García et al.**, 2023) o en nuevos registros geográficos (**Defler & Bueno**, 2007); en el presente caso se amplió la distribución de especies de los géneros *Glyphonycteris* y *Micronycteris* para el departamento del Vichada (Colombia).

La revisión de la colección de murciélagos del departamento de Vichada (Colombia) es la base de la tesis doctoral “Caracterización de los ecosistemas a partir del análisis del ensamblaje de murciélagos desde el enfoque de la diversidad taxonómica, funcional y filogenética”, realizada en el Programa Curricular de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia.

Las especies del género *Glyphonycteris* se caracterizan por no presentar la banda cutánea que conecta las orejas en la frente, tener un cráneo abombado, incisivos centrales superiores caniniformes y caninos superiores ligeramente más largos que los incisivos, así como la presencia de un cíngulo lingual distintivo en los premolares superiores y cúspides ligeramente recurvadas en P4, e incisivos inferiores trifidos. La fórmula dental es 1-2/3, 1/1, 2/3, 3/3 x 2 para un total de 34 a 36 dientes. El cuarto metacarpal es el más corto y el quinto, el más largo, contrario a otras especies de la subfamilia en las que el tercer o el quinto metacarpal son los más cortos (**Williams & Genoways**, 2007).

El género lo conforman tres especies, de las cuales se han registrado dos en Colombia (*Glyphonycteris daviesi*, *Glyphonycteris sylvestris*). *G. daviesi* es de tamaño grande (longitud total entre 66 y 95 mm), su antebrazo es de más de 50 mm, el pelaje dorsal es levemente bicolorado y el cráneo tiene una longitud de más de 25 mm; exhibe un par de incisivos superiores y coronas en los incisivos inferiores antero-posterior largos y transversalmente angostos (**Williams & Genoways**, 2007; **Díaz et al.**, 2016); se distribuye en Colombia en la región de la Orinoquia entre los 0 y 500 m s.n.m., y hay registros en los departamentos de Arauca y Meta (**Ramírez-Chaves et al.**, 2021).

El género *Micronycteris* se caracteriza por el pelaje dorsal bicolorado y relativamente largo, una banda interauricular que conecta las orejas redondeadas, el margen inferior de la herradura de la narina engrosado y el centro del labio inferior y el mentón tienen un par de almohadillas lisas parcialmente divididas por un surco medial. La cola se extiende sólo hasta la mitad de la membrana interfemorale y la longitud del calcáneo es relativamente mayor a la longitud de la pata. Los caninos superiores son más del doble del tamaño de los incisivos centrales, los incisivos inferiores son bifidos y presenta tres premolares relativamente grandes en la mandíbula. La fórmula dental es 2/2, 1/1, 2/3, 3/3 x 2, para un total de 34 dientes.

El género lo conforman entre nueve (**Williams & Genoways**, 2007) y 11 especies (**Díaz & Barquez**, 2009), de las cuales se han registrado en Colombia cinco, *Micronycteris hirsuta*, *Micronycteris megalotis*, *Micronycteris microtis*, *Micronycteris minuta* y *Micronycteris schmidtorum* (**Ramírez-Chaves et al.**, 2021). *M. hirsuta* se diferencia por su tamaño grande (antebrazo de más de 41 mm); entre los de tamaño mediano y pequeño (antebrazo de menos de 39 mm), se encuentran el grupo de vientre oscuro, que incluye a *M. megalotis* y *M. microtis*, y el grupo de vientre claro (blanco, gris o antebrazo claro), que incluye a *M. minuta* y *M. schmidtorum*, especies que se diferencian por la longitud del pelaje dorsal (*M. minuta* entre 5 y 7 mm; *M. schmidtorum* más de 7 mm) y el tamaño del calcáneo con respecto a la pata (*M. minuta*: calcáneo < pata; *M. schmidtorum* calcáneo > pata) (**Díaz et al.**, 2021).

Micronycteris megalotis como *M. minuta* se encuentran distribuidas en todo el país; entre los 25 y los 2.400 m s.n.m. y los 5 y 1.130 m s.n.m., respectivamente. *M. hirsuta* se distribuye en las regiones de la Amazonia (departamento de Caquetá), los Andes (departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Meta, Valle del Cauca), la Caribe (departamentos de Córdoba y Magdalena), y la del Pacífico (departamento de Chocó) entre los 20 y los 1.100 m s.n.m.; y *M. microtis* en las regiones Andina (departamento de Cundinamarca) y Caribe (departamento de Magdalena) a una altitud aproximada de 310 m s.n.m. (Ramírez-Chaves *et al.*, 2021).

Materiales y métodos

Área de estudio

Los nuevos registros son del PNN El Tuparro, en el departamento de Vichada, Colombia. El Parque fue declarado área protegida en 1970 y en 1982 como Monumento Nacional y Reserva de la Biósfera (Vásquez-V. & Serrano-G., 2009; Prüssmann *et al.*, 2020). Se encuentra entre los municipios de Cumaribo y La Primavera en el Vichada y hace parte de la región de la Orinoquia en la subregión biogeográfica de la altillanura, dentro de la cuenca del río Orinoco (Prüssmann *et al.*, 2020). Limita al norte con el río Tomo (Cerro Peinillas, Estación Centro Administrativo); al sur con los ríos Tuparrito (Tuparro, corregimiento de Santa Rita) y el caño Cunavero; al oriente con el río Orinoco (Cerro Tomás); al occidente con los caños Hormiga y Janipa (estación El Tapón: entre los ríos Tomo y Tuparrito) (Barbosa, 1992). Tiene un área aproximada de 548.000 ha, entre los 5°00' - 5°34' de latitud Norte y 67°50' - 69°11' de longitud Oeste, y un rango altitudinal entre los 80 y 315 m s.n.m. (Rodríguez *et al.*, 2006; Vásquez-V. & Serrano-G., 2009) (Figura 1).

Según Villarreal-Leal (2007), el PNN El Tuparro se caracteriza por un clima denominado como Awi tropical lluvioso ligeramente húmedo, con una precipitación anual monomodal y un periodo de sequía muy marcado. La precipitación oscila entre los 1.559 (estación Bocas del Tomo) y 3.000 mm/añual (estación El Tapón). Los periodos de lluvia van de abril a octubre y la temporada seca se presenta en los meses de noviembre a marzo; la temperatura promedio es de 27,2 °C.

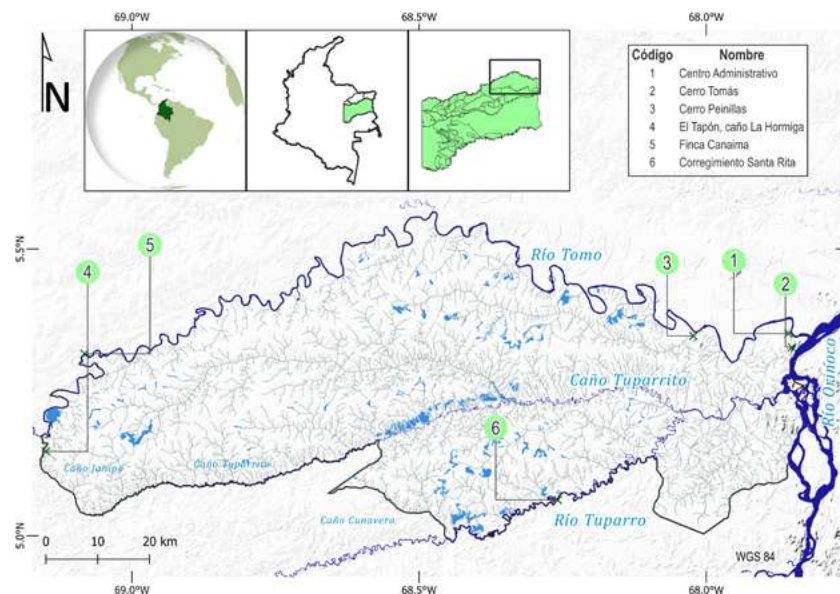


Figura 1. Parque Nacional Natural El Tuparro, departamento de Vichada, Colombia. Se especifican las coordenadas de los ejemplares examinados (1, 5, 6) y puntos estratégicos de los límites del parque (1-6) (Tabla 1). Elaboró: Didier Alonso Quimbay-Galindo, 2024

La zona se caracteriza por una vegetación boscosa o arbustiva, conformada por bosques riparios asociados a los taludes altos de los ríos y afectados por su nivel freático, con un tipo de vegetación B2, así como al bosque de altillanura o matas de monte con vegetación amazónica, es decir, del tipo B3 (Mendoza-Cifuentes & Córdoba-Sánchez, 2018) (Figura 2).

Las localidades asociadas con los ejemplares registrados son: 1) el corregimiento Santa Rita, al oriente del municipio de Cumaribo, que bordea el río Vichada; en la parte oriental del municipio limita con el PNN El Tuparro; 2) la finca (fundo) Canaima, localizada en el caño La Mojarra, y 3) la estación Centro Administrativo, en el sector noroccidental (Figura 1).

Las coordenadas de los nuevos registros se obtuvieron consultando la información del gacetero de localidades del **Instituto Humboldt** (2016), y georreferenciando los registros de acuerdo con el protocolo y las sugerencias de **Chapman & Wieczorek** (2020). En cada registro se estimó el centro corregido para las coordenadas geográficas y la incertidumbre asociada, utilizando el círculo circundante más pequeño con base en los límites territoriales del sitio identificado (por ejemplo, finca/corregimiento) (Tabla 1).



Figura 2. Hábitats del Parque Nacional Natural El Tuparro, departamento del Vichada, Colombia. **A.** Morichal. **B.** Chaparral llanero. **C.** Bosque deciduo no inundable (mata llanera). **D.** Mosaico de vegetación de sabanas y chaparrales antrópicas (?) sobre colinas, en el valle, mezcla de morichales con bosques periódicamente inundables. **E.** Vegetación de arbustales y bosques bajos deciduos sobre afloramientos de piedra (granito). **F.** Bosque de ribera sobre planicie aluvial. Fotos: Thomas R Deffler, 1976.

Tabla 1. Coordenadas georreferenciadas de los nuevos registros (*) y de los puntos estratégicos (1-6) de los límites del Parque Nacional Natural El Tuparro, departamento del Vichada, Colombia (Figura 1)

#	Localidad	Latitud (N)	Longitud (W)	Incertidumbre (m)
1*	Centro administrativo*	5°21'9,44"	67°51'24,44"	±180
2	Cerro Tomás	5°19'43,30"	67°51'3,42"	±478
3	Cerro Peinillas	5°20'54,37"	68°1'20,29"	±320
4	El Tapón, caño La Hormiga	5°8'48,91"	69°9'0,24"	±1900
5*	Finca (Fundo) Canaima, caño La Mojarra*	5°19'2,11"	69°4'58,40"	±2420
6*	Municipio de Cumaribo, corregimiento de Santa Rita*	5°3'44,72"	68°15'30,62"	±71400

Revisión de las colecciones

Se revisó la Colección de Mamíferos “Alberto Cadena García” del Instituto de Ciencias Naturales (ICN-MHN-Ma) de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá DC, Colombia; Registro Nacional de Colecciones Biológicas: RNC-005) y la Colección de Mamíferos del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH-M) (Villa de Leyva, Boyacá, Colombia; Registro Nacional de Colecciones Biológicas: RNC-003). Los ejemplares se fotografiaron siguiendo la metodología de **Sánchez-Nivicela & Muñoz-Saba** (artículo sometido).

Para la determinación del ejemplar de la especie *G. sylvestris* se siguió a **Williams & Genoways** (2007), **Sánchez et al.** (2019), **Wilson & Mittermeier** (2019), **Díaz et al.** (2016, 2021) y **Vallejo** (2021), y para los ejemplares de la especie *M. schmidtorum* a **Escobedo-Cabrera et al.** (2006), **Díaz et al.** (2016, 2021), **Wilson & Mittermeier** (2019) y **Siles & Baker** (2020).

Los caracteres cuantitativos (antebrazo, calcáneo, cola, tibia, cráneo, hueso maxilar) se midieron con un calibrador digital de precisión de 0,01 mm; las longitudes del pelaje se midieron con reglilla; las medidas de cabeza-cuerpo, oreja y pata se tomaron de la información registrada en la etiqueta, la base de datos o la libreta de campo. Las medidas del calcáneo, tibia y hueso maxilar se hicieron en el miembro derecho (**Acosta-Cala, 2019; Muñoz-Saba et al., 2019**).

En cuanto a la caracterización del sexo, si la información no estaba en la etiqueta, la base de datos o la libreta de campo, se hacía una inspección para evidenciar la presencia del pene o de las mamas en las pieles preservadas en seco de los ejemplares conservados en etanol, en los que, generalmente, se evidencian los órganos reproductores (pene, testículos; mamas, vagina). Siguiendo a **Muñoz-Saba et al.** (2019), se observó en “Machos: mayor distancia entre el aparato reproductivo (pene) y el ano. Presencia de hueso peneano (báculo). Hembras: menor distancia entre el aparato reproductivo (labio mayor) y el ano”.

El estado reproductivo se caracterizó teniendo en cuenta la información asociada en la etiqueta, la base de datos, la libreta de campo o, directamente, en el ejemplar. En las hembras se inspeccionó si las mamas eran notorias o no, así como el tamaño, el color y la presencia o no de pelo alrededor de estas. A los ejemplares hembras preservados en etanol se les examinó la condición de la vagina siguiendo de nuevo a **Muñoz-Saba et al.** (2019): “Vagina cerrada: nulípara o primípara; vagina poco abierta: primípara; vagina abierta: múltipara (varios partos). El estado de la vagina se correlaciona con el desarrollo de las mamas; la preñez se establece al tacto del abdomen; cuando se observa la vagina cerrada y las mamas pequeñas, con pelo alrededor, se infiere que la hembra estaba preñada y era primípara; no se puede verificar porque los órganos han sido extraídos y no hay ninguna información asociada, por lo tanto se escribe ‘?’”. En los ejemplares machos preservados en etanol se establece la ubicación de los testículos: “Testículos escrotales: testículos evidentes, se encuentra en actividad reproductiva; Testículos abdominales: no son tan notorios, se encuentran en posición abdominal, el pene está engrosado, ya ha tenido actividad reproductiva; Testículos inguinales: los testículos no se evidencian, el pene es pequeño, no ha tenido actividad reproductiva (inactivo)”.

La edad se establece con ayuda de un estereoscopio usando la luz de la parte inferior para generar un efecto de contraluz que permita identificar el grado de osificación de la epífisis de la primera falange del quinto dedo: en los adultos está totalmente osificado, sin presencia de luz entre los huesos; en los subadultos hay poco cartílago, visible como una delgada línea de luz, y en los juveniles hay gran cantidad de cartílago, visible como una línea gruesa de luz (**Muñoz-Saba et al., 2019**).

Resultados

Clase Mammalia
Orden Chiroptera
Familia Phyllostomidae

Glyphonycteris sylvestris* Thomas, 1896*Nombre común.** Murciélago orejudo de Thomas (Rodríguez-Mahecha *et al.*, 1995).**Estatus de conservación.** Preocupación menor (*Low Concern, LC*) (Solari, 2018).

Diagnosis. Longitud cabeza-cuerpo: 48-56 mm, cola: 9-12 mm, oreja: 16-22 mm, pata: 11-12 mm; antebrazo: 38-44 mm. Pelaje dorsal suave, tricolor, con la base y la parte distal castaño oscura y la porción central, blanca; pelaje ventral más pálido que el del dorso. Orejas grandes, anchas y puntiagudas; la parte inferior del borde exterior termina en un lóbulo bajo y redondo, con una concavidad en el borde posterior, cerca de la punta; pelaje corto (2,71 mm) en la superficie externa del borde anterior de la oreja. Hoja nasal angosta, unida al labio superior en su base. Mentón con un par de almohadillas dérmicas en forma de 'V', sin papila central. Cola corta que sobrepasa la membrana interfemorales (uropatagio) por la cara dorsal. Membranas alares unidas al lado del tobillo. Calcáneo más corto que el pie. Longitud total del cráneo: 20,2 mm. Caja craneana abombada, sin cresta sagital. Hueso maxilar: 13,6 mm. Dos pares de incisivos superiores, los internos, caniformes y los externos, reducidos y ocultos por el cíngulo del canino; incisivos inferiores trilobulados, altura casi igual al ancho de la corona. Los caninos superiores apenas sobrepasan los incisivos. Altura de la corona de los premolares superiores P3 y P4 casi igual, P3 con cúspides accesorias en el margen lingual y en el posterior, trilobuladas con apariencia molariforme; P4 con cúspides ligeramente curvadas y cíngulo lingual con contorno convexo; premolares inferiores alineados en la fila de la mandíbula (Williams & Genoways, 2007; Sánchez *et al.*, 2019; Wilson & Mittermeier, 2019, p:539; Díaz *et al.*, 2021; Vallejo, 2021) (Figura 3).

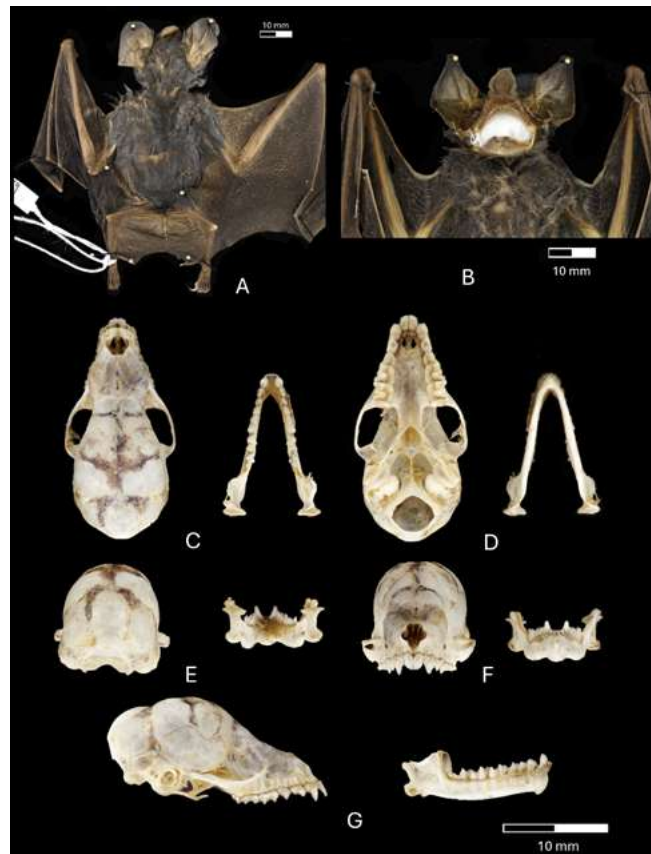


Figura 3. *Glyphonycteris sylvestris* (Phyllostomidae, Chiroptera). IAvH-M 8362 ♀. **A.** Piel, vista dorsal. **B.** Piel, vista ventral. **C.** Cráneo, vista dorsal. **D.** Cráneo, vista ventral. **E.** Cráneo, vista posterior. **F.** Cráneo, vista anterior. **G.** Cráneo, vista lateral. Fotos: Nathaly Calvo-Roa, 2024.

Distribución. Centro América: México, Nicaragua, Costa Rica, Panamá; Suramérica: Colombia, Venezuela, Guayanas, Brasil, oriente (E) de Ecuador, Perú, Trinidad (**Wilson & Mittermeier, 2019**). En Colombia se encuentra en un rango altitudinal entre los 0 y 500 m s.n.m en las regiones biogeográficas de la Amazonia (Caquetá), Andina (Antioquia), y Caribe (Bolívar) (**Solari et al., 2013; Ramírez-Chaves et al., 2021**). En el presente artículo se amplía la distribución a la región de la Orinoquia (Vichada, PNN El Tuparro) (**Figuras 1, 4**).

Hábitat. Bosque húmedo tropical primario o poco perturbado (**Wilson & Mittermeier, 2019**). Sabanas y chaparrales.

Dieta. Insectos, material vegetal (semillas de *Piper* sp., Piperaceae) (**Mantilla-Meluk et al., 2018; Sánchez et al., 2019**).

Refugio. Cuevas, túneles, huecos de árboles (**Wilson & Mittermeier, 2019**).

Especímenes examinados. COLOMBIA. **Vichada.** Municipio de Cumaribo, corregimiento Santa Rita, Parque Nacional Natural El Tuparro, 5°3'44,72"N 68°15'30,62"OW; Hábitat: sabanas, chaparral; IAvH-M 8362 ♀, subadulta, preñada?, primípara?, vagina cerrada, mamas pequeñas; 20 feb 2004 (temporada seca); material preservado: piel en etanol, cráneo (**Figuras 1, 2d, 3**).

Clase Mammalia

Orden Chiroptera

Familia Phyllostomidae

Micronycteris schmidtorum Sanborn, 1935

Nombre común. Murciélago orejudo buchiblanco (**Rodríguez-Mahecha et al., 1995**).

Estatus de conservación: Preocupación menor (LC) (**Sampaio et al., 2016**).

Diagnosis. Longitud cabeza-cuerpo: 53,3-67 mm, cola: 10-17 mm, oreja: 16-23 mm, pata: 8-11 mm, antebrazo: 31,6-35,3 mm. Pelaje dorsal largo, suave, de color castaño, con bases blancas; pelaje ventral de color amarillo claro, gris claro, marrón claro, a veces, casi blanco y más pálido. Hoja nasal bien desarrollada, delgada y puntiaguda. Orejas largas y redondeadas, con pelaje en el tercio inferior del borde medial del pabellón auricular de 5 mm de longitud o más. Membrana conectora de las orejas con una muesca moderadamente profunda en la parte central. La cola no llega al borde del uropatagio y la membrana tiene más del doble de la longitud de la cola. Calcáneo más largo que la pata. Longitud de la tibia



Figura 4. Distribución de *Glyphonycteris sylvestris* (Phyllostomidae, Chiroptera). Modificado de **Solari (2018)** por Didier Alonso Quimbay-Galindo, 2024.

más de 14,5 mm. Longitud total del cráneo: 20,2 mm; longitud del hueso maxilar: 10,57 mm. Rostro triangular no inflado en la región de los premolares y molares. Constricción postorbital estrecha con respecto al rostro y el cráneo. Cresta sagital baja y presente sobre los parietales. Incisivos inferiores hipsodontos bilobulados o trilobulados. Premolar superior, P3, de casi tres cuartos del tamaño de P2; P4 es aproximadamente igual en tamaño a P2 (Escobedo-Cabrera *et al.*, 2006; Wilson & Mittermeier, 2019, p:491; Siles & Baker, 2020) (Figura 5).

Distribución. Desde el sur-orientado (SE) de México en Centro América hasta Colombia, Venezuela, Guayana Francesa, este de Perú y Brasil en Suramérica (Wilson & Mittermeier, 2019). En Colombia se encuentra en un rango altitudinal entre los 10 y 160 m s.n.m. en las regiones biogeográficas Andina (Antioquia, Norte de Santander, Santander), Caribe (Magdalena), Orinoquia (Vichada) y del Pacífico (Chocó) (Solari *et al.*, 2013; Ramírez-Chaves *et al.*, 2021). En el presente estudio se especifican las localidades del PNN El Tuparro (Vichada) (Figuras 1, 6).

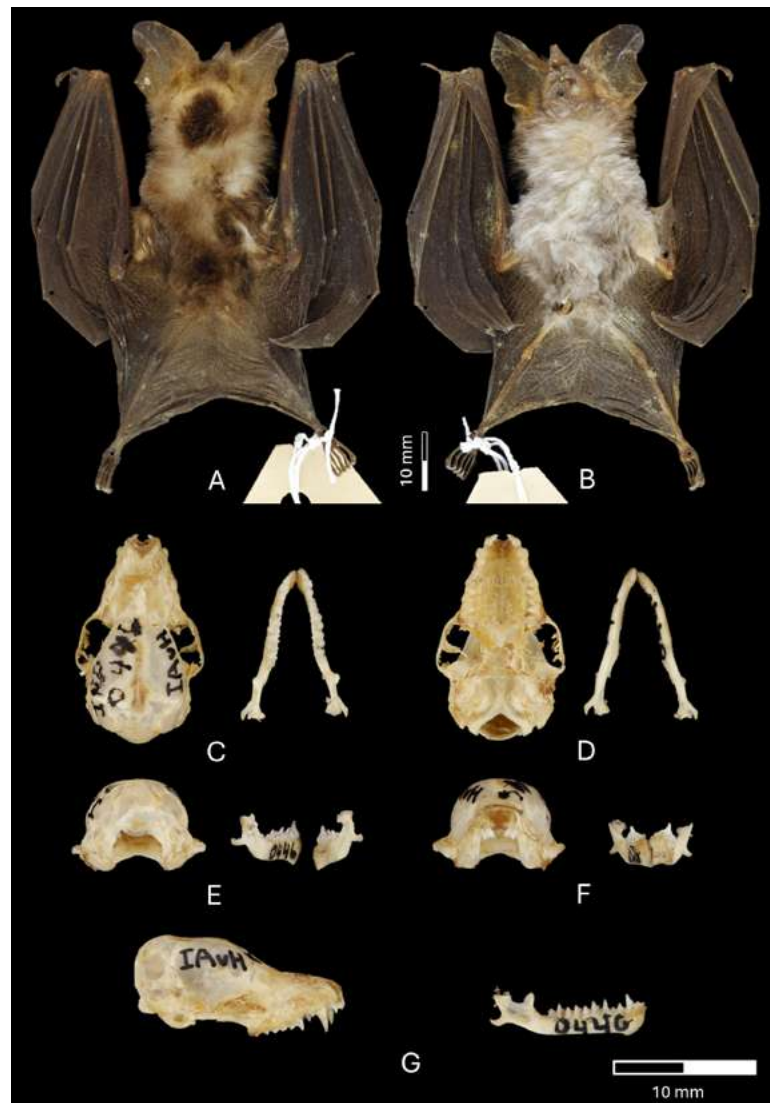


Figura 5. *Micronycteris schmidtorum* (Phyllostomidae, Chiroptera). IAvH-M 446 ♀. **A.** Piel, vista dorsal. **B.** Piel, vista ventral. **C.** Cráneo, vista dorsal. **D.** Cráneo, vista ventral. **E.** Cráneo, vista posterior. **F.** Cráneo, vista anterior. **G.** Cráneo, vista lateral. Fotos: Nathaly Calvo-Roa, 2024.



Figura 6. Distribución de *Micronycteris schmidtorum* (Phyllostomidae, Chiroptera). Modificado de Sampaio *et al.* (2016) por Didier Alonso Quimbay-Galindo, 2024.

Hábitat. Bosque primario, semideciduo, caducifolio y espinoso; pantanos, pastos, huertas y áreas agrícolas (Wilson & Mittermeier, 2019; Escobedo-Cabrera *et al.*, 2006). Bosque de ribera, bosque bajo asociado con afloramientos de piedra.

Dieta. Insectos: Lepidoptera (Howell & Burch, 1974).

Refugio. Hueco de árboles (Escobedo-Cabrera *et al.*, 2006).

Especímenes examinados. COLOMBIA. Vichada. Finca (fundo), Canaima, caño La Mojarra, Parque Nacional Natural El Tuparro, 5°19'2,11"N 69°4'58,40"O; Hábitat: bosque de ribera; IAvH-M 446 ♀, adulta, primípara, mamas no desarrolladas; 10 dic 1970 (temporada seca); material preservado: piel, cráneo. Estación Centro Administrativo, Parque Nacional Natural El Tuparro, camino a los cerros de piedra, 5°17'87"N 67°58'16,60"OW; hábitat: bosque bajo asociado con afloramientos de piedra; ICN-MHN-Ma 13996 ♂, subadulto, inactivo, testículos inguinales; 4 abr 1995 (temporada de lluvia); material preservado: piel en etanol sin cráneo (Figuras 1, 2e,f, 5).

Discusión

A manera de corolario, reiteramos que las colecciones biológicas son una biblioteca y que cada ejemplar es un libro que tendrá tantas páginas como investigaciones se hagan sobre él; su calidad se relaciona directamente con la información inscrita desde el momento de su captura, el tipo y la calidad de su preservación, su conservación y almacenamiento, y, sobre todo, lo relacionado con las investigaciones y la curiosidad del investigador.

Hacemos énfasis en la importancia de la observación de caracteres cualitativos diagnósticos asociados con la historia evolutiva de las especies que se evidencian en la piel (en este caso, la forma de la orejas, la hoja nasal, el labio superior y el mentón; el pelaje en la parte anterior de la oreja; la forma de las membranas alares, de la cola y el uropatagio, y el tamaño y la forma del calcáneo); y en el material óseo (específicamente, en este caso, en la forma del cráneo, el rostro, la mandíbula y los dientes), lo que trasciende el estudio únicamente de las variaciones morfométricas (longitud cabeza-cuerpo, cola, oreja, pata, antebrazo, entre otros), las cuales se deben a factores ambientales y genéticos, entre otros. Estas medidas se emplean posteriormente para “reasignar” a los individuos a una especie con el empleo de estimadores como el jackknife (Siles & Baker, 2020). Esto sin olvidar que hay otros caracteres que se pueden usar de forma complementaria para la identificación de las especies, por ejemplo, los caracteres moleculares.

Si bien **Solari et al.** (2013) registraron a *M. schmidtorum* en el departamento del Vichada, no mencionaron la localidad específica ni el *voucher*. En la Colección de Mamíferos del Instituto Humboldt se encuentra el ejemplar (IAvH-M 446), recolectado en 1970 por Jorge Ignacio Hernández Camacho, Hernando Chiriví G. y Gonzalo Aguirre Suárez, e identificado como *Micronycteris minuta*, y en la colección del Instituto de Ciencias Naturales, el ejemplar (ICN-MHN-Ma 13996), recolectado en 1995 por Yaneth Muñoz-Saba.

A partir del análisis de los ejemplares depositados en colecciones biológicas se registraron estas dos especies de murciélagos (*G. sylvestris*, *M. schmidtorum*) consumidoras de insectos en el PNN El Tuparro (Vichada). En este sentido, vale anotar que la falta de revisión exhaustiva en colecciones es frecuente, como lo mencionan **Siles & Baker** (2020) al describir a *Micronycteris tresamici*, que estuvo almacenada durante 43 años hasta que fue estudiada con detalle.

Es relevante señalar que las áreas biogeográficas representadas en el PNN El Tuparro son las sabanas inundables (estación Centro Administrativo, corregimiento Santa Rita, finca Canaima) y al oriente, la plataforma Maipures–Orinoco (**Rincón et al.**, 2024). Según la zonificación de la Reserva de la Biósfera El Tuparro (**Rodríguez et al.**, 2006), el corregimiento Santa Rita se ubica en el sector sur, asociado con los caños Maipures y Tiro, y los ríos Orinoco y Tuparro, área que se caracteriza por la presencia de asentamientos históricos de colonos y etnias indígenas, y un marcado uso del suelo (cultivos de coca, ganadería, agricultura); en el caño La Mojarrá, sector noroccidental, y la estación Centro Administrativo en la zona núcleo. La región donde se encuentran esas localidades ha sido caracterizada por **Prüssmann et al.** (2020, Figura 10, p: 34) como un corredor de conectividad hídrica entre diferentes áreas protegidas de la región Orinoquia (por ejemplo, la Reserva Nacional Natural Puinawai) (**Figura 1**).

Por ello, consideramos relevante el detalle del registro de las localidades de estas dos especies, ya que las listas nacionales y regionales constituyen herramientas imprescindibles para la toma de decisiones referidas a la conservación de la biodiversidad de nuestros ecosistemas (**Solari et al.**, 2013).

Etter et al. (2017) plantean que los ecosistemas que se registran en el PNN El Tuparro se encuentran en una categoría de amenaza de preocupación menor. **Rincón et al.** (2014) le dan un gran significado biológico al sector El Tapón, área contigua al caño La Mojarrá (sabanas que rodean la desembocadura del río, cuencas, subcuencas, humedales), y una significación media al sector del corregimiento de Santa Rita y el Centro Administrativo (sabanas de la región sur del río Orinoco). **Solari** (2018) y **Sampaio et al.** (2016) registraron a *G. sylvestris* y *M. schmidtorum* en la categoría de amenaza de preocupación menor. Sin embargo, se sugiere analizar detalladamente las localidades en mención teniendo en cuenta la comunidad, el uso del suelo, la fecha de recolección de los ejemplares y el deterioro ambiental, ya que es posible que las poblaciones de estas especies estén disminuyendo, especialmente si se considera que estamos hablando de murciélagos filostómidos, pertenecientes a la subfamilia Phyllostominae, sensibles a la perturbación antrópica debido a su dieta (insectívoros de follaje, espigadores) y a sus refugios especializados (huecos de árboles) (**Medellín et al.**, 2000). Como lo mencionan **Rincón et al.** (2024), estos análisis contribuyen a la detección de vacíos de información y alertas tempranas para el diseño de planes de manejo, uso y conservación de los recursos biológicos y la sostenibilidad del área de conservación.

Conclusión

Se amplía aquí la distribución del murciélago orejudo de Thomas, *Glyphonycteris sylvestris*, en la región Orinoquia, departamento de Vichada, Colombia.

Se especifican las localidades del murciélago orejudo buchiblanco, *Micronycteris schmidtorum*, en el departamento de Vichada, Colombia.

Agradecimientos

A *Applied Biodiversity Foundation* por la financiación de la revisión de colecciones. A Hugo López Arévalo, Director de la Colección de Mamíferos 'Alberto Cadena García', Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia (Bogotá DC), y a Nicolás Reyes Amaya, curador de la Colección de Mamíferos, Centro de Colecciones y Gestión de Especies, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Villa de Leyva, Boyacá), por permitir la consulta de las respectivas colecciones. A Alejandra Castaño Rivera, investigadora asistente del Centro de Colecciones y Gestión de Especies, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, por el apoyo durante la visita a la colección. A Didier Alonso Quimbay-Galindo por la realización de las figuras 1, 4 y 6, y la asesoría en el área de estudio. A Gerardo Aymard Corredor, por la asesoría en la descripción de los hábitats que se diagraman en la figura 2. A Thomas R Defler, por permitir el uso de las fotografías que se diagraman en la figura 2. A la Hospedería Don Paulino en Villa de Leyva (Boyacá), por el apoyo durante la estadía en esta ciudad, y a los revisores anónimos.

Contribución de los autores

NCR: toma de datos en colecciones biológicas, determinación de material biológico, análisis, escritura de la publicación. YMS: determinación de material biológico, análisis, escritura de la publicación. DCP: análisis, escritura de la publicación, financiación de la revisión de colecciones.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Acosta-Cala, N.** (2019). Grupos funcionales de los murciélagos presentes en la ciudad de Bogotá DC. Trabajo de grado, Bogotá D.C., Colombia: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Barbosa, C.** (1992). *Contribución al conocimiento de la flórmula del PNN El Tuparro. Bogotá D.C., Colombia.* Biblioteca Andrés Posada.
- Chapman, A.D., Wicczorek, J.R.** (2020) *Georeferencing best practices.* Copenhagen: GBIF Secretariat. <https://doi.org/10.15468/doc-gg7h-s853>
- Defler, T.R., Bueno, M.L.** (2007). *Aotus* diversity and the species problem. *Primate Conservation*, 22, 49-64.
- Díaz, M.M., Bárquez R.M.** (2009). Primer registro de *Micronycteris microtis* (Phyllostomidae, Phyllostominae) para la Argentina. *Chiroptera Neotropical*, 15(2), 461-465.
- Díaz, M.M., Solari, S., Aguirre, L.F., Aguiar, L.M.S., Bárquez R.M.** (2016). *Clave de Identificación de los Murciélagos de Sudamérica.* Fundación Programa de Conservación de los Murciélagos de Argentina (PCMA).
- Díaz, M.M., Solari, S., Gregorin, R., Aguirre, L.F., Bárquez R.M.** (2021). *Clave de Identificación de los Murciélagos Neotropicales.* Fundación Programa de Conservación de los Murciélagos de Argentina (PCMA).
- Escobedo-Cabrera, E., León-Paniagua, L., Arroyo-Cabrales, J.** (2006). Geographic distribution and some taxonomic comments of *Micronycteris schmidtorum* Sanborn (Chiroptera: Phyllostomidae) in Mexico. *Caribbean Journal of Science*, 42(1), 129-135.
- Etter, A., Andrade, A., Saavedra, K., Amaya, P., Arévalo, P.** (2017). *Estado de los Ecosistemas Colombianos: una aplicación de la metodología de la Lista Roja de Ecosistemas.* Pontificia Universidad Javeriana, Conservación Internacional Colombia.
- Howell, D.J., Burch, D.** (1974). Food habits of some Costa Rican bats. *Rev. Bio. Trop.*, 21(2), 281-294.
- Instituto Humboldt.** (2016). *Gacetero de localidades: sitios de referencia donde se han realizado recolecciones de especímenes y que han sido georreferenciados.* Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, SIB Colombia. <https://biodiversidad.co/consultar/gacetero/>
- Mantilla-Meluk, H., Mosquera, F., Trujillo, F., Pérez-Amaya, N., Velásquez, A., Vargas P.A.** (2017). Mamíferos del sector norte del Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete. *Revista Colombia Amazónica*, 10, 99-134.

- Medellín, R.A., Equihua, M., Amin, M.A.** (2000). Bat diversity and abundance as indicators of disturbance in Neotropical rainforest. *Conservation Biology*, 14(6), 1666-1675. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2000.99068.x>
- Mendoza-Cifuentes, H., Córdoba-Sánchez, M.** (2018). Catálogo de la flora de los Parques Nacionales Naturales de Colombia: Parque Nacional Natural El Tuparro. *Biota Colombiana*, 19(1), 45-59. <https://doi.org/10.21068/c2018.v19s1a05>
- Muñoz-Saba, Y., Calvo-Roa, N., Gómez-Sandoval, P.A., Casallas-Pabón, D., Lynch, J.D., Barrientos, L., Gómez-Sánchez, D.** (2019). *Guía de campo de los mamíferos, anfibios y reptiles de Santa María (Boyacá, Colombia)*. No 23, Serie Guías de Campo. Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Prüssmann, J., Rincón, S.A., Tavera, H.A., Suárez, C.F.** (2020). *Estructura ecológica principal de la Orinoquia colombiana: actualización metodológica mapa SuLu*. WWF, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety.
- Ramírez-Chaves, H.E., Suárez Castro, A.F., Morales-Martínez, D.M., Rodríguez-Posada, M.E., Zurc, D., Concha Osbahr, D.C., Trujillo, A., Noguera-Urbano, E.A., Pantoja-Peña, G.E., González-Maya, J.F., Pérez-Torres, J., Mantilla-Meluk, H., López-Castañeda, C., Velásquez-Valencia, A., Zárrate-Charry, D.** (2021). *Mamíferos de Colombia*. Sociedad Colombiana de Mastozoología. Version 1.12. [https://doi.org/10.15472/k11whs](https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=mamiferos_col)
- Rincón, S.A., Suárez, C.F., Romero-Ruiz, M., Flantua, S.G.A., Sarmiento, A., Hernández, N., Palacios L., M.T., Naranjo, L.G., Usma, S.** (2014). *Identifying Highly Biodiverse Savannas based on the European Union Renewable Energy Directive (SuLu Map): conceptual background and technical guidance*. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety.
- Rodríguez-Mahecha, J.V., Hernández-Camacho, J.I., Defler, T.R., Alberico, M., Mast, R.B., Mittermeier, R.A., Cadena, A.** (1995). Mamíferos colombianos: sus nombres comunes e indígenas. *Occasional Papers in Conservation Biology*, 3, 1-56.
- Rodríguez, J., Mora, J., Vargas, O.** (2006). *Plan de Investigaciones del Parque Nacional Natural y Reserva de Biósfera El Tuparro*. Convenio de Cooperación Interinstitucional Parques Nacionales Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Ruiz-García, M., Pinedo-Castrol, M., Mark S., J.** (2023). Morphological and genetics support for a hitherto undescribed spotted cat species (genus *Leopardus*; Felidae, Carnivora) from the Southern Colombian Andes. *Genes*, 14(6), 1266. <https://doi.org/10.3390/genes14061266>.
- Sampaio, E., Lim B., Peters, S.** (2016). *Micronycteris schmidtorum*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T13383A22124156. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-2.RLTS.T13383A22124156>
- Sánchez-Nivicela, J.C. & Muñoz-Saba, Y.** (sometido). *Preparación, montaje de especímenes de colecciones científicas para fotografía*. En J.E. Simmons, Y. Muñoz-Saba (Eds.), Cuidado, manejo y conservación de las colecciones biológicas. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez, M.S., Labaroni, C.A., Castellanos I., F.X., Baldo, D.** (2019). First record of *Glyphonycteris sylvestris* Thomas, 1896 (Chiroptera: Phyllostomidae: Glyphonycterinae) for Argentina, with comments on its karyotype. *Mastozoología Neotropical*, 26(2), 420-429. <https://doi.org/10.31687/saremMN.19.26.2.0.12>
- Siles, L., Baker, R.J.** (2020). Revision of the pale-bellied *Micronycteris* Gray, 1866 (Chiroptera, Phyllostomidae) with descriptions of two new species. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 00, 1-21. <https://doi.org/10.1111/jzs.12388>
- Simmons, J.E., Muñoz-Saba, Y.** (2005). *Cuidado, manejo y conservación de las colecciones biológicas*. Conservación Internacional Colombia: Serie Manuales para la Conservación.
- Solari, S.** (2018). *Glyphonycteris sylvestris*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T13384A22123687. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T13384A22123687>
- Solari, S., Muñoz-Saba, Y., Mahecha-Rodríguez, J.V., Defler, T.R., Ramírez-Chaves, H.E., Trujillo, F.** (2013). Riqueza, endemismos y conservación de los mamíferos de Colombia. *Mastozoología Neotropical*, 20(2), 301-365.
- Vásquez-V., V.H., Serrano-G., M.A.** (2009). *Las áreas naturales protegidas de Colombia*. Conservación Internacional Colombia, Fundación Biocolombia.
- Vallejo, A.F.** (2021). *Glyphonycteris sylvestris*. En J. Brito, M.A. Camacho, V. Romero, A.F. Mamíferos del Ecuador. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Versión 2018.0. <https://bioweb.bio/faunaweb/mammaliaweb/FichaEspecie/Glyphonycteris%20sylvestris>, accedida 18 de marzo de 2024.

-
- Villarreal-Leal, H.** (2007). *Caracterización de los paisajes*. En H. Villarreal-Leal, H., J. Maldonado-Ocampo (Eds.), *Caracterización biológica del Parque Nacional Natural El Tuparro (sector noreste), Vichada, Colombia* (41-50). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Villarreal-Leal, H., Maldonado-Ocampo, J.** (2007). *Caracterización biológica del Parque Nacional Natural El Tuparro (sector noreste), Vichada, Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Williams, S.L., Genoways, H.H.** (2007). *Subfamily Phyllostominae Gray, 1825*. En A.L. Gardner (Ed). *Mammals of South America* (255-300). The University of Chicago Press.
- Wilson, D.E., Mittermeier, R.A.** (2019). *Handbook of the mammals of the world: bats*. Lynx Edicions.

Artículo original

Cordia nicandroides, una llamativa nueva especie de Cordiaceae del norte de Colombia

Cordia nicandroides, a striking new species of Cordiaceae from northern Colombia

● José Luis Fernández-Alonso^{1,*}, ● Álvaro A. Cogollo-Pacheco²

¹ Departamento de Biodiversidad y Conservación, Real Jardín Botánico RJB-CSIC, Madrid, España

² Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe de Medellín; Corporación SalvaMontes Colombia, Medellín, Colombia

Resumen

Se describe una nueva especie del género *Cordia*, *Cordia nicandroides*, del norte de Colombia, la cual se distingue por sus frutos grandes, drupáceos, nuciformes, y protegidos por un amplio cáliz acrescente y pentacostado. Es un árbol que se da principalmente en bosques húmedos o de transición a bosque seco, asociado a cursos de agua. Tiene afinidades notables con *Cordia oncocalyx*, especie anemócora, endémica de los biomas Caatinga y Mata atlántica del oriente de Brasil, pero se diferencia bien de esta porque, primero, presenta cáliz fructíferos de menor tamaño (43-45 x 53-56 mm) y estrechamente ceñidos al fruto, en tanto que en *C. oncocalyx* su tamaño es mayor (43-80 x 45-75 mm) y no están ceñidos al fruto; además, en *C. nicandroides* los frutos son anchamente ovoides y de mayor tamaño (40-42 x 38-40 mm), y en *C. oncocalyx* son anchamente elipsoides y más pequeños (17-21 x 16-19 mm). Si se considera el hábitat de esta especie, estos frutos, más grandes y compactos, con envoltura calicina rígida y apergamina, sugieren la presencia del síndrome de hidrocoria en el tipo de dispersión de las diásporas.

Palabras clave: anemocoria, *Auxemma*, Boraginaceae, Brasil, *Cordia oncocalyx*, hidrocoria.

Abstract

We describe here a new species of the genus *Cordia*, *C. nicandroides*, from Northern Colombia, characterized, particularly, for its large drupaceous, nuciform fruits, protected by a wide, pentasided, accrescent calyx. This tree is mainly distributed in humid forests or transition to dry forests, associated with water courses. It has notable affinities with *Cordia oncocalyx*, an anemochorous species, endemic to the Caatinga and Atlantic Forest biomes of eastern Brazil. However, it differs clearly from *C. oncocalyx*, first, for its smaller fruiting calyxes (43–45 x 53–56 mm) closely attached to the fruit, compared to *C. oncocalyx* larger ones (43–80 x 45–75 mm) and not attached to fruits, besides the larger, broadly ovoid fruits (40–42 x 38–40 mm) vs. the *C. oncocalyx* broadly ellipsoid fruits (17–21 x 16–19 mm). The species' habitat and these larger and more compact fruits, with a rigid and parchment-like calycine envelope, suggest hydrochory syndrome in the type of diaspore dispersal.

Keywords: Anemochory; *Auxemma*; Boraginaceae; Brazil; *Cordia oncocalyx*; hydrochory.

Introducción

Se estudiaron recolecciones recientes en bosques húmedos, secos y de transición de secos a húmedos del norte de Colombia de un árbol desconocido que, por sus caracteres más conspicuos, podría asignarse a Ehretiaceae Mart. o Cordiaceae R. Br. ex Dumort. Algunas peculiaridades morfológicas de los cáliz acrescentes, del gineceo y de las grandes drupas nuciformes, nos llevaron a considerar, en primera instancia, el grupo de géneros de *Ehretia* P.Br., *Bourreria* P.Br., *Cordia* L. y *Lepidocordia* Ducke (APG, 2016; Gottschling *et al.*, 2016). Un análisis más detallado del pistilo de estilo bífido, de los frutos con un solo

Citación: Fernández-Alonso JL, Cogollo-Pacheco ÁA. *Cordia nicandroides*, una llamativa nueva especie de Cordiaceae del norte de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):354-367, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefy.2569>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

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

Recibido: 22 de febrero de 2024

Aceptado: 28 de mayo de 2024

Publicado en línea: 11 de junio de 2024



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

hueso leñoso provisto de largas proyecciones radiales y de los cotiledones típicamente plegados de sus plántulas, nos decantaron por un grupo atípico de especies del género *Cordia*, a partir de las recientes acotaciones consideradas en la circunscripción de este grupo (Gottschling & Miller, 2006; Gottschling *et al.*, 2016).

Este árbol peculiar se adscribe al pequeño grupo de especies de *Cordia*, tratado hasta fechas recientes dentro del género *Auxemma* Miers, y considerado endémico o cuasiendémico de la Caatinga (Gottschling & Miller, 2006; Miller & Gottschling, 2007; Melo *et al.*, 2018). También guarda cierta semejanza con la especie sudamericana *Cordia saccellia* Gottschling & J.S. Mill., también tratada hasta hace poco dentro del pequeño género *Saccellium* Hum. & Bonpl., grupo con el que comparte la presencia del estilo bifido, el endocarpo soldado en un solo hueso y los cotiledones plegados. Aunque esta distintiva combinación de caracteres fue motivo de su antigua asociación con la familia Ehretiaceae (Baillon, 1891), actualmente la morfología y la información molecular apoyan su asignación a la sección (sect.) *Cordia* del género *Cordia* L. (Gottschling *et al.*, 2005; Gottschling & Miller, 2006). Cabe anotar que, aunque recientemente también el género *Cordia* estuvo adscrito a Ehretiaceae (Gottschling *et al.*, 2016), lo tratamos aquí en Cordiaceae, junto al género *Varronia* P. Browne (Miller & Gottschling, 2007), siguiendo la ordenación actualmente avalada por Luebert *et al.* (2016) y Heigl *et al.* (2020). *Cordia* en su circunscripción actual agrupa a unas 350 especies de distribución pantropical y se diversifica mayormente en el Neotrópico (Gottschild *et al.*, 2016). En Colombia se han registrado hasta la fecha 31 a 32 especies si se consideran los ajustes a la cifra inicial de 31 especies incluidas en el Catálogo de Plantas de Colombia (Miller, 2016), los cuales se deben a transferencias pendientes de especies de *Cordia* al género *Varronia* y a la descripción de nuevas especies (Fernández-Alonso & Melo, 2021; Miller *et al.*, 2023; Miller, 2023).

Entre las especies de *Cordia* mencionadas en el “grupo *Auxemma*”, cuya distribución se concentra en la Caatinga del noreste de Brasil, sin duda la mayor afinidad es con la especie conocida como “pau-branco”, *C. oncocalyx* Allemão (Carvalho, 2008; Guimaraes *et al.*, 2013), especie con la que se compara principalmente la nueva especie que aquí se describe.

Materiales y métodos

Se estudiaron las recolecciones e imágenes complementarias recientes de un árbol no conocido, provenientes de varias localidades de los departamentos de Córdoba y Bolívar en el norte de Colombia, efectuadas por uno de nosotros (ACP), las cuales asignamos tentativamente al género *Cordia*; los especímenes recolectados han quedado depositados en los herbarios COL, HUA, HUC, FMB, JAUM, JBGP y MA. Asimismo, se localizaron y estudiaron dos colecciones de herbario (COL) indeterminadas, hechas en la década de 1970 en el departamento de Córdoba, y asignables a este mismo árbol, así como otras colecciones relacionadas del género *Cordia* e imágenes de pliegos depositados en los herbarios COL, F, K, MA, NY, US (acrónimos según Thiers, 2020). Por último, se estudiaron imágenes complementarias de material de herbario y tipos nomenclaturales en la base de datos y la plataforma Global Plants de JSTOR (2024).

El estudio morfológico del nuevo taxón propuesto y de las especies comentadas con las que se relaciona en este estudio, se basaron en los materiales comentados, que fueron procesados, en su mayoría, en las instancias del herbario JAUM (Medellín) y del herbario MA (Madrid). El estudio morfológico se hizo con la metodología ya referida en contribuciones anteriores (Fernández-Alonso & Melo, 2021) y la terminología descriptiva se ajustó, básicamente, a Stearn (1998), Harris & Harris (2001), Ellis *et al.* (2009) y Luebert *et al.* (2016). Las fotografías de acercamiento del indumento y de algunas estructuras florales se tomaron con una lupa binocular Nikon SMZ645 (Japón), lente de 100x y cámara Canon PowerShot SX260HS (Holanda). El estado de conservación sugerido se determinó de acuerdo con los criterios y subcriterios de categorización de riesgo de la UICN V 3.1 (UICN, 2012), actualizados en el 2022, y con el soporte de la biblioteca

“ConR” (Dauby *et al.*, 2017) del programa R (R Development Core Team, 2017). Para los avances de categorización de riesgo de la especie, se tomaron como referencia los parámetros de la IUCN (2022).

Resultados

Cordia nicandroides Fern.Alonso & Cogollo, *sp. nov.* (Figuras 1-6)

TIPO: COLOMBIA. Córdoba. Municipio de Tierralta, vereda Guarumal abajo, vía a El Loro, margen izquierda de la quebrada El Loro; ca. 250 m de la apartada a El Loro, vía Tierralta – Urrá, alt. 70 m; 8° 03' 1,87" N; 76° 07' 51,16" O.; 27 octubre 2022, fl., fr., n. v.: *topo*, Álvaro Cogollo-Pacheco 14227 & José A. Cogollo L., Juan Molina, Leivis Muñoz; Holótipo: JAUM 100001 (Figura 1); isótipos: COL, FMB, HUC, JAUM, JBGp.

Diagnosis. It resembles *Cordia oncocalyx* Allemao, in the general arrangement of the inflorescences and in the noticeably accrescent and ribbed calyx that accompanies the fruit, but it can be well differentiated because the species described here have smaller fruiting calyx, measuring 43–45 x 53–56 mm closely attached to the nuciform fruit; this one broadly ovoid, larger in size, 40–42 x 38–40 mm, acute at the apex (vs. fruiting calyx of 45–80 x 45–75 mm, loosely covering the fruit, this one broadly ellipsoid of 17–21 x 16–19mm).



Figura 1. *Cordia nicandroides* Fern.Alonso & Cogollo. A. Fotografía del holótipo A. Cogollo & al. 14227 (JAUM 100001). Fotografía de Á. Cogollo y N. López.

Árboles de (5-)8-20(-25) m de altura, **tronco** con corteza grisácea; **ramas** jóvenes de 9-11 mm de diámetro, con médula blanquecina y suberosa, corteza grisácea con lenticelas elípticas, conspicuas; **yemas** terminales con hojas jóvenes de indumento hispido, notorio, marrón-amarillento en seco, tricomas simples, densamente dispuestos; glabrescentes en la madurez (**Figura 3**). **Hojas** insertas de modo esparcido en los ejes, raramente subopuestas, y más o menos agrupadas en las zonas distales de las ramas jóvenes; **estípulas** ausentes; **pecíolo** de 13-45 mm x ca. 2 mm, a veces levemente canaliculado en la superficie adaxial, pubescente con tricomas simples, largos y más o menos dispersos; **lámina** verde intenso en el haz y verde pálido en el envés, membranácea a subcartácea, estrechamente oblanceolada a estrechamente oblonga, de (8-)10-20(-30) × 3,5-6,5(-10) cm, ápice agudo, levemente acuminado, acumen de 3-5 mm longitud, base aguda, estrechamente cuneada, margen gruesa e irregularmente sinuosa y eroso-aserrada sólo en la mitad distal; vena media

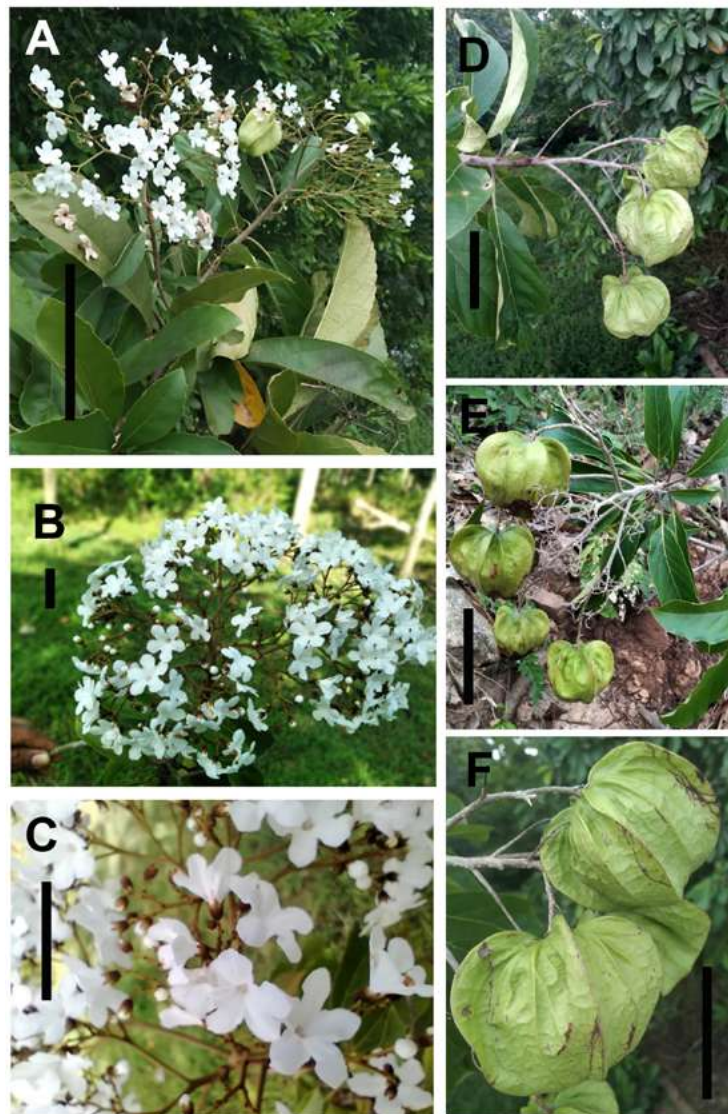


Figura 2. *Cordia nicandroides* Fern.Alonso & Cogollo. **A.** Rama terminal con inflorescencia (vista lateral). **B.** Inflorescencia de contorno globoso, vista desde arriba. **C.** Detalle de las últimas ramificaciones y flores de la inflorescencia. **D., E.** y **F.** Detalle de los ejes de la infrutescencia, con algunos frutos péndulos desarrollados. (**A-D**, a partir de *Cogollo 14260*, de Montería, Córdoba). Fotografías de A. Cogollo. Escalas: **A** = 10 cm; **B, C** = 1 cm; **D, E** = 5 cm; **F** = 4 cm

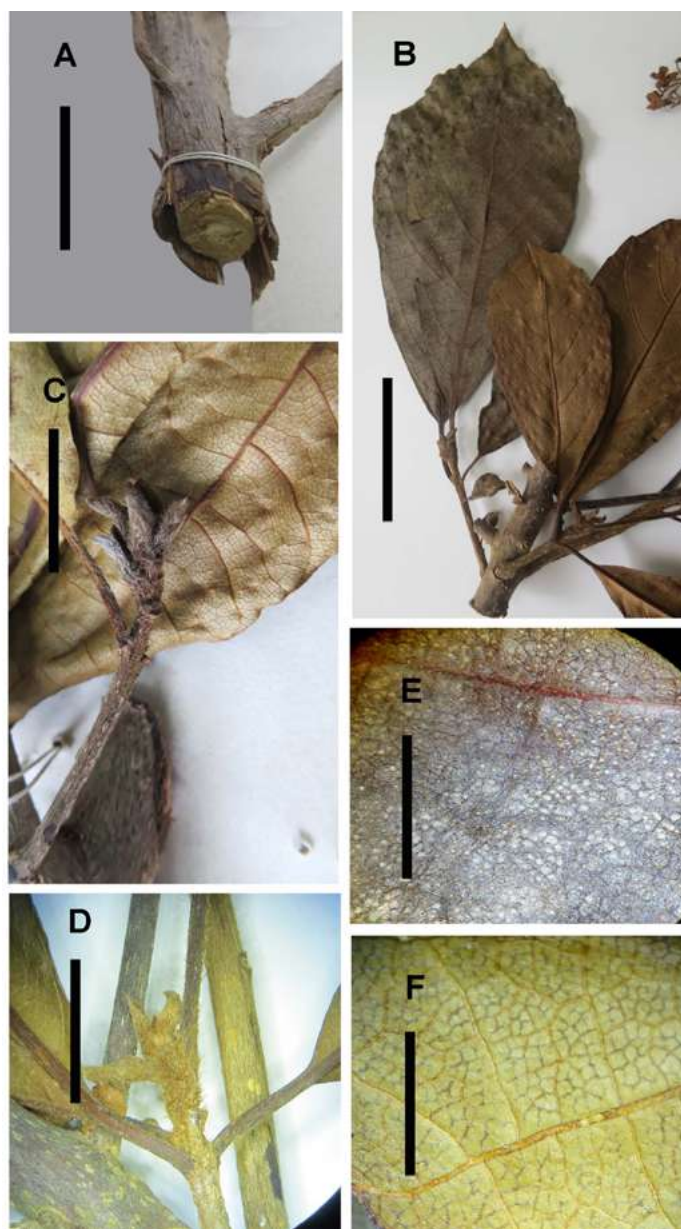


Figura 3. *Cordia nicandroides* Fern. Alonso & Cogollo. Detalles de ramas, hojas e indumento. **A.** Sección de una rama terminal mostrando la amplia médula blanquecina, suberosa. **B.** Disposición de las hojas al final de la rama y el indumento de la yema terminal. **C.** y **D.** Detalle de las hojas jóvenes e indumento en la yema terminal. **E.** Detalle del indumento estrigoso disperso y las plústulas cistolíticas sésiles en la superficie adaxial de las hojas maduras. **F.** Detalle de la venación reticulada poligonal de de 3°, 4° y 5° órdenes en el envés de la hoja. **A, C, E-F** a partir de *López-Palacios 4006* (COL); **B, D** a partir de *Cogollo 14260* (MA). Fotografías de J.L. Fernández-Alonso. Escalas: **A** = 2 cm, **B** = 4 cm, **C, D** = 10 mm, **E, F** = 5 mm

impresa en haz y muy resaltada en envés, con 7-10(-11) pares de venas laterales dispuestas de modo erecto-patente con respecto a la vena media; venación de tercer y cuarto órdenes perpendicular y reticulada, respectivamente, resaltada en el envés; venación de quinto orden uniformemente poligonal reticulada, con celdas de ca. 1 mm de diámetro, observables en el envés (**Figura 3f**); superficie adaxial glabrescente, con indumento estrigoso disperso en las venas y engrosamientos tuberculados sésiles, blanquecinos (plústulas cistolíticas),

muy abundantes; superficie abaxial glabrescente y dispersamente pilosa en los nervios principales, con tricomas largos, simples, acostados, combinados con pelos cortos, más densamente dispuestos en las hojas jóvenes (**Figura 3**). **Inflorescencias** paniculadas tirsoideas, terminales en las ramas jóvenes, de hasta 20-25 x 18-22 cm; muy amplias, con varios grados de ramificación dicotómica, siendo las de último orden unilaterales de tipo cincino; con brácteas foliáceas de 3-7 x 1-1,5 cm en las ramificaciones inferiores; ejes pardo-verdosos, con indumento de pelos simples, sinuosos, septados. **Flores** no aromáticas, ebracteoladas (**Figuras 2c, 4**); **pedicelos** ca. 1,2 mm, a menudo con un pequeño botón en la mitad del pedicelo, con indumento simple, sinuoso; **cáliz** gamosépalo, acrescente en la fructificación, acampanado, de 2,5-3,5 mm de longitud y 2,2 mm de anchura, con 4-5 lóbulos distales estrechamente triangulares de 0,5-1 mm de longitud; densamente pubérulo tomentoso, marrón oscuro y de aspecto aterciopelado en la cara externa; **corola** blanco níveo, pentámera, gamopétala, ampliamente acampanada-asalvillada, con el tubo de 3-4 mm de longitud y 2-3 mm de diámetro, de aspecto glabro en la cara interna; pétalos patentes en la antesis, diámetro total (corola) de 14-15 mm; lóbulos de la corola oblongos,

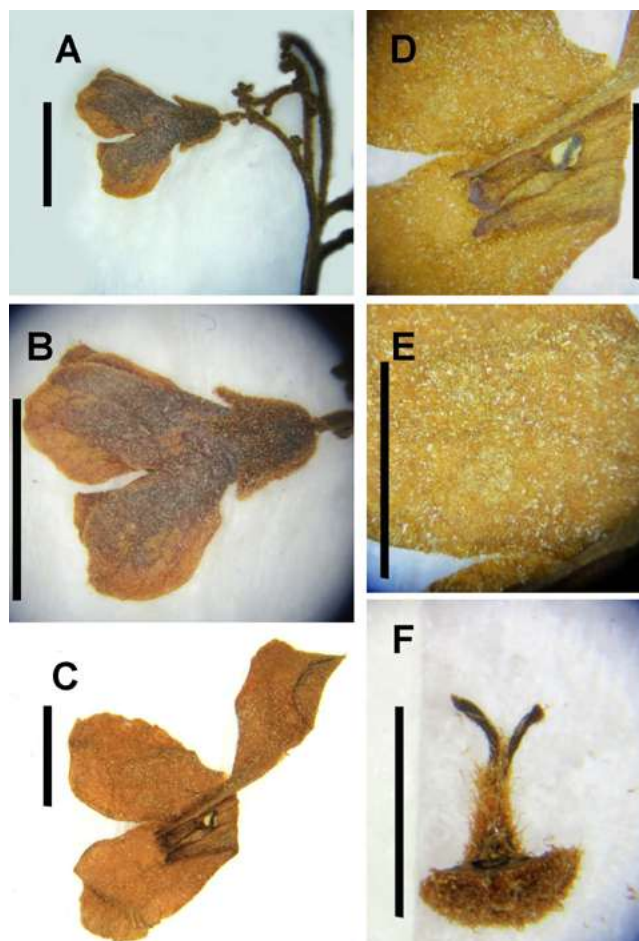


Figura 4. *Cordia nicandroides* Fern. Alonso & Cogollo. Detalles de la flor. **A.** Ramificaciones terminales de la inflorescencia, tipo cincino, con una flor en vista lateral. **B.** Flor (vista lateral) mostrando el indumento aterciopelado del pedicelo y cáliz y los lóbulos de la corola. **C.** y **D.** Detalle del tubo rasgado, los lóbulos de la corola y un estambre con filamento corto y antera blanquecina ovoide-elíptica alojada en el tubo. **E.** Detalle del indumento corto de la cara externa de los pétalos visto con el estereomicroscopio. **F.** Receptáculo de la flor con el ovario mostrando el denso indumento hirto y los dos estilos. A partir de *Cogollo 14260* (JAUM, MA). Fotografías de J.L. Fernández-Alonso. Escala: **A, B** = 10 mm, **C, D** = 5 mm, **E, F** = 2 mm

de 4-6 x 2,5-3,5 mm, con vena media y venas secundarias visibles; indumento de pelos dispersos en la cara externa y con glándulas sésiles, de aspecto cristalino, dispersas, en la cara interna; **estambres** 5, incluidos en el tubo de la corola, filamento de 1,5 mm longitud, glabro y antera basifija, cuadrado-elipsoidal, de ca. 1 mm longitud, con un pequeño apéndice terminal de 0,2 mm; **ovario** estrechamente cónico, de ca. 1 mm de longitud, densamente hispido, marrón, con pelos rígidos, estilo 2-partido con las ramas lineares, iguales o desiguales, estigmas levemente engrosados. **Infrutescencias** con sólo 3-6(-8) frutos desarrollados (**Figura 4f**). **Pedúnculo** fructífero arqueado hacia abajo, de 15-20

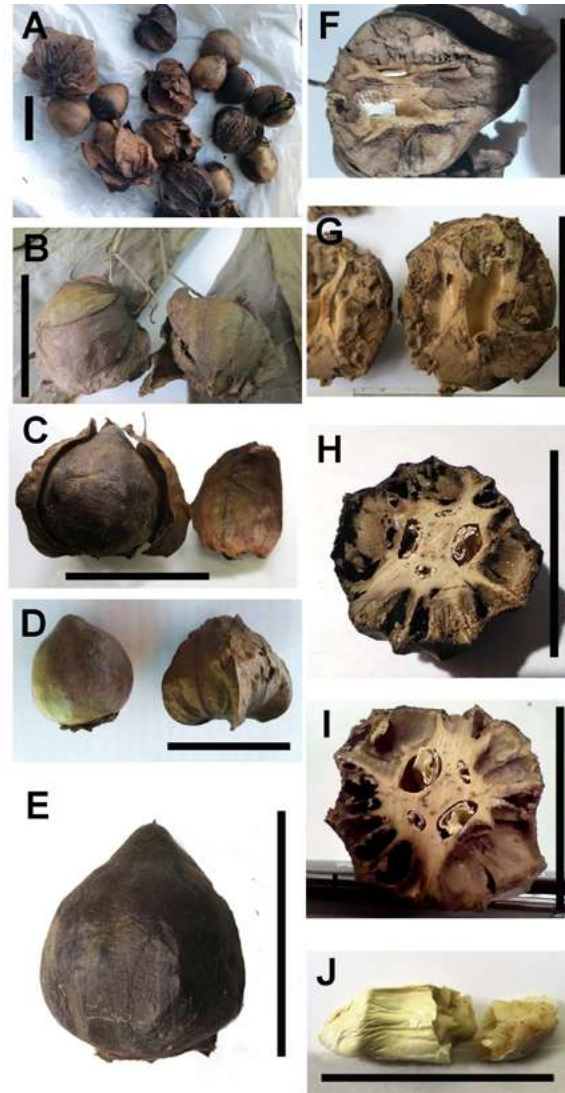


Figura 5. *Cordia nicanroides* Fern. Alonso & Cogollo. Detalles del fruto y la semilla. **A.** y **B.** Frutos maduros con cáliz acrescente en la rama y frutos recogidos en la base del árbol. **C.** y **D.** Fruto maduro mostrando la disposición ceñida del cáliz acrescente y el fruto propiamente dicho (vista lateral). **E.** Fruto maduro mostrando su prolongación aguda apical. **F.** y **G.** Corte sagital del fruto maduro, mostrando el mesocarpo suberoso, las paredes y la cara interna nítida de los endocarpos parciales englobados en el monopireno. **H.** e **I.** Corte transversal del monopireno leñoso (en seco) mostrando las crestas radiales, las paredes de los cuatro endocarpos, dos semillas desarrolladas y dos abortadas. **J.** Semilla partida (vista lateral) mostrando la testa nítida y la consistencia del tejido interno cotiledonar. **A-C** y **E-H** a partir de *Cogollo 14260*, Córdoba (JAUM, MA); **D.** a partir de *Cogollo 14256*, de Bolívar. Fotografías de Á. Cogollo y J.L. Fernández-Alonso. Escala en **A** hasta **I** = 5 cm, **J** = 2 cm.

x 1,5 mm y frutos péndulos con la boca del cáliz fructífero (acrescente) orientada hacia abajo; **cáliz fructífero** verde blanquecino en fresco y marrón brillante en seco, acrescente, inflado, apergaminado, de 43-45 x 53-56 mm, con cinco costillas y pliegues longitudinales muy marcados; venación reticulada, resaltada en la cara externa, estrechamente adosado al fruto y encerrándolo totalmente (**Figura 5**). **Fruto** verde pálido en fresco y marrón-grisáceo en la madurez, drupáceo y de aspecto nuciforme, seco e indehisciente al final; fruto maduro anchamente ovoide, adelgazado en la parte distal (**Figura 5A**), de 40-42 x 38-40 mm, con epicarpio nitido, glabro, liso, levemente reticulado en seco; frutos inmaduros agudos distalmente (en seco, herbario) y con proyecciones y pliegues irregulares al no haberse consolidado el mesocarpio; **mesocarpio** de aspecto suberoso y grosor irregular, de 3-7 mm de grosor, en función de las diferentes proyecciones radiales del endocarpio; **endocarpio** mono-pireno (hueso), 4-seminado, grueso, radialmente con proyecciones irregulares; generalmente con 2-3 semillas desarrolladas y con 1-2 escasamente desarrolladas o abortadas. **Semilla**

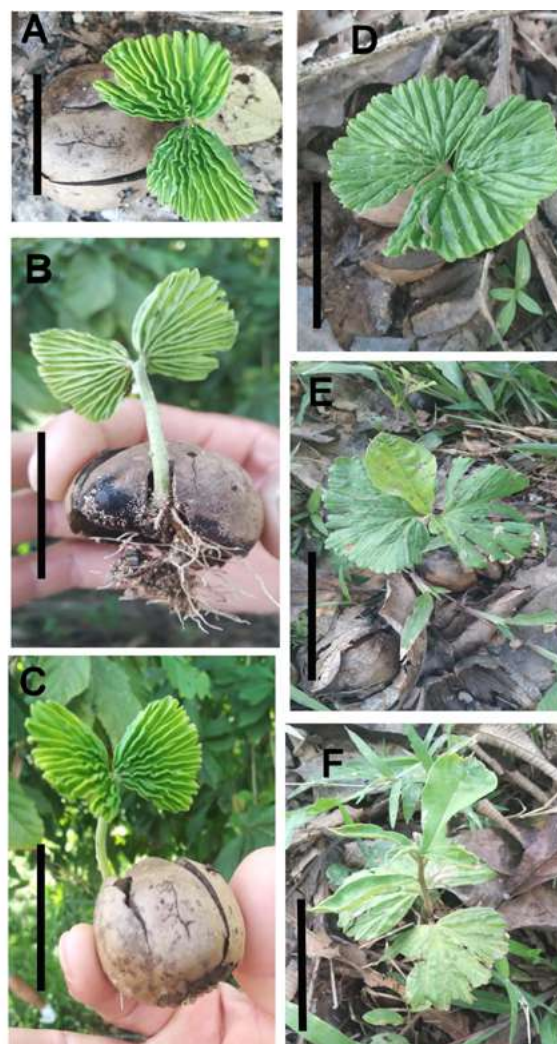


Figura 6. *Cordia nicandroides* Fern. Alonso & Cogollo. Detalles del fruto germinado y plántula fotografiada en la base del árbol. **A., B. y C.** Fruto rasgado con una de las semillas germinada mostrando el hipocótilo de la plántula y los grandes cotiledones flabelados con pliegues de tipo fanerocotilar. **E.** Plántula con los cotiledones semicirculares, con los pliegues completamente extendidos (vista desde arriba). **E. y F.** Plántula con los cotiledones rasgados y las primeras hojas con inserción esparcida. Fotografías de Á. Cogollo, de octubre 2022 en Tierralta, Córdoba. Escala: 5 cm

amarillenta o blanco-amarillenta, estrechamente oblongoide-fusiforme de 16-18 x 5-7 mm, con testa marfil, brillante y tejido interior blanco-amarillento (**Figura 5j**). **Plántulas** que conservan adherida la envoltura del fruto viejo, rasgado, con el tallo (hipocótilo) de 3-4 x 0,3 cm y amplios cotiledones de 3,0 x 3,5 cm, de aspecto flabelado y con grandes pliegues radialmente dispuestos; al final aplanados, ampliándose los limbos cotiledonares semicirculares de hasta 3,5 x 5-6 cm; primeras dos hojas dispuestas de modo esparcido, oblanceoladas (**Figura 6**).

Etimología. El nombre de la especie hace referencia al parecido del cáliz acrescente, que acompaña el fruto en forma de farolillo, con el de la solanácea americana anual de la tribu Nicandreae Wettst., *Nicandra physaloides* (L.) Gaertn., hoy ampliamente extendida y naturalizada a otras regiones templadas y cálidas del mundo (**Seculin et al., 2022**).

Distribución, hábitat y estatus de conservación. Las cinco localidades conocidas hasta ahora se ubican en los departamentos de Córdoba y Bolívar, entre los 20 y 80 m, en el norte de Colombia (**Figura 7**). Las formaciones vegetales corresponden primordialmente a bosque húmedo tropical (Bht) o a transición de Bht a bosque seco tropical (Bst). Hasta donde se sabe, su hábitat sería azonal, y crece generalmente cerca de caños, ciénagas o zonas anegadas temporalmente. Algunas de las especies encontradas como asociadas a *C. nicandroides* en las localidades de recolección son (agrupadas por familias): *Annona glabra* L., *Bactris barronis* L.H. Bailey, *Bactris guineensis* (L.) H.E. Moore, *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés, *Bixa urucurana* Willd., *Crateva tapia* L., *Steriphoma paradoxum* (Jacq.) Endl., *Hura crepitans* L.; *Microdesmia arborea* (Seem.) Sothers & Prance, *Parinari parvifolia* Sandw., *Pseudoalbizia niopiodes* (Spruce ex Benth.) E.J.M. Koenen & Duno, *Andira inermis* (Sw.) Kunth, *Erythrina fusca* Lour., *Geoffroea spinosa* Jacq., *Pithecelobium hymenaeifolium* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Benth., *Platypodium elegans* Vogel, *Prioria copaifera* Griseb., *Samanea saman* (Jacq.) Merr., *Senna reticulata* (Willd.) H.S. Irwin & Barneby, *Zygia longifolia* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Britton & Rose, *Lecythis minor* Jacq., *Ficus dendroclida* Kunth, *Ficus insipida* Willd., *Muntingia calabura* L., *Coccoloba* sp. y *Homalolepis cedron* (Planch.) Devecchi & Pirani.

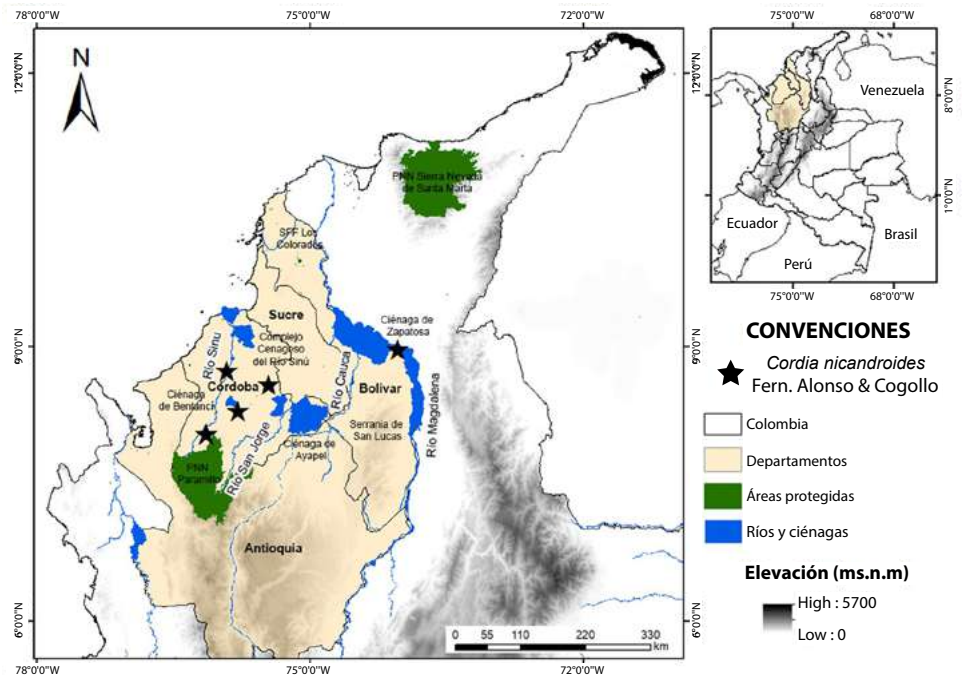


Figura 7. Distribución de *Cordia nicandroides* Fern. Alonso & Cogollo en Colombia, con indicación de las áreas protegidas en el sector norte de Colombia

A diferencia de *C. nicandroides*, las dos especies de Brasil consideradas cercanas, y con las cuales se la compara, están ambas asociadas principalmente al Bst y al bioma de Caatinga y la estrategia de dispersión de sus frutos y semillas es de tipo anemócoro (Carvalho, 2008; Santos *et al.*, 2011; Guimaraes *et al.*, 2013). Por otra parte, la nueva especie suele estar asociada a ambientes próximos a cursos de agua y esto, unido a la presencia de frutos de mayor tamaño, provistos de una envoltura calicina proporcionalmente menor, ceñida al fruto, y de un mesocarpio suberoso, permite evocar el síndrome de hidrocoria como mecanismo más probable de dispersión. En *Cordia* se ha referido la dispersión hidrócora sólo excepcionalmente, como en el caso de la especie paleotropical *Cordia subcordata* Lam. (Johnston, 1951; Batianoff *et al.*, 2009; Gottschling *et al.*, 2016). Son bien conocidos los casos de otros géneros neotropicales con dispersión mayoritariamente anemócora, en los que se presenta alguna especie con dispersión hidrócora, como ocurre con la bignoniácea de manglar *Bignonia phellosperma* (Hemsl.) L.G. Lohmann en Colombia, que se diferencia de sus congéneres, que si presentan dispersión anemócora (Gentry, 2009).

Con la información de campo conocida hasta ahora (A. Cogollo), se trataría de un taxón poco común en la región donde habita. Según los criterios de la UICN (2012) actualizados en el 2022 (IUCN, 2022), el área de extensión de presencia (EOO) delimitada por las cinco localidades conocidas es de 7.555 Km², y sólo una de estas localidades está ubicada cerca de un área sujeta a protección (PNN Paramillo). Los registros están agrupados en cinco subpoblaciones y se calcula que el área de ocupación (AAO) es de apenas 20 Km². Con base en la información ahora analizada, la categoría propuesta es de EN B2a (en peligro), a la espera de un estudio más detallado.

Fenología. Se sabe que la floración se presenta en los meses de septiembre y octubre y la fructificación entre septiembre y enero. Es frecuente la presencia simultánea de inflorescencias llamativas y frutos desarrollados en los árboles de una misma localidad e, incluso, en las diferentes ramas de un mismo árbol, quizás debido al lento proceso de maduración de estos frutos grandes con endocarpo leñoso.

Usos y nombres comunes. En la región de Tierralta, departamento de Córdoba, se le conoce con el nombre local de “topo”, quizás por el parecido de su fruto con los de una especie del género *Physalis* L. (Solanaceae), a la que denominan en la región “topo toropo”; en la zona del departamento de Bolívar donde se registró, lo denominan “tocó”, vocablo similar a “toco” (sin tilde), que es uno de los nombres que recibe en la región caribe el árbol *Crateva tapia* (Capparaceae).

Sus troncos se utilizan en construcciones rurales como madera rolliza para horcones y para estacones utilizados en cercas y corrales. Hace algunos años, se observó sembrado esporádicamente como arbolito ornamental en calles del municipio de Montelíbano (Córdoba). Es de resaltar su indudable potencial como planta ornamental por su abundante y llamativa floración y fructificación, por lo que se recomienda su propagación en aras de su conservación y manejo sostenible.

Discusión

Aunque en principio se consideró su posible asignación al género *Ehretia* por la presencia de solo dos estilos, el análisis del fruto de tipo monopireno y los cotiledones claramente plegados observados en las plántulas fanerocotilares estudiadas, no llevaban directamente al género *Cordia*, en que se incluyen algunos grupos atípicos de especies con solo dos estilos desarrollados. Por otra parte, si bien la semejanza en el porte, el aspecto de las inflorescencias y de los cálices fructíferos acrescentes de la nueva especie y la especie brasileña *C. oncocalyx* es notable (Figura 8), las diferencias en la fructificación de las dos especies (Tabla 1) también los son. *C. nicandroides* presenta una relación inversa en el tamaño de los cálices fructíferos y de los frutos con *C. oncocalyx*. Si bien esta última especie, con sus grandes cálices (45-80 mm de largo), más largos que anchos y frutos relativamente pequeños (17-21 mm de largo), se comporta como especie anemócora,



Figura 8. *Cordia oncocalyx* Allemao, de Brasil, Ceará, ago 1898, Pao-branco Gardner 1779 [Herb. Hookerianum 1867], (K000583364)

la aquí descrita presenta frutos de mayor tamaño (40-42 mm de largo) y estrechamente rodeados por el cáliz (de 43-45 mm de largo, más ancho que largo), y se ajusta bien al síndrome de hidrocoria en cuanto a la dispersión de sus frutos, en concordancia con el hábitat donde crece, siempre cerca a cursos de agua. Por otra parte, el fruto maduro de *C. oncocalyx* es anchamente elipsoide, de apenas 20 mm de longitud, en tanto que el de *C. nicandroides* es anchamente ovoide y de 40 mm de longitud.

Especímenes adicionales examinados (paratipos). COLOMBIA. **Bolívar.** Municipio de Hatillo de Loba, corregimiento Juana Sánchez, camino hacia La Ribona, ca. 300 m del colegio de bachillerato. Alt. 25 m; 8°58'19.9" N; 74°01'29.9" O; 21 febrero, 2024, (fr), árbol de 12-14 m, fruto inmaduro verde, envuelto en el cáliz acrescente y persistente de color verde, al secarse, todas sus partes pasan a color café, n. v.: tocó, *Álvaro Cogollo Pacheco, Giovanni Acevedo, Jesús D. Jiménez & Sergio Luis Osorio 14256* (JAUM, JBGP, HUC). **Córdoba.** Municipio de Tierralta, vereda Guarumal abajo, vía a El Loro, margen izquierda de la quebrada El Loro; ca. 300 m de la apartada a El Loro, vía Tierralta – Urrá, alt. 75 m; 8° 02'59.7" N; 76° 07' 49.5" O.; 27 octubre, 2022, fl., fr., n. v.: topó, *Álvaro*

Tabla 1. Algunas diferencias en la morfología y la distribución entre las especies de *Cordia* del grupo “*Auxemma*”

Carácter	Especie		
	<i>C. glazioviana</i>	<i>C. oncocalyx</i>	<i>C. nicandroides</i>
Cáliz fructífero (long.)	20-35 mm	45-80 mm	43-45 mm
Cáliz fructífero (ancho)	20-35 mm	45-75 mm	53-56 mm
Fruto forma	Cónico rostrado	Anchamente elipsoide	Anchamente ovoide, agudo distalmente
Fruto longitud	11-20 mm	17-21 mm	40-42 mm
Fruto anchura	8-12 mm	16-19 mm	38-40 mm
Fruto indumento	Densamente pubescente	Glabro	Glabro
Semilla longitud	ca. 10 mm	10-12 mm	16-18 mm
Habitat	BS-Caatinga	BS-Caatinga	BH-(transBS)
Distribución	Brasil, Paraguay	Brasil (E)	Colombia (N)
Dispersion (síndrome)	Anemocoria	Anemocoria	Hidrocoria

Cogollo Pacheco, José A. Cogollo L., Juan Molina & Leivis Muñoz 14228; municipio de Montería, vereda Arroyón, hacienda El Dominó, alt. 40 m, 8°17'56,00" N; 74°47'02,9" =, 23 sep, 2022 (fl. fr.), árbol 8 m, flor corola blanca, cáliz fructífero verde, creciendo en potrero al lado de un caño; *A. Cogollo Pacheco & Pablo Pérez 14260* (JAUM, MA 962104-1, fl; 962104-2,3, fr); ibídem, municipio de Sahagún, San Antonio, alt. 79 m, 8.588147 N; - 75.446839 E; 5 julio 2023, fr., árbol de 12 m, corteza con guasca desprendible, corteza interna se oxida a color naranja, frutos con cáliz persistentes verdes, creciendo en bosque de galería, poco frecuente; *Jhon Colorado & Marco Ávila 1156* (HUA 235831, 235832); ibídem, municipio de Montería, alt. 80 m, 29 sep, 1975, árbol 12-15 m, fl[no vistas], fr. *S. López-Palacios 3873* (COL 171144); ibídem, árbol 10-12 m, 4 nov, 1976, fr, *S. López-Palacios 4006* (COL 161859).

Clave para las especies de *Cordia* con cálices soldados y acrescentes [basada en parte en Gottschling & Miller, 2006]

- 1--Cáliz acrescente carnosos que acompaña el fruto maduro...*Cordia* sect. *Cordia*
- 1'--Cáliz papiráceo e inflado que acompaña al fruto maduro2
- 2--Cáliz fructífero más o menos cilíndrico en sección transversal y generalmente ensanchado en su zona media..... (*Cordia* grupo “*Saccellium*” [tres especies de Perú, Bolivia, Brasil y Argentina]).
- 2'-- Cáliz fructífero claramente anguloso costillado en sección transversal, más ensanchado y cordado hacia su base (*Cordia* grupo “*Auxemma*”, [tres especies de Brasil, Paraguay y Colombia])3
- 3--Cáliz fructífero de 20-35 mm de longitud; fruto cónico-elipsoide, rostrado y densamente pubescente [Brasil, Paraguay]..... *Cordia glazioviana* (Taub.) Gottschling & J.S. Mill.
- 3'--Cáliz fructífero de 42-80 mm de longitud; fruto anchamente ovoide o elipsoide, no rostrado, glabro4
- 4--Cáliz fructífero de 45-80 mm de longitud, muy amplio y no ceñido estrechamente al fruto; fruto anchamente elipsoide de 17-21 mm de largo, semilla madura de 10-12 mm de longitud [Este de Brasil]..... *Cordia oncocalyx* Allemao
- 4--Cáliz fructífero de 43-45 mm de longitud, ceñido al fruto; fruto anchamente ovoide y adelgazado distalmente, de 40-42 mm de longitud, semilla madura de 16-18 mm de longitud [norte de Colombia].....*Cordia nicandroides* Fern.Alonso & Cogollo.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración recibida en COL (Carlos Parra y Laura Clavijo), HUA (Felipe Cardona y Heriberto David) y JAUM (Álvaro Idárraga y Norberto López). Las imágenes de los especímenes en los herbarios BM, COL, K, MA, MO, NY y en algunos de Brasil se obtuvieron de la plataforma JSTOR Plants, lo que facilitó el trabajo de revisión adelantado. En las recolecciones en campo hechas por uno de los autores (Á. Cogollo) en el municipio de Tierralta se contó con la colaboración del personal del Parque Nacional Natural Paramillo (Antonio Martínez Negrete & Pedro Hernández), y en el municipio de Montería, con la de la familia Gutiérrez Gaviria, propietaria de la hacienda El Dominó y su promotor de proyectos de conservación Luis Gonzalo Moscoso Higueta. El mapa de distribución fue elaborado amablemente por Daniela Bedoya Giraldo. Agradecemos, asimismo, la gran ayuda recibida de Diego Zapata (UDBC) en el ajuste de los datos de categorización de la especie y de Saúl Hoyos (HUA) en la edición final de algunas de las figuras incluidas en este trabajo. J.L. Fernández ha contado con el apoyo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) para los trabajos de revisión de plantas tropicales con cargo al proyecto CGL2010-19747. Agradecemos, asimismo, a los revisores y al editor de este trabajo por sus valiosas observaciones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores

JLF y ACP estudiaron el material (campo y herbario). JLF elaboró un primer borrador y ambos completaron el manuscrito, la discusión, el mapa de distribución y el resto de las figuras.

Referencias

- Angiosperm Phylogeny Group [APG] IV.** (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181, 1-20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- Baillon, H.E.** (1891). *Histoire des plantes, vol. 10*. Librairie Hachette. <http://dx.doi.org/10.5962/bhl.title.40796>
- Batianoff, G.N., Naylor, G.C., Dillewaard, H.A., Nelder, V.J.** (2009). Plant strategies, dispersal and origins of flora at the northern Coral Sea Islands Territory, Australia. *Cunninghamia*, 11(1), 97-106.
- Carvalho, P.E.R.** (2008). Pau branco-do-sertao (*Auxemma oncocalyx*). *Circular técnica*, 153, 1-6.
- Dauby, G., Stevart, T., Droissart, V., Cosiaux, A., Deblauwe, V., Simo-Droissart, M., Sosef, M. S.M., Lowry II, P.P., Schatz, G.E., Gereau, R.E., Couvreur, T.L.P.** (2017). ConR: An R package to assist large-scale multispecies preliminary conservation assessments using distribution data. *Ecology and Evolution*, 7, 11292-11303.
- 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>
- Fernández-Alonso, J.L. & Melo, J.I.M.** (2021). A new species of *Varronia* P. Browne (Cordiaceae) from central Colombia. *Phytotaxa*, 507(1), 121-130. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.507.1.8>
- Gentry, A.H.** (2009). Bignoniaceae. *Flora de Colombia* N° 25. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Gottschling, M., Miller, J.S., Weigend, M., Hilger, H.H.** (2005). Congruence of a phylogeny of Cordiaceae (Boraginales) inferred from ITS1 sequence data with morphology, ecology, and biogeography. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 92, 425-437.
- Gottschling, M. & Miller, J.S.** (2006). Clarification of the taxonomic position of *Auxemma*, *Patagonula*, and *Sacculium* (Cordiaceae, Boraginales). *Systematic Botany*, 31(2), 361-367.
- Gottschling, M., Weigend, M., Hilger, H.H.** (2016). Ehretiaceae. Pp. 165-178, en: J.W. Kaldereit & V. Bittrich (Eds.). *Flowering Plants. Eudicots, The Families and Genera of Vascular Plants* 14. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28534-4_12

- Guimaraes, I.P., Coelho, M.F.B., Azevedo, R.A.B.** (2013). Pau branco (*Cordia oncocalix* Allemão) - Boraginaceae: Árvore endêmica da Caatinga. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Pombal*, 8, 31-39 (Edição Especial).
- Harris, J.G. & Harris, M.W.** (2001). *Plant identification terminology: An illustrated glossary*. 2nd ed. Spring Lake Publishing.
- Heigl, H.M.L., Kretschmann, J., Hilger, H.H., Gottschling, M.** (2020). Flower and fruit anatomy of *Cordia nodosa* Lam. and *Varronia bonplandii* Desv. (Cordiaceae, Boraginales) with phylogenetic implications. *Organisms Diversity & Evolution*, 20, 9-2.
- 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>
- Johnston, L.M.** (1951). Studies in the Boraginaceae, XX. Representatives of three subfamilies in Eastern Asia. *Journal of the Arnold Arboretum*, 32, 62-78.
- JSTOR.** (2024). *Global Plants database JSTOR*. <https://plants.jstor.org/>
- Luebert, F., Cecchi, L., Frohlich, M.W., Gottschling, M., Guillems, C.M., Hasenstab-Lehman, K.E., Hilger, H.H., Miller, J.S., Mittelbach, M., Nazaire, M., Nepi, M., Nocentini, D., Ober, D., Olmstead, R.G., Selvi, F., Simpson, M.G., Sutorý, K., Valdés, B., Walden, G.K., Weigend, M.** (2016). Familial classification of the Boraginales. *Taxon*, 65, 502-522.
- Melo, J.I.M., Paulino, R.C., Oliveira, R.C., Vieira, D.D.** (2018). Flora of Rio Grande do Norte, Brazil: Boraginales. *Phytotaxa*, 357(4), 235-260. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.357.4.1>
- Miller, J.S.** (2016). Cordiaceae, pp.1109-1113. En: Bernal, R., Gradstein, S.R. & Celis, M. (Eds.). *Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia, Vol. 1*. Universidad Nacional de Colombia.
- Miller, J.S.** (2023). New Boraginales from tropical America 11: New species of *Cordia* from Colombia, Ecuador and Peru. *Novon*, 31(1), 118-122. <https://doi.org/10.3417/2023799>
- Miller, J.S. & Gottschling, M.** (2007). Generic classification in Cordiaceae (Boraginales): Resurrection of the genus *Varronia* P. Br. *Taxon*, 56, 163-169.
- Miller, J.S., Robinson, C., Victoria, P.** (2023). A new species of *Cordia* (Boraginales: Cordiaceae) from Colombia and Venezuela. *Novon*, 31(1), 123-125. <https://doi.org/10.3417/2023805>
- R Core Team** (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. <https://www.R-project.org/>
- Santos, J.C., Leal, I.R., Almeida-Cortez, J.S., Fernandes, G.W., Tabarelli, M.** (2011). Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. *Tropical Conservation Science*, 4(3), 276-286. www.tropicalconservationscience.org
- Seculin Glur, J.L., Gutiérrez, F., Leiva, S., Barboza, G.E., Carrizo, G.** (2022). Evolutionary insights into the Andean genus *Nicandra* (Solanoideae, Solanaceae). *Phytotaxa*, 572(2): 182-192. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.572.2.5>
- Stearn, W.T.** (1998). *Botanical Latin*, Cuarta edición. Davis & Charles Publishers.
- Thiers, B.** (2020). *Index Herbariorum*: A global directory of public herbaria and associated staff. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/>
- UICN.** (2012). *Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN*, versión 3.1, ed. 2. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: UICN.

Artículo original

Los peces desérticos del bajo río Pisco, costa del Pacífico, Ica, Perú

Desert fishes of the Lower Pisco River, Pacific coast, Ica – Perú

● José Apaza*, ● Katia Aylas, ● Lenin D. Chumbe-Nolasco, ● Silvia Valenzuela,
● Giulia Raunelli, ● Lucero Stephany Amézquita-Bejar, ● Yuli Dulcina Espinoza-Rojas,
● Hernán Ortega

Departamento de Ictiología, Museo de Historia Natural, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Resumen

Este estudio aborda la fauna íctica registrada en el bajo río Pisco en Ica, costa central de Perú. Se examinaron los especímenes depositados en la Colección Ictiológica MUSM, que incluye evaluaciones de campo realizadas en el cauce principal del río Pisco, humedal Pisco Playa, laguna Morón y poza Lagunillas, así como estudios hallados en la literatura disponible. Se documentaron 13 especies de peces pertenecientes a ocho familias y ocho órdenes, siendo la familia Cichlidae la de mayor diversidad, con cuatro especies. *Lebiasina bimaculata* representa un nuevo registro de la ictiofauna del río Pisco. La riqueza de especies varió según el ambiente evaluado, siendo el humedal Pisco Playa y el río Pisco los ambientes con mayor diversidad, al albergar nueve y ocho especies, respectivamente. En cuanto a la composición de las especies, *Andinoacara stalsbergi*, *Poecilia reticulata* y *Oreochromis* sp. se encontraron en los cuatro ambientes acuáticos evaluados y se las podría considerar como especies núcleo, mientras que *Basilichthys semotilus* se registró únicamente en el río Pisco. En términos de tolerancia a la salinidad, se identificaron una especie primaria, 11 secundarias y una periférica. Según su origen, las especies exóticas representan el 53,8 % de la riqueza total, destacándose *Oreochromis* sp. y *P. reticulata* por estar presentes en todos los ambientes evaluados. Nuestro estudio contribuye en la actualización del conocimiento de la riqueza íctica en el bajo río Pisco y proporciona una herramienta valiosa para la gestión, divulgación y conservación de la biota acuática en esta región.

Palabras clave: costa peruana; cuenca costera; humedales costeros; ictiofauna continental; peces suramericanos.

Abstract

Our study focuses on the fish fauna in the lower Pisco River in Ica, central coast of Perú. We examined the specimens deposited in the MUSM Ichthyological Collection including field evaluations in the main channel of the Pisco River, the Pisco Playa Wetland, the Morón Lagoon, and the Poza Lagunillas, as well as records from the available literature. We recorded 13 fish species belonging to eight families and eight orders, with Cichlidae as the most diverse family, with four species. *Lebiasina bimaculata* represents a new record for the ichthyofauna of the Pisco River. Species richness varied according to the evaluated environment, with Pisco Playa Wetland and the Pisco River as the environments with the highest diversity, hosting nine and eight species, respectively. Regarding the species composition, *Andinoacara stalsbergi*, *Poecilia reticulata*, and *Oreochromis* sp. were present in the four aquatic environments evaluated and could be considered core species, while *Basilichthys semotilus* was recorded exclusively in the Pisco River. In terms of salinity tolerance, one primary, 11 secondary, and one peripheral species were identified. As for their origin, exotic species represented 53.8% of the total richness, with *Oreochromis* sp. and *P. reticulata* present in all the environments evaluated. Our study updates the knowledge of the ichthyologic richness in the lower Pisco River. It provides a valuable tool for managing, divulging, and conserving the aquatic biota from this region.

Keywords: Coastal basin; coastal wetlands; continental fish fauna; Peruvian coast; South American fish.

Citación: Apaza J, Aylas K, Chumbe-Nolasco LD, *et al.* Los peces desérticos del bajo río Pisco, costa del Pacífico, Ica, Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):368-382, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.2563>

Editor: Arturo Acero

***Correspondencia:**

José Apaza; joseapme88@gmail.com

Recibido: 13 de febrero de 2024

Aceptado: 11 de junio de 2024

Publicado en línea: 19 de junio de 2024



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

Introducción

Suramérica alberga un tercio de la diversidad de peces de aguas continentales descritas en el mundo (Reis *et al.*, 2016), las cuales, sin embargo, no se distribuyen homogéneamente en el espacio ni entre grupos taxonómicos (Casseiro *et al.*, 2023). Las cuencas de la periferia continental suramericana presentan una menor riqueza de especies, pero poseen un mayor grado de endemismo (Albert & Reis, 2011). La costa peruana, que se extiende por más de 2000 km y se caracteriza principalmente por su entorno desértico, alberga un total de 62 cuencas hidrográficas (Autoridad Nacional del Agua - ANA, 2013) y presenta una gran variedad de ecosistemas de aguas continentales entre estuarios, humedales y ríos, que son de corto recorrido, torrentosos y, en su mayoría, estacionales, y desembocan en el océano Pacífico (Ortega & Hidalgo, 2008; Ministerio del Ambiente - MINAM, 2019). La biodiversidad de estos ecosistemas se ve amenazada por el incremento de la contaminación y el deterioro de los hábitats debido a las actividades humanas en esta región habitada por el 50 % del total de la población peruana (Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI, 2021).

En los últimos años las investigaciones han enriquecido el conocimiento sobre la ictiofauna de las cuencas costeras peruanas, especialmente de la costa norte del Perú (Meza-Vargas *et al.*, 2022; Siccha-Ramírez *et al.*, 2023; Valenzuela *et al.*, 2023). La información sobre la mayoría de las cuencas sigue siendo limitada, principalmente de aquellas ubicadas en el centro y el sur. En esta área se destaca la cuenca del río Pisco, uno de los principales del departamento de Ica, que abastece a la población a lo largo de su recorrido. La parte baja de esta cuenca se utiliza para el consumo humano y la ganadería y la agricultura de exportación, las cuales constituyen la principal actividad socioeconómica de este valle (Instituto Nacional de Recursos Naturales - Inrena, 2003). Además, los humedales aledaños tienen importancia turística y son áreas de refugio y alimentación de una gran variedad de especies (ANA, 2018). Como la gran mayoría de ambientes acuáticos en la costa peruana, infortunadamente el área se ve amenazada por las descargas de residuos sólidos, aguas servidas urbanas y la presencia de especies exóticas (Ortega *et al.*, 2012; ANA, 2016).

Se han publicado registros de la flora y la fauna de esta cuenca (ANA, 2018), pero la información sobre la fauna íctica actual aún es muy limitada. Fowler (1945) registró a la especie *Mugil cephalus* en el cauce principal del río Pisco. Posteriormente, ProNaturaleza (2010) realizó el registro de especies en el humedal Pisco Playa (bajo río Pisco), usando sus nombres comunes: “tilapia” (*Coptodon rendalli* y *Oreochromis* sp.), “guppy” (*Poecilia* sp.) y “monengue” (*Dormitator latifrons*). Faustino-Fuster *et al.* (2017) evaluaron la relación entre longitud y peso de peces en los ríos Pisco y San Juan (provincia de Pisco), entre ellos, *Trichomycterus punctulatus*, *Basilichthys archaeus*, *Andinoacara stalsbergi* y *Poecilia reticulata*. En los humedales costeros de Pisco ANA (2018) registró las especies *M. cephalus*, *Cyprinus carpio*, *A. stalsbergi*, *Poecilia* sp. y *Oreochromis* sp. Actualmente no existe una lista taxonómica de la fauna íctica de esta importante cuenca costera.

En este contexto, el conocimiento de la composición de especies de peces es fundamental para la elaboración de planes de gestión y conservación de la biodiversidad del área evaluada. Nuestro objetivo en este estudio fue determinar la composición de la fauna íctica del bajo río Pisco y proporcionar información sobre su presencia en los ambientes acuáticos evaluados y su estado de conservación frente a las principales amenazas.

Área de estudio

El río Pisco se origina en la laguna Pultoc altoandina (departamento de Huancavelica) y desemboca en la vertiente del océano Pacífico cubriendo una área de 4.122,4 km² de nororiente a suroccidente y altitudinalmente desde el nivel del mar hasta los 5.218 m (Gamarra *et al.*, 2017). La parte baja del río pertenece a la zona costera, en la provincia de Pisco (departamento de Ica) entre 0 y 250 m s.n.m. (ANA, 2018). Presenta un clima subtropical árido con escasas precipitaciones anuales (0,60 a 1,40 mm). El río Pisco

posee un cauce de características meándricas que recorre los distritos de Bernales, Santa Isabel, Independencia, Costa Rica, La Villa, Tambo, Hualla Grande, Pisco y La Alborada, representando el 21,5% del área total de la cuenca (INRENA, 2003)

En este estudio se recogió la información de evaluaciones hidrobiológicas en 34 puntos de muestreo localizados en el bajo río Pisco, que incluye el cauce principal del río y los humedales aledaños (Figura 1). Los humedales de la parte baja son considerados oasis por los valiosos recursos hídricos en esta región desértica. El humedal Pisco Playa se extiende a lo largo del margen costero de la ciudad de Pisco, con una superficie de 8,45 km² al norte y 15,29 km² al sur (Instituto Geofísico del Perú - IGP, 2022). La laguna Morón comprende 0,18 km² y se encuentra a una altitud de 294 m s.n.m; debido a su contenido salino, se la clasifica como una laguna salobre, con pH neutro; la laguna se originó a partir de la filtración de los cultivos agrícolas y de los acuíferos (ANA, 2018). No hay información detallada sobre la poza Lagunillas, pero forma parte de una red de humedales de pequeña extensión en el margen izquierdo del río Pisco que se originaron por filtraciones de agua subterránea (IGP, 2022).

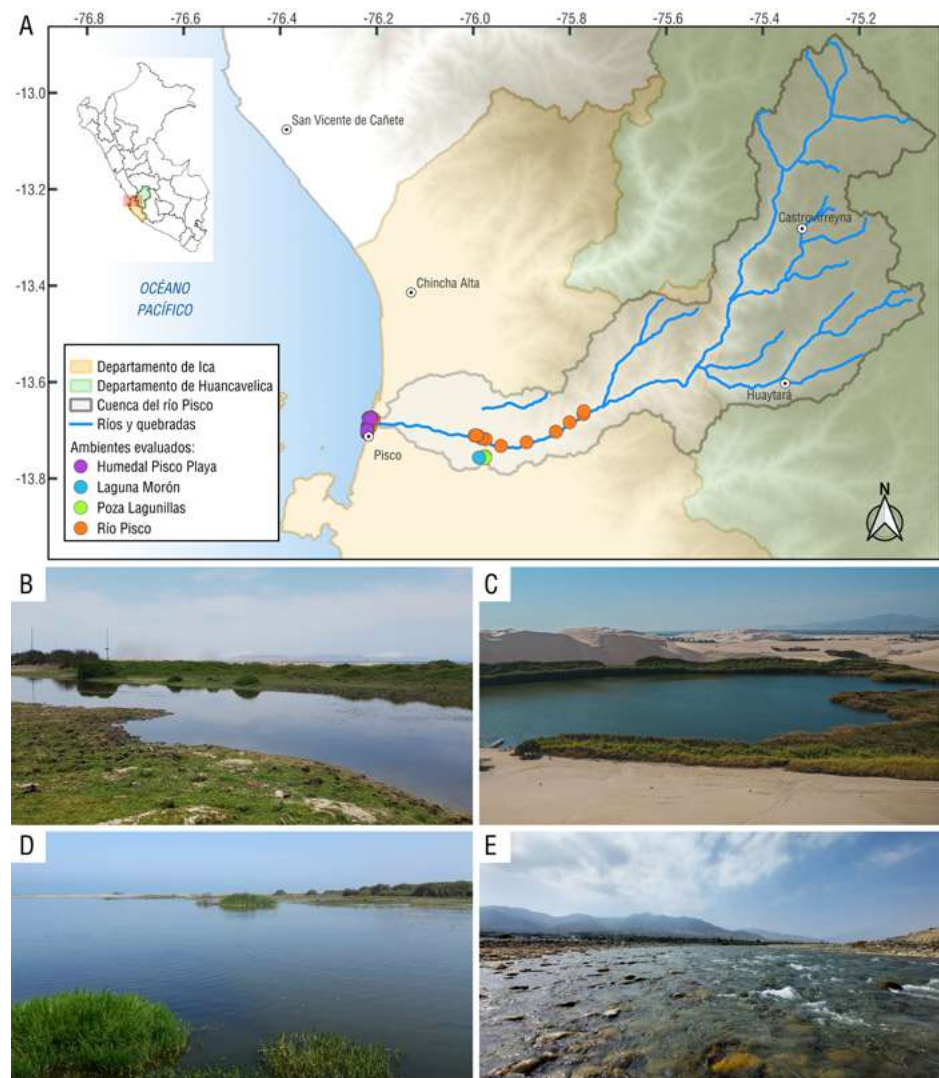


Figura 1. (A) Mapa de la zona baja del río Pisco. Los puntos indican las localidades de las muestras evaluadas. Ambientes evaluados en la zona baja del río Pisco: (B) humedal Pisco Playa; (C) laguna Morón; (D) desembocadura del río Pisco; y (E) río Pisco a la altura de Humay

Metodología

Para la actualización taxonómica se examinaron especímenes depositados en la Colección Ictiológica del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de San Marcos (MUSM) en Lima, recolectados durante expediciones realizadas entre 1952 y 2020 (**Tabla S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2563/4025>). La identidad taxonómica de los especímenes fue corroborada en la literatura especializada (**Eigenmann**, 1922; **Eigenmann**, 1928; **Trewavas**, 1983; **Arredo**, 1989; **Schmitter-Soto**, 2006; **Nelson**, 2016), en descripciones originales (**Musilova et al.**, 2009), así como información de la literatura gris (**ProNaturaleza**, 2010; **ANA**, 2018). La lista taxonómica se clasificó en orden filogenético según **Betancur-R et al.** (2017) y la nomenclatura taxonómica se validó siguiendo a **Fricke et al.** (2023).

Se analizó la riqueza de especies agrupadas en familias y mediante un diagrama de Venn-Euler se visualizó la distribución de dicha riqueza en cada ambiente. Se comparó la composición taxonómica de cada ambiente considerando el porcentaje del total de especies en un gráfico de barras. El recambio de especies en los ambientes se analizó mediante la disimilitud de Jaccard representada en un dendrograma. Las especies se clasificaron de acuerdo con su tolerancia a la salinidad en primarias (dulceacuícolas que son intolerantes al agua salada), secundarias (dulceacuícolas que presentan tolerancia a la salinidad) y periféricas (peces marinos que pueden estar asociados a ambientes estuarinos y ríos) (**Myers**, 1949; **Jiménez-Prado et al.**, 2015). En cuanto a su origen biogeográfico, se clasificaron en endémicas, nativas y exóticas. La categoría de amenaza de las especies se evaluó según la **IUCN** (2022). Por último, se analizó el registro acumulado de especies a lo largo del tiempo según la fecha de muestreo de los lotes del MUSM o su aparición en la bibliografía. Los datos se analizaron y representaron gráficamente utilizando el programa **R** (**R Core Team**, 2023) y los paquetes **ggplot2**, **ggvenn** y **microeco**.

Resultados

Desde el primer registro de *M. cephalus* hecho por Fowler en 1945, pasaron más de 40 años hasta el segundo registro de otra especie en la ictiofauna del río Pisco. A partir de 2001, los nuevos registros han aumentado, incluyendo los de especies exóticas (**Figura 2A**) (**Suplementario 2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2563/4025>).

Riqueza por familias

Se registraron 13 especies de peces distribuidas en diez géneros, ocho familias y ocho órdenes (**Tabla 1**, **figura 2B** y **figura 3**). La familia con mayor riqueza fue Cichlidae, con cuatro especies, seguida por Poeciliidae, con tres especies. Las familias con menor riqueza específica fueron Atherinopsidae, Lebiasinidae, Trichomycteridae, Mugilidae, Cyprinidae y Eleotridae, representadas cada una por una especie (**Figura 2B**).

Composición de especies según el ambiente evaluado

El humedal Pisco Playa, río Pisco y la laguna Morón destacaron como los ambientes con mayor riqueza, con nueve, ocho y siete especies, respectivamente (**Tabla 2**, **figura 2C** y **D**). Por otro lado, en la poza Lagunillas se encontraron tres especies (**Figura 2C** y **D**). Además, *B. semotilus* solo se registró en el río Pisco (**Tabla 2**, **figura 2C**). Es relevante señalar que *A. stalsbergi*, *P. reticulata* y *Oreochromis* sp. se encontraron en todas las estaciones (**Tabla 2**, **figura 2C** y **D**). Asimismo, es notable la presencia de *M. cephalus* en tres de los cuatro ambientes evaluados. Las especies restantes estaban presentes en uno o dos ambientes.

Recambio de especies

Los ambientes se dividieron en dos grupos según la disimilitud en el índice de Jaccard (**Figura 2E**). El río Pisco y el humedal Pisco Playa integraron el primer grupo al compartir seis especies, en tanto que en el otro grupo la laguna Morón y la poza Lagunillas compartieron tres especies.

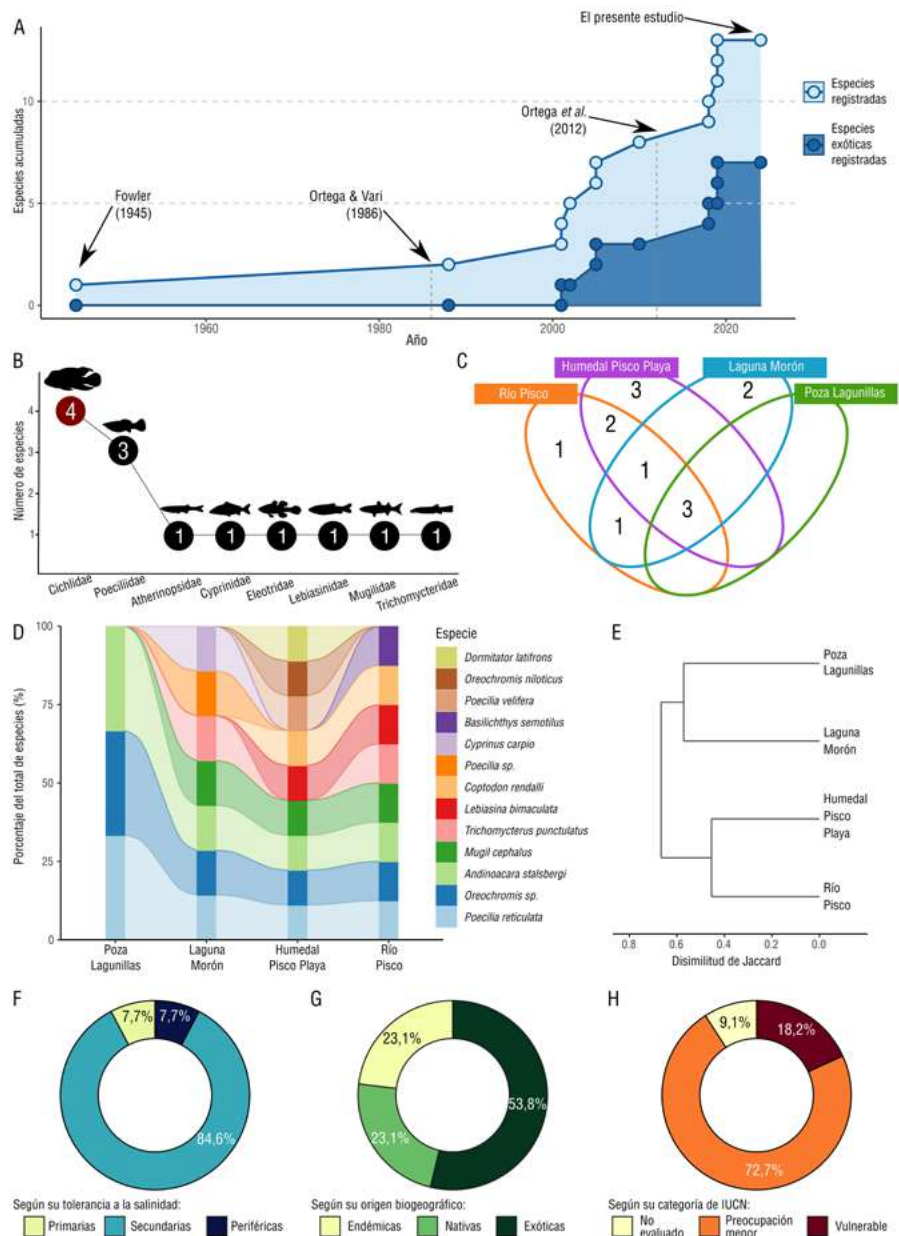


Figura 2. (A) Riqueza de especies por familia en la zona baja del río Pisco. (B) Diagrama de Venn-Euler que representa el número de especies por ambiente evaluado. (C) Gráfica de barras a nivel de especie para cada ambiente evaluado. (D) Dendrograma basado en la disimilitud de Jaccard de los ambientes evaluados. (E) Distribución de las especies según su tolerancia a la salinidad. (F) Distribución de las especies según su origen biogeográfico. (G) Distribución de las especies según su estado de conservación. (H) Acumulación de especies registradas en la cuenca del bajo río Pisco

Especies según su tolerancia a la salinidad

Por su tolerancia a la salinidad, se observó que *B. semotilus* fue la única catalogada como dulceacuícola intolerante al agua salada (primaria), con el 7,7 % de la riqueza total. Por otro lado, 11 especies (84,6 % de la riqueza) exhibieron cierta tolerancia a la salinidad (secundarias) y únicamente *M. cephalus* (7,7 % de la riqueza) se catalogó como periférica, es decir, conformada por peces marinos con capacidad para habitar en entornos estuarinos y de agua dulce (Tabla 1 y figura 2F).

Tabla 1. Lista de especies de peces registradas para la zona baja del río Pisco. LC: preocupación menor; NT: casi amenazado, VU: vulnerable, NE: no evaluado.

Taxón	Nombre común	Tolerancia	IUCN	Referencia/ Voucher
Cypriniformes (1)				
Cyprinidae (1)				
<i>Cyprinus carpio</i> Linnaeus 1758	Carpa común	S	VU	ANA, 2018
Characiformes (1)				
Lebiasinidae (1)				
<i>Lebiasina bimaculata</i> Valenciennes 1847*	Charcocha, guavina	S	LC	MUSM 70422, MUSM 70434
Siluriformes (1)				
Trichomycteridae (1)				
<i>Trichomycterus punctulatus</i> Valenciennes 1846	Life	S	NE	MUSM 1995, MUSM 18792, MUSM 18793, MUSM 18794, MUSM 20297, MUSM 20302, MUSM 24960, MUSM 24977, MUSM 24979, MUSM 35214
Cichliformes (4)				
Cichlidae (4)				
<i>Andinoacara stalsbergi</i> Musilová, Schindler & Staeck 2009	Mojarra	S	LC	MUSM 18796, MUSM 20298; MUSM 24969, MUSM 24972, MUSM 24976, MUSM 24980, MUSM 24981, MUSM 25535, MUSM 70426, MUSM 70438.
<i>Coptodon rendalli</i> (Boulenger 1897)	Tilapia de pecho rojo	S	LC	MUSM 70439, MUSM 70443, MUSM 71298
<i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus 1758)	Tilapia del Nilo	S	LC	MUSM 70428, 70440, MUSM 70444
<i>Oreochromis</i> sp.	Tilapia	S		MUSM 24967, MUSM 70430, MUSM 70436, MUSM 70441
Atheriniformes (1)				
Atherinopsidae (1)				
<i>Basilichthys semotilus</i> (Cope 1874)	Pejerrey de río	P	LC	MUSM 22416
Cyprinodontiformes (3)				
Poeciliidae (3)				
<i>Poecilia reticulata</i> Peters 1859	Gupi	S	LC	MUSM 18795, MUSM 24968, MUSM 24973 MUSM 24974, MUSM 25537, MUSM 25538, MUSM 25541, MUSM 25542, MUSM 70424, MUSM 70431
<i>Poecilia velifera</i> (Regan 1914)	Velifera	S	VU	MUSM 70427, MUSM 70429, MUSM 70432
<i>Poecilia</i> sp.	Gupi	S		ANA, 2018
Mugiliformes (1)				
Mugilidae (1)				
<i>Mugil cephalus</i> Linnaeus 1758	Liza	Pe	LC	MUSM 1174, MUSM 1956, MUSM 70421, MUSM 70425 MUSM 70433, MUSM 70435, MUSM 70437, MUSM 70442
Perciformes (1)				
Eleotridae (1)				
<i>Dormitator latifrons</i> (Richardson 1844)	Monengue, chalaco	S	LC	ProNaturaleza, 2010

P: primario, Pe: periférico, S: secundario. (*) = Nuevo registro

Especies según su origen biogeográfico

Se registraron tres especies endémicas, tres nativas y siete exóticas (Tabla 1, figura 2G). Las especies exóticas pertenecen a los géneros *Cyprinus*, *Coptodon*, *Oreochromis* y *Poecilia* y representaron el 53,8 % de la riqueza total. Además, es relevante destacar que *L. bimaculata* constituye un nuevo registro para la ictiofauna del río Pisco.

Estado de conservación

Diez especies (90,9 % de la riqueza reportada) se categorizaron según los criterios de la IUCN (Tabla 1, figura 2H); de ellas, cinco eran especies exóticas, tres nativas (*L. bimaculata*, *D. latifrons* y *M. cephalus*) y dos endémicas (*A. stalsbergi* y *B. semotilus*), estas últimas catalogadas como de preocupación menor (LC) (Tabla 1, tabla 2).

Discusión

En 1945, Fowler publicó el catálogo sistemático “Peces del Perú”, documentando 724 especies de peces en ambientes marinos, costeros, andinos y amazónicos. Nuestra área de estudio se encuentra en el ambiente costero del bajo río Pisco, donde hemos identificado 13 especies. Sin embargo, Fowler solo documentó *M. cephalus* en el río Pisco.

Es importante tener en cuenta que, en esos años, los especímenes más estudiados eran los procedentes de ambientes marinos. Por ejemplo, en 1907 y 1908 Coker clasificó 500 variedades de peces marinos en el litoral peruano. Fue solo en años posteriores cuando se dio mayor énfasis al estudio de peces continentales, con el registro de 736 especies de peces nativos y exóticos en Perú (Ortega & Vari, 1986), una lista que siguió actualizándose en los años siguientes.

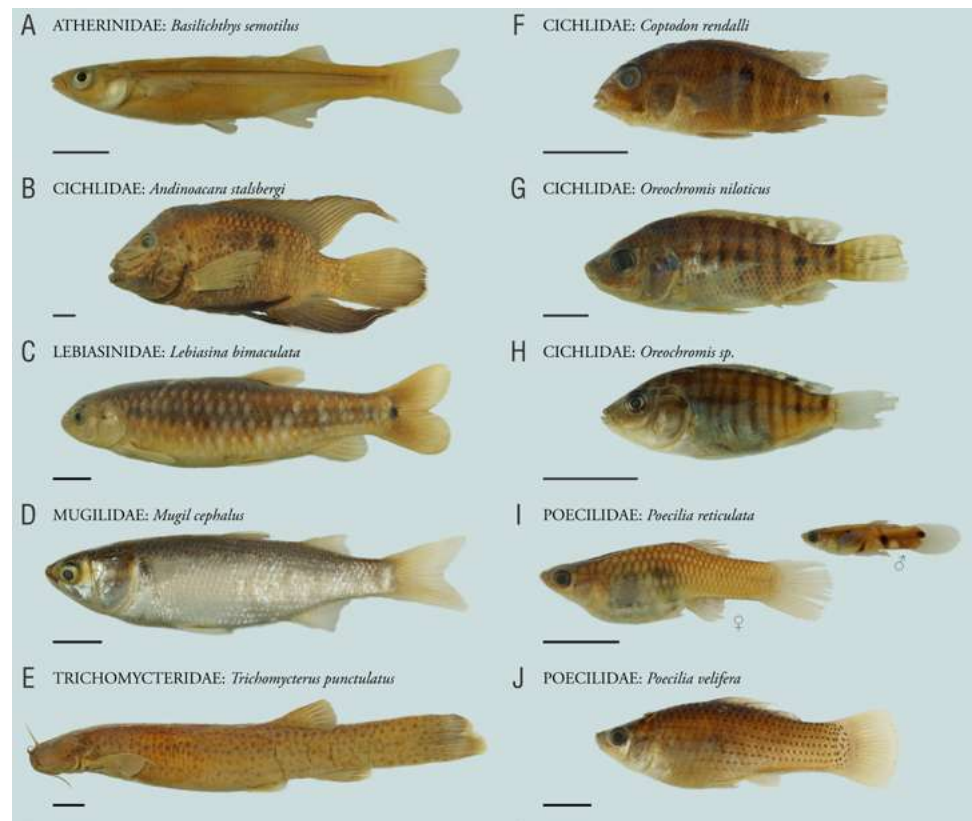


Figura 3. Especies registradas en la zona baja del río Pisco. (1) Especies endémicas: A, B y E. (2) Especies nativas: C y D. (3) Especies exóticas: F-J. Escala = 1 cm

Tabla 2. Ictiofauna según su origen y el ambiente muestreado en la zona baja del río Pisco

Nº	Origen/Especie	Río Pisco	Humedal Pisco Playa	Laguna Morón	Poza Lagunillas
Endémica					
1	<i>Andinoacara stalsbergi</i>	X	X	X	X
2	<i>Basilichthys semotilus</i>	X			
3	<i>Trichomycterus punctulatus</i>	X		X	
Nativa					
4	<i>Dormitator latifrons</i>		X		
5	<i>Lebiasina bimaculata</i>	X	X		
6	<i>Mugil cephalus</i>	X	X	X	
Exótica					
7	<i>Coptodon rendalli</i>	X	X		
8	<i>Cyprinus carpio</i>			X	
9	<i>Oreochromis niloticus</i>		X		
10	<i>Oreochromis</i> sp.	X	X	X	X
11	<i>Poecilia reticulata</i>	X	X	X	X
12	<i>Poecilia velifera</i>		X		
13	<i>Poecilia</i> sp.			X	

Aunque la introducción de especies exóticas en Perú comenzó en 1921 con *P. reticulata* (Cossios, 2010), en la Colección Científica MUSM la muestra más antigua de una especie exótica registrada en el río Pisco es *Oreochromis* sp., depositada recién en 2005. En cuanto a las especies nativas, la recolección de ejemplares distintos al documentado por Fowler no ocurrió sino hasta 1988.

En el bajo río Pisco, ubicado en la costa central del Pacífico peruano, hay dos tipos de ecosistemas: 1) el desierto costero, compuesto principalmente por suelos arenosos y caracterizado por su aridez y la presencia de extensas áreas desprovistas de vegetación, y 2) el humedal costero, que abarca superficies de agua permanentes o no, de origen natural o artificial, que albergan comunidades biológicas distintivas (MINAM, 2019) y que se clasifican en manglares, lagunas, estuarios, albuferas, deltas, oasis y pantanos (ANA, 2018). La diversidad de la ictiofauna en las cuencas costeras exhibe una limitada riqueza de peces en aguas continentales, influenciada también por las invasiones de especies marinas (Winemiller *et al.*, 2008).

El principal resultado del estudio fue la actualización de la riqueza íctica en el bajo río Pisco, con el registro de 13 especies, de las cuales solo *Oreochromis* sp. se identificó a nivel de género. Las especies del género *Oreochromis* tienden a la hibridación (Genner & Turner, 2012; Ford *et al.*, 2019), lo que produce especímenes con características morfológicas intermedias difíciles de identificar correctamente.

Como una nueva incorporación de especie no exótica en esta parte de la cuenca se registró *L. bimaculata*. Esta especie presenta una distribución que, según Fowler (1945) y Jiménez *et al.* (2015), abarca desde la costa occidental del Perú hasta Ecuador. Además, dentro del territorio peruano Fowler (1945) cita su presencia desde el río Rímac (región Lima, localidad tipo) hasta el río Zarumilla (región Piura); posteriormente, Valenzuela *et al.* (2023) la registraron en el río Tumbes. Así, la distribución previamente conocida de *L. bimaculata* en la costa peruana abarca desde la región de Tumbes (costa norte) hasta la

región de Lima (costa central). Este nuevo registro implicaría la expansión de su rango de presencia hasta la costa sur peruana (río Pisco), lo que no se habría detectado previamente debido a la dificultad de realizar estudios en ríos torrentosos y a los pocos monitoreos en la zona, tal como lo demuestra la información de los lotes de la Colección Ictiológica MUSM revisados en este estudio (**Suplementario 2**, <https://www.raccefy.n.co/index.php/raccefy.n/article/view/2563/4025>), lo que resalta la importancia de incrementar los esfuerzos para estudiar la fauna íctica en otros ríos costeros, en especial los de la región sur. Otra posibilidad es que la presencia de *L. bimaculata* en el río Pisco sea producto de acciones intencionales de los pobladores, pues la especie podría usarse como controladora natural de mosquitos a causa de su dieta insectívora, lo cual tiene antecedentes en el alto Marañón (región Cajamarca), donde la especie pudo haber sido introducida más allá de su rango de distribución natural por pobladores preincas, y logró adaptarse a las condiciones de elevada altitud por su capacidad de sobrevivir en condiciones de estrés, como el bajo nivel de oxígeno en el agua (**Reis et al.**, 2003). Esta segunda hipótesis es menos probable, ya que no hay evidencia del traslado de la especie entre los ríos costeros donde se distribuye naturalmente.

El presente estudio registra una riqueza superior a la reportada por **Fowler** (1945), **Musilová et al.** (2009), **ProNaturaleza** (2010), **Vera et al.** (2013), **Faustino-Fuster et al.** (2017) y **ANA** (2018), que registraron en conjunto ocho especies (*M. cephalus*, *A. stalsbergi*, *T. punctulatus*, *B. semotilus*, *C. carpio*, *D. latifrons*, *Poecilia* sp. y *Oreochromis* sp.), así como a la de los ríos de la costa central peruana, donde **Ortega et al.** (2012) registraron siete especies. Sin embargo, la diversidad registrada en nuestro estudio es menor que la de los ríos costeros del norte peruano, donde se han documentado 27 especies en el río Chira (**Meza-Vargas et al.**, 2022) y 47 en el río Tumbes (**Siccha et al.**, 2023; **Valenzuela et al.**, 2023). La disminución de la riqueza en la franja costera central sería atribuible principalmente a factores geológicos (formación de los Andes y paleohidrografía de Amazonas – Guayas de 20-40 millones de años), según **Albert & Reis** (2011) y, en segundo lugar, a factores ambientales. Elementos como el paisaje regional, las características ecológicas, las precipitaciones y la cubierta forestal también son variables que influyen en la diversidad local (**Reis et al.**, 2016).

Con respecto a la riqueza según el ambiente evaluado, a pesar de que los peces han logrado colonizar prácticamente todos los ecosistemas acuáticos que muestran cierto grado de permanencia (**Helfman et al.**, 2009), actualmente hay poca información sobre qué especies ícticas están presentes en los diversos hábitats de la costa peruana. Este vacío de información dificulta una comprensión completa de la diversidad de la ictiofauna y sus interacciones en los ecosistemas acuáticos de la región. El humedal costero Pisco Playa posee la mayor riqueza (nueve especies), cifra superior a la registrada en el humedal de Puerto Viejo (Lima), que cuenta con siete especies (**García et al.**, 2021), pero inferior a la cantidad reportada por **Castro et al.** (1998) en el Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa (Lima), donde se identificaron 13 especies. En el río Pisco se han registrado ocho especies de peces, y se ha determinado que *B. semotilus* utiliza este hábitat de manera exclusiva, registros previos en otros ríos de la costa como Vitor y Chira (**Fowler**, 1945; **Meza-Vargas et al.**, 2022) y la ausencia bibliográfica que indique la presencia de *B. semotilus* en humedales o lagos, evidencia su especialización a la vida en ambientes lóticos. En la poza Lagunillas se identificaron tres especies, entre ellas, *A. stalsbergi*, siendo esta la única endémica descrita en la región.

En cuanto a la composición de especies en los ambientes evaluados, *A. stalsbergi*, *P. reticulata* y *Oreochromis* sp. se registraron en los cuatro ambientes acuáticos evaluados y se las podría considerar como especies núcleo en la cuenca baja del río Pisco, ya que se caracterizan por estar bien distribuidas en sus respectivos hábitats (alta prevalencia) y por ser abundantes y comunes (**Pandit et al.**, 2009; **Magurran et al.**, 2011).

Con respecto al recambio de la composición de especies, tanto el río Pisco como el humedal Pisco Playa presentaron un porcentaje de disimilitud menor a 45 %. Estos ambientes tienen una mayor variación espacial, lo que les permite albergar una mayor

diversidad; además, su proximidad facilita la presencia de especies compartidas. El humedal Pisco Playa es un sistema complejo que por su cercanía al ambiente marino puede albergar especies con características ecológicas afines, en tanto que el río Pisco tiene una heterogeneidad de hábitats (orillas amplias y vegetación ribereña) y, por ende, un mayor número de especies. En el caso de la poza Lagunillas y la laguna Morón, que se agruparon con un porcentaje de disimilitud menor al 60 %, sus ambientes están separados y no hay conectividad entre ellos casi en ningún periodo del año; esta condición de sistemas cerrados limita el ingreso y egreso de peces y por ello es menor su posibilidad de compartir especies que, además, toleren las condiciones limnológicas de dichos ambientes.

En cuanto a la tolerancia a la salinidad, en el bajo río Pisco *B. semotilus*, con hábitos dulceacuícolas exclusivos, fue la única especie primaria que se encontró. Por otra parte, se registraron 11 especies secundarias (84,6 % de la riqueza total) pertenecientes a las familias Cyprinidae, Poeciliidae, Cichlidae, Lebiasinidae, Trichomycteridae y Eleotridae. A pesar de que **Meza-Vargas et al.** (2022) y **Valenzuela et al.** (2023) clasifican a *L. bimaculata* y *A. stalsbergi* como especies primarias, en este estudio las catalogamos como secundarias porque fueron registradas en el humedal Pisco Playa, el cual ha sido clasificado como salobre (ANA, 2018). Por su parte *T. punctulatus* se registró en la laguna Morón, también clasificada como salobre por la ANA (2018). Estas tres especies también se han reportado en el refugio de vida silvestre Los Pantanos de Villa (**Castro et al.**, 1998), descrito, asimismo, como un entorno salobre (**León et al.**, 1995). En consecuencia, se puede afirmar que estas tres especies son tolerantes a ambientes con salinidad variable. En cuanto a los aspectos ecológicos que podrían favorecer la adaptación a estos ambientes, se destaca que *A. stalsbergi* muestra una notable adaptación a aguas alcalinas y duras, ricas en minerales disueltos, e incluso tolera agua salobre (**Lüling**, 1973). Por su parte *L. bimaculata* puede encontrarse en aguas estancadas, remansos, quebradas, humedales y pozas, tolerando altos niveles de contaminación, con poco oxígeno e, incluso, puede salir de los esteros a tierra firme (**Jiménez-Prado et al.**, 2015). La familia Trichomycteridae se ha reportado en una gran diversidad de hábitats y ha demostrado tener un gran potencial para colonizar arroyos de altitud (4,000 m. s.n.m), islas de alta mar, aguas freáticas (subterráneas) y aguas termales cálidas o frías (**Van der Sleen & Albert**, 2018). Otra especie secundaria registrada fue *D. latifrons*, que puede habitar aguas salobres y corrientes turbias cercanas al mar (**Miller**, 1966). Presenta resistencia fisiológica a bajos niveles de oxígeno, así como a las variaciones de salinidad y temperatura (**Ancieta & Landa**, 1977). Además, *D. latifrons* es una especie anfídroma, lo que implica una migración de individuos en estadio larval hacia el mar poco después de la eclosión de los huevos para alimentarse y crecer allí en su estadio temprano y migrar después como pequeñas poslarvas o juveniles desde el mar hacia aguas dulces (**Blanco-Libreros et al.**, 2015). La única especie periférica identificada fue *M. cephalus*, la cual exhibe una marcada preferencia eurihalina (**Ibáñez et al.**, 2012; **Siccha-Ramírez et al.**, 2023). La mayor parte de su ciclo de vida transcurre en aguas de salinidad variable, adentrándose brevemente en aguas marinas durante su migración desde la costa hacia el mar para llevar a cabo el desove (**Ibáñez et al.**, 2012).

En este estudio se identificaron tres especies endémicas del Perú: *A. stalsbergi*, cuya localidad tipo es el río Pisco, región de Ica (**Musilová et al.**, 2009); *T. punctulatus*, con localidad tipo en el río Rímac, región de Lima (**Fowler**, 1945), y *B. semotilus*, que procede de los Andes peruanos a 4.000 m s.n.m., pero cuya localidad tipo se desconoce (**Cope**, 1874).

Si bien no existen compilaciones extensas sobre la fauna exótica presente en el Perú, se sabe que la mayor parte de los peces introducidos en Suramérica que han sido estudiados pertenece a las familias de los salmónidos y los cíclidos (**Seebens et al.**, 2023). El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) define las especies exóticas invasoras como aquellas que se introducen y propagan fuera de su área natural y representan una amenaza para la diversidad biológica (MINAM, 2022). Aunque las invasiones biológicas son naturales, su impacto se agrava en hábitats vulnerables, causando graves daños a la biodiversidad local, como es el caso en Perú. Actualmente, no se conoce con certeza el número de especies no nativas establecidas en el país. Muchas de ellas ingresaron intencionalmente y se emplean

como forraje, alimentación u ornamentación (MINAM, 2022). La naturalización de especies acuáticas exóticas en Perú se ha llevado a cabo por diversos motivos, entre ellos, el acuarismo (*P. velifera*), el control biológico de insectos (*P. reticulata*), y la acuicultura (*O. niloticus*, *C. rendalli*) (Cossíos, 2010). Por otra parte, en la década de los setenta, *C. carpio* fue importada desde Israel y Panamá con el propósito de llevar a cabo investigaciones en la Universidad Nacional Agraria La Molina (Ortega et al., 2007). Aquí registramos la presencia de siete especies exóticas, de las cuales dos (*P. reticulata* y *Oreochromis* sp.) se encontraron en todos los hábitats evaluados. Ortega et al. (2007) señalan que en los cuerpos de agua lénticos la adaptación de especies invasoras puede haberse visto favorecida por la presencia de fondos arenosos y aguas tranquilas, la ausencia de depredadores y la baja diversidad de especies nativas. Incluso en ciertos contextos han reducido, posiblemente de manera significativa, la distribución y abundancia de las especies nativas, principalmente mediante el desplazamiento y la depredación (Ortega et al., 2007).

Hoy las zonas costeras continentales son foco de invasiones de especies exóticas que afectan la riqueza y la abundancia de las especies nativas, aumentan el riesgo de extinción, alteran la composición genética, modifican el comportamiento y perturban las redes tróficas (Pyšek et al., 2020). Además, muchas de estas especies alteran el funcionamiento de los ecosistemas y sus servicios. Estos impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas se han intensificado y se espera que aumenten en el futuro (Pyšek et al., 2020). Ortega et al. (2007) señalaron que, entre todos los peces introducidos, las tilapias, con tres especies registradas en la cuenca baja del río Pisco, deberían ser motivo de especial preocupación. Además, *O. niloticus* y *P. reticulata*, mencionadas en el presente estudio, están catalogadas entre las 10 especies de peces exóticos invasores más ampliamente distribuidas en el mundo (Seebens et al., 2023). Ortega et al. (2007) señalaron que, como consecuencia del impacto causado por la ictiofauna invasora en la región costera de la cuenca río Grande (Ica), los peces nativos fueron completamente desplazados por *O. niloticus* y *P. reticulata*, especialmente cerca de la desembocadura del río durante la estación seca. Actualmente el MINAM (2022) ha presentado el “Plan de Acción Nacional sobre las Especies Exóticas Invasoras en el Perú 2022-2026” para el territorio nacional. El plan busca fortalecer el control de estas especies mediante la recopilación de información técnica que facilite su manejo, controle su dispersión y mitigue los impactos negativos en la diversidad biológica. Asimismo, se busca informar a la población peruana sobre los riesgos e impactos en la biodiversidad, la salud y la economía asociados a estas especies. En este sentido, Pyšek et al. (2020) señalan que, aunque en muchos países hay estrategias para reducir futuras invasiones, su implementación suele ser ineficaz. A diferencia de otras dimensiones del cambio global, las invasiones biológicas pueden gestionarse y mitigarse con previsión y recursos adecuados. Sin embargo, a menudo reciben una atención insuficiente.

La reciente actualización de la IUCN (2023) destaca la difícil situación de los peces de agua dulce a nivel global, señalando que al menos el 17 % de las especies amenazadas de peces de agua dulce se ven afectadas por el cambio climático. La contaminación afecta al 57 % de los peces de agua dulce en peligro de extinción, mientras que el 33 % se ve perjudicado por especies invasoras y enfermedades. En el contexto peruano, la información sobre las categorías de amenazas es insuficiente y aún no se dispone de una Lista Roja oficial para peces continentales. Algunos peces endémicos como *T. punctulatus* y *A. stalsbergi* también se ven afectados por el cambio climático y la introducción de especies exóticas, lo que ha generado competencia por el hábitat y los recursos alimentarios (Ortega et al., 2012).

El impacto humano en lagos, ríos, humedales y aguas subterráneas está reduciendo de manera significativa la biodiversidad (Albert et al., 2021), así como el efecto de los desechos municipales y otros contaminantes industriales vertidos directamente en el río Pisco (MINAM, 2019). Además, el humedal Pisco Playa enfrenta impactos derivados de la urbanización creciente, las actividades agrícolas, la ganadería, la acumulación de residuos sólidos y la contaminación con aguas residuales (Martínez & Mendoza, 2022). La laguna Morón, catalogada como en proceso de extinción por el Inrena (2003), ha

sufrido el impacto derivado de la visita anual de turistas. Asimismo, se observan áreas afectadas por la presencia de residuos sólidos y heces de ganado (ANA, 2018). Se tiene conocimiento de que la poza Lagunillas se ha secado, posiblemente debido a varios de los factores mencionadas.

Por último, nuestro estudio presenta una lista actualizada de las especies de peces del bajo río Pisco, con lo que se amplía el conocimiento sobre la ictiofauna de las cuencas del océano Pacífico en la costa peruana. Esta lista es una herramienta útil para el manejo y conservación de la biota acuática de esta región. A pesar de la poca diversidad registrada, se destaca la presencia de ictiofauna endémica y nativa que se ve amenazada por el creciente aumento de especies exóticas y la preocupante degradación de los ambientes acuáticos. Sería recomendable monitorear la ictiofauna en las cuencas media y alta, todavía no estudiadas, y evaluar periódicamente aspectos ecológicos de las especies mencionadas en este estudio.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2563/4025>

Agradecimientos

Los autores agradecen a los miembros del Departamento de Ictiología del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y al Grupo de Aves del Perú (GAP) por el apoyo en campo para el muestreo en el humedal costero Pisco Playa, así como a Alejandro Omar Loyola Bartra (UFMT) por sus valiosos comentarios y recomendaciones que mejoraron el manuscrito.

Contribución de los autores

JA conceptualizó el estudio, colaboró en la recolección y determinación del material biológico, elaboró el manuscrito inicial y coordinó la elaboración en el formato académico de la versión final del manuscrito; KA elaboró el manuscrito inicial y coordinó la elaboración en el formato académico de la versión final del manuscrito; LDCN colaboró con la visualización de resultados, participó en la discusión y elaboración de la versión final del manuscrito; SV asesoró en aspectos taxonómicos y participó en la discusión y elaboración de la versión final del manuscrito; GR colaboró en la recolección y determinación del material biológico; LSAB colaboró en la recolección y determinación de material biológico; YDER colaboró en la recolección y determinación de material biológico; HO asesoró en aspectos taxonómicos y participó en la discusión y elaboración de la versión final del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses personal ni institucional.

Referencias

- Albert, J. S. & Reis, R. E. (2011). *Historical Biogeography of Neotropical Freshwater Fishes*. University of California Press.
- Albert, J., Destouni, G., Duke-Sylvester, S., Magurran, A., Oberdorff, T., Reis, R., Winemiller, K., Ripple, W. (2021). Scientists' warning to humanity on the freshwater biodiversity crisis. *Ambio*, 50, 85-9. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01318-8>
- Ancieta, D. F. & A. Landa, A. (1977). Reseña taxonómica y biológica de los peces cultivados en el área andina incluyendo la costa del Perú. *FAO Información sobre Pesca*, 2(159), 106-113.
- Arredo, J. & Guzmán-Arroyo, M. (1989). Situación taxonómica actual de la Tribu Tilapini (Pisces: Cichlidae) introducida en México. *Anales del Instituto de Biología*, 56, 555-572.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2013). *Atlas de recursos hídricos del Perú*. Autoridad Nacional del Agua. Autoridad Nacional del Agua. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/217>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). *Priorización de cuencas para la gestión de los recursos hídricos*. Autoridad Nacional del Agua. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/205>

- Autoridad Nacional del Agua (ANA).** (2018). *Inventario de Humedales en el Ámbito de la ALA Pisco: Estudio piloto. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos.* Autoridad Nacional del Agua. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3310>
- Betancur-R, R., Wiley, E. O., Arratia, G., Acero, A., Bailly, N., Miya, M., Lecointre, G., Ortí, G.** (2017). Phylogenetic classification of bony fishes. *BMC Evolutionary Biology*, 17(1), 1-40. <https://doi.org/10.1186/s12862-017-0958-3>
- Blanco-Libreros, J. F., Carvajal, J. D., Escobar-Sierra, C., Jiménez, L. F., Lasso, C. A., Sánchez-Duarte, P.** (2015) 3. La diadromía como convergencia evolutiva en peces, crustáceos, decápodos y gasterópodos en las cuencas pericontinentales de Colombia. En: Lasso CA, Blanco-Libreros JF, Sánchez-Duarte P (Eds.) XII. *Cuencas pericontinentales de Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela: tipología, biodiversidad, servicios ecosistémicos y sostenibilidad de los ríos, quebradas y arroyos costeros* (pp. 95–117). Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Casemiro, F. A. S., Albert, J. S., Antonelli, A., Menegotto, A., Wüest, R. O., Cerezer, F., Coelho, M. T. P., Reis, R. E., Tan, M., Tagliacollo, V., Bailly, D., da Silva, V. F. B., Frota, A., da Graça, W. J., Ré, R., Ramos, T., Oliveira, A. G., Dias, M. S., Colwell, R. K., ... Graham, C. H.** (2023). Landscape dynamics and diversification of the megadiverse South American freshwater fish fauna. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(2), e2211974120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2211974120>
- Castro, E., Huamán, O., Ortega, H.** (1998). Ictiofauna de los pantanos de Villa: composición, abundancia y aspectos ecológicos. En: Cano, A. y K. Young (eds.). *Los pantanos de Villa, biología y conservación* (pp. 74-83). Museo de Historia Natural - UNMSM. Serie de Divulgación.
- Cope, E. D.** (1874). Description of some species of reptiles obtained by Dr. John F. Bransford, Assistant Surgeon United States Navy, while attached to the Nicaraguan surveying expedition in 1873. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 26, 64-72.
- Cossíos, E. D.** (2010). Vertebrados naturalizados en el Perú: historia y estado del conocimiento. *Revista Peruana de Biología*, 17(2), 179-189. <https://doi.org/10.15381/rpb.v17i2.25>
- Eigenmann, C. H.** (1922). The fishes of western South America, Part I. The freshwater fishes of northwestern South America, including Colombia, Panama, and the Pacific slopes of Ecuador and Peru, together with an appendix upon the fishes of the Rio Meta in Colombia. *Memoirs of the Carnegie Museum*, 9(1), 1-347.
- Eigenmann, C. H.** (1928). The freshwater fishes of Chile. *Memoirs National Academy Sciences*, 22(2), 1-63.
- Faustino-Fuster, D., Chuctaya, J., Quispe, R., Espino, J.** (2017). Length-weight relationships of four freshwater fish species from the coastal drainage system in Peru. *Journal of Applied Ichthyology*, 33, 1263-1265. <https://doi.org/10.1111/jai.13458>
- Ford, A. G. P., Bullen, T. R., Pang, L., Genner, M. J., Bills, R., Flouri, T., Ngatunga, B. P., Rüber, L., Schliewen, U. K., Seehausen, O., Shechonge, A., Stiassny, M. L. J., Turner G. F., Day, J. J.** (2019). Molecular phylogeny of *Oreochromis* (Cichlidae: Oreochromini) reveals mitochondrial discordance and multiple colonisation of adverse aquatic environments. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 36, 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2019.04.008>
- Fowler, H.W.** (1945). *Los peces del Perú. Catálogo Sistemático de los peces que habitan en aguas peruanas.* Lima: Perú. Museo de Historia Natural "Javier Prado". UNMSM.
- Fricke, R., Eschmeyer, W. N., Van der Laan, R.** (2023). Eschmeyer's Catalog of Fishes: Genera, Species, references. <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>
- Gamarra, M., Hidalgo, M., López, M., Medina, C.** (2017). Optimización del uso del recurso hídrico del Río Pisco y el desarrollo de la región Ica. Tesis de Magister en Gestión Pública, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Repositorio académico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/622105>
- Genner, M. J. & Turner, G. F.** (2012). Ancient hybridization and phenotypic novelty within lake Malawi's cichlid fish radiation. *Molecular Biology and Evolution*, 29(1), 195-206. <https://doi.org/10.1093/molbev/msr183>
- García, J., Torres, U., Huamani, M.** (2021). Nuevos registros para la ictiofauna de los humedales de Puerto Viejo (Lima, Perú). *Revista Biotempo*, 18(2), 215-226. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v18i2.4349>

- Helfman, G. S., Collette, B. B., Facey, D. E., Bowen B. W.** (2009). Chapter 18. Special habitats and special adaptations. *The Diversity of Fishes Biology, Evolution, and Ecology* (pp. 393-417). Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Ibáñez, A. L., Chang, C. W., Hsu, C. C., Wang, C. H., Iizuka, Y., Tzeng, W. N.** (2012). Diversidad ambiental de las historias migratorias de los mugilidos *Mugil cephalus* y *M. curema* en aguas costeras mexicanas analizadas mediante la proporción de Sr:Ca en los otolitos. *Ciencias Marinas*, 38(1a), 73-87. <https://doi.org/10.7773/cm.v38i1a.1905>
- Instituto Geofísico del Perú (IGP).** (2022). *Humedales costeros de Pisco – Ica*. Instituto Geofísico del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5347>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).** (2021). *Perú: Estado de la Población en el año del Bicentenario, 2021*. Lima: Bicentenario Perú 2021. Instituto Nacional de Estadística e Informática. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1803/libro.pdf
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (Inrena).** (2003). *Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de las cuencas de los ríos San Juan y Pisco: Inventario de fuentes de agua de la cuenca del río Pisco*. Instituto Nacional de Recursos Naturales. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/3867/ANA0002368.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- IUCN.** (2022). The IUCN Red List of Threatened Species (Version 2022-2). International Union for Conservation of Nature. <https://www.iucnredlist.org>
- IUCN.** (2023, December 11). *Freshwater fish highlight escalating climate impacts on species - IUCN Red List* [Comunicado de prensa]. International Union for Conservation of Nature. <https://www.iucn.org/press-release/202312/freshwater-fish-highlight-escalating-climate-impacts-species-iucn-red-list>
- Jiménez-Prado, P., Aguirre, W., Laaz-Moncayo, E., Navarrete, A. R., Frey, I., Nugra, S., Rebolledo, E., Zárate, E. J., Torres, A., Valdiviezo, J.** (2015). *Guía de peces para aguas continentales en la vertiente occidental del Ecuador*. (pp. 1-416). Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas; Universidad del Azuay y Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad, Esmeraldas, Ecuador.
- León, B., Cano, A., Young, R.** (1995). La flora vascular de los pantanos de Villa, Lima, Perú: Adiciones y guía para las especies comunes. *Publicaciones del Museo de Historia Natural-UNMSM (B)*, 38, 1-39.
- Lüling, K. H.** (1973): Die Laguna de Vegueta an der Küste Mittelperus und ihre Fische, insbesondere *Aequidens rivulatus* (Guenther 1859). *Zoologische Beiträge, Neue Folge*, 19, 93-108.
- Magurran, A. E., Khachonpitsak, S., Ahmad, A. B.** (2011). Biological diversity of fish communities: pattern and process. *Journal of Fish Biology*, 79(6), 1393-1412. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.03091.x>
- Martínez, A. G. & Mendoza, M.** (2022). *Humedales costeros del Perú: Humedales costeros de Pisco - Ica Informe Técnico Especial – Volumen I. Programa Presupuestal 144: “Conservación y uso sostenible de ecosistemas para la provisión de servicios ecosistémicos”*. MINAM - IGP
- Meza-Vargas, V., Faustino-Fuster, D.R., Marchena, J., Faustino-Meza, N., Ortega, H.** (2022). Fishes from Chira River basin, Piura, Peru. *Revista peruana de biología*, 29(3), e21993 001-010. <https://doi.org/10.15381/rpb.v29i3.21993>
- Miller, D. E.** (1966). *La Calidad del Agua. Manual de Introducción a la Acuicultura*. Zamorano, Honduras.
- Ministerio del Ambiente (MINAM).** (2019). *Sexto Informe Nacional Sobre Diversidad Biológica. La Biodiversidad en cifras*. Ministerio del Ambiente. Industria Gráfica CIMAGRAF S. A. C
- Ministerio del Ambiente (MINAM).** (2022). *Plan de Acción Nacional sobre las Especies Exó-ticas Invasoras en Perú 2022-2026. prevención, control y mitigación de impactos*. Ministerio del Ambiente.
- Musilová, Z., Schindler, I., Staack, W.** (2009). Description of *Andinoacara stalsbergi* sp. n. (Teleostei: Cichlidae: Cichlasomatini) from Pacific coastal rivers in Peru, and annotations on the phylogeny of the genus. *Vertebrate Zoology*, 59(2), 131-141.
- Myers, G. S.** (1949). Salt-Tolerance of Fresh-Water Fish Groups in Relation to Zoogeographical Problems. *Bijdragen tot de Dierkunde*, 28(1), 315-322. <https://doi.org/10.1163/26660644-02801038>
- Nelson, J. S., Grande, T. C., Wilson, M. V.** (2016). *Fishes of the World. 4ta edición*. John Wiley & Sons.
- Ortega, H., Guerra, H., Ramírez, R.** (2007). *The Introduction of Nonnative Fishes into Freshwater Systems of Peru*. En: Theresa M. Bert (Ed.) *Ecological and Genetic Implications of Aquaculture Activities*. (pp: 247-278). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6148-6_14

- Ortega, H. & Hidalgo, M.** (2008). Freshwater fishes and aquatic habitats in Peru: Current knowledge and conservation. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 11(3), 257-271. <https://doi.org/10.1080/14634980802319135>
- Ortega, H. & Vari, R. P.** (1986). *Annotated checklist of the freshwater fishes of Peru*. Smithsonian Institution Press. <https://doi.org/10.5479/si.00810282.437>
- Ortega, H., Hidalgo, M., Trevejo, G., Correa, E., Cortijo, A. N., Meza, V., Espino, J.** (2012). Lista anotada de los peces de aguas continentales del Perú. *Estado actual del conocimiento, distribución, usos y aspectos de conservación*. Lima, (pp. 1-56) Ministerio del Ambiente. 2a ed.
- Ortega, H., Espino, J., Valenzuela S., Valenzuela, L., Armas, M., Marchena, J.** (2015). Ríos y Arroyos Costeros Representativos del Perú: Caracterización, diversidad de la biota acuática y amenazas a la conservación. En: Lasso CA, Sánchez-Duarte P, Blanco-Libreros JF (Eds.). *XII. Cuencas pericontinentales de Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela: Tipología; Biodiversidad; Servicios ecosistémicos y sostenibilidad de los ríos, quebradas y arroyos costeros* (pp. 379-395). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/31362>
- Pandit, S. P., Kolasa, J., Cottenie, K.** (2009). Contrasts between habitat generalists and specialists: an empirical extension to the basic metacommunity framework. *The Ecological Society of America*, 9(8), 2253-2262. <https://doi.org/10.1890/08-0851.1>
- ProNaturaleza.** (2010). *Humedales de la Costa Peruana. Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana*. Pro Naturaleza.
- Pyšek, P., Hulme, P. E., Simberloff, D., Bacher, S., Blackburn, T. M., Carlton, J. T., Dawson, W., Essl, F., Foxcroft, L.C., Genovesi, P., Jeschke, J.M., Kühn, I., Liebhold, A.M., Mandrak, N.E., Meyerson, L.A., Pauchard, A., Pergl, J., Roy, H.E., Seebens, H., Van Kleunen, M., Vilà, M., Wingfield, M.J., Richardson, D.M.** (2020). Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews*, 95(6), 1511-1534. <https://doi.org/10.1111/brv.12627>
- Reis, R.E., Kullander, S.O., Ferraris, Jr. C.J.** (2003). *Check List of the Freshwater Fishes of South and Central America*. Edipucrs.
- Reis, R. E., Albert, J. S., Di Dario, F., Mincarone, M. M., Petry, P., Rocha, L. A.** (2016). Fish biodiversity and conservation in South America. *Journal of Fish Biology*, 89, 12-47. <https://doi.org/10.1111/jfb.13016>
- Schmitter-Soto, J. J.** (2006). Ficha técnica de *Poecilia velifera*. *Evaluación del riesgo de extinción de los cíclidos mexicanos y de los peces de la frontera sur incluidos en la NON-059*. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Bases de datos SNIB-CONABIO.
- Seebens, H., Meyerson, L. A., Rahlao, S. J., Lenzner, B., Tricarico, E., Aleksanyan, A., Courchamp, F., Keskin, E., Saeedi, H., Tawake, A., Pyšek, P.** (2023). Chapter 2: Trends and status of alien and invasive alien species. In: Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. En: Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P., and Renard Truong, T. (eds.). *IPBES secretariat*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7430725>
- Siccha-Ramírez, R., Luque, C., Vera, M., Britzke, R., Guevara, M., Castillo, D., Miranda, J.** (2023). *Catálogo ilustrado de la ictiofauna de la región Tumbes*. Tumbes. Instituto del Mar del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/7275>
- Trewavas, E.** (1983). *Tilapiine fishes of the genera Sarotherodon, Oreochromis and Danakilia*. Bulletin of the British Museum of Natural History.
- Valenzuela, S., Britzke, R., Chumbe-Nolasco, L. D., Apaza, J., Meza-Vargas, V., Armas, M., Cortijo, A. M., Ortega, H.** (2023) Fish fauna of the trans-Andean Tumbes river basin in northern Peru. *Check List*, 19(1), 91-114. <https://doi.org/10.15560/19.1.91>
- Van der Slepen, P. & Albert, J. S.** (2018). *Field Guide to the Fishes of the Amazon, Orinoco, and Guianas*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctt11qv5r0f>
- Vera, A., Oyague, E., Castañeda, L., Quinteros, Z.** (2013). Hábitos alimentarios del bagre “life” *Trichomycterus punctulatus* (Valenciennes, 1846) (Actinopterygii, Siluriformes) en el Río Pisco, Perú. *Ecología Aplicada*, 12(2), 121-131.
- Winemiller, K. O., Agostinho, A. A., Caramaschi, É. P.** (2008). *Fish Ecology in Tropical Streams*. En: David Dudgeon (Ed). *Tropical Stream Ecology* (pp. 107-138). Oxford, UK.

Artículo original

Ephemeroptera (Insecta) en un gradiente altitudinal de la región andino-amazónica colombiana: validación de una regla de Rapoport

Ephemeroptera (Insecta) in an altitudinal gradient in the Colombian Andean-Amazonian region, Caquetá: validating a Rapoport's rule

✉ Jhonatan Gutiérrez-Garaviz^{1,2,*}, ✉ Odete Rocha¹, ✉ Marlon Peláez-Rodríguez²,
✉ Oscar Agredo-Jiménez³

¹Departamento de Ecología e Biología Evolutiva, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo – Brasil

²Calidad y Preservación de Ecosistemas Acuáticos, Universidad de la Amazonía, Florencia, Colombia

³Departamento de Biología, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Resumen

La región andino-amazónica del departamento de Caquetá, Colombia, es reconocida por su alta biodiversidad de especies y gran variedad de ecosistemas acuáticos. Nuestro estudio se centró en el análisis de la distribución del orden Ephemeroptera a lo largo de un gradiente altitudinal en dicha región, con el objetivo de validar la regla Rapoport y determinar el recambio taxonómico. Para ello, se definieron tres regiones de estudio, Andes, Transición y Amazonas, donde se recolectaron muestras biológicas durante cuatro jornadas de campo entre el 2021 y el 2022. En el análisis de los datos se estimaron los números de Hill con base en la riqueza observada (q.0), la diversidad de Shannon-Wiener (q.1) y el índice de Gini-Simpson (q.2). Además, se utilizó un análisis de agrupamiento NMDS para explorar el recambio de especies, y un modelo de regresión lineal simple para corroborar una de las reglas de Rapoport. Los resultados revelaron tres rangos altitudinales: uno amplio en la región de los Andes, uno medio en zona de transición en los Andes, y uno restringido en Amazonas. Según el NMDS, se establecieron dos conjuntos que indicaron el recambio de especies entre la cordillera de los Andes y el Amazonas, con un valor de p de 0,001 en la ANOSIM. En cuanto a la regla Rapoport, se evidenció una relación negativa en los estimativos q.0, q.1 y q.2, pero su alcance se limitó a una escala regional, enfocado en los Andes y no en todo el gradiente altitudinal. Así, en la región de estudio se encontró una relación del gradiente altitudinal con el recambio de especies y los estimativos de diversidad del orden Ephemeroptera.

Palabras claves: Diversidad; Densidad; Recambio taxonómico; Composición.

Abstract

The Andino-Amazonian region of the department of Caquetá in Colombia is known for its high species biodiversity and wide variety of aquatic ecosystems. Our study analyzed the Ephemeroptera order distribution along an altitudinal gradient in the Caquetá region to validate the Rapoport rule and identify the probable taxonomic turnover. We defined three study regions: Andes, Transition, and Amazonas, where biological samples were collected during four field trips between 2021 and 2022. In the data analysis, we estimated the Hill numbers based on observed richness (q.0), the Shannon-Wiener diversity (q.1), and the Gini-Simpson index (q.2). Additionally, we used a non-metric multidimensional scaling (NMDS) cluster analysis to explore species turnover, and a simple linear regression model to corroborate the Rapoport rule. Our results revealed three altitudinal ranges: broad in the Andes region, medium in the Andes transition region, and restricted in Amazonas. The NMDS analysis distinguished two sets, indicating species turnover between the Andes mountain range and the Amazon, with an ANOSIM p-value = 0.001. The q.0, q.1, and

Citación: Gutiérrez-Garaviz J, Rocha O, Peláez-Rodríguez M, Agredo-Jiménez O. Ephemeroptera (Insecta) en un gradiente altitudinal de la región andino-amazónica colombiana: validación de una regla de Rapoport. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(187):383-395, abril-junio de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2631>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Jhonatan Gutiérrez-Garaviz;
jggaraviz@estudiante.ufscar.br

Recibido: 22 de abril de 2024

Aceptado: 17 de junio de 2024

Publicado en línea: 19 de junio de 2024



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

q.2 estimates showed a negative relationship with the Rapoport rule. However, its scope limited to a regional scale on the Andes, not the entire altitudinal gradient. Thus, we found a relationship in the study region between the altitudinal gradient, species turnover, and the diversity of the Ephemeroptera order estimates.

Keywords: Diversity; Density; Taxonomic turnover; Composition.

Introducción

La región andino-amazónica del Caquetá, situada entre la cordillera Oriental de los Andes y la extensa cuenca amazónica, es un corredor ecológico esencial que alberga una gran diversidad de formas de vida (Ramos-Pastrana *et al.*, 2023; Bogotá-Gregori *et al.*, 2024) en un amplio gradiente altitudinal. Sin embargo, la región enfrenta crecientes amenazas debido a la acelerada fragmentación vegetal que podría llevar a su desconexión ecológica, lo que aumenta su vulnerabilidad (Anderson *et al.*, 2018; Caldas *et al.*, 2023).

Por ello, el estudio de la relación entre el gradiente altitudinal, como una variable ambiental de escala regional, y la distribución de especies puede brindar información importante para un análisis de la desconexión de regiones proyectado al futuro. Ya se ha demostrado la influencia del gradiente altitudinal en el clima (Roldán & Ramírez, 2022), la vegetación (Bhat *et al.*, 2020), la composición del suelo (Ren *et al.*, 2018) o la hidrodinámica de los ríos (Guillén *et al.*, 2017) y, especialmente, de la pendiente (Jiménez-Robles *et al.*, 2016), factores que establecen las condiciones de hábitat para la colonización de los diversos organismos.

En estudios como el de Hoorn *et al.* (2010), la evidencia geológica y filogenética ha demostrado la importancia que tuvo el levantamiento de la cordillera de los Andes sobre la gran biodiversidad existente en la Amazonía occidental. Dicho fenómeno estableció, además, una barrera ambiental de gradiente altitudinal que incide sobre la distribución de las especies, como lo demostraron Shimabukuro *et al.* (2023) al analizar la distribución de macroinvertebrados acuáticos en la mata atlántica brasileña y las montañas amazónicas del Ecuador. Este tipo de análisis, sin embargo, aún no se ha abordado en la región andino-amazónica colombiana.

Los trabajos de Domínguez & Ballesteros (1992), Jacobsen (2004), Scheibler *et al.* (2014), Múrrria *et al.* (2014) y Kubendran *et al.* (2017) han evidenciado la relación existente entre el gradiente altitudinal y el establecimiento de macroinvertebrados acuáticos. En Colombia las investigaciones de Serna *et al.* (2022) y Tamaris-Turizo *et al.* (2023) han demostrado dicha relación, pero en el departamento de Caquetá, el estudio se ha enfocado en caracterizar la comunidad de macroinvertebrados acuáticos (Gutiérrez-Garaviz *et al.*, 2016; Chaux *et al.*, 2018; González *et al.*, 2020), sin profundizar en cómo el gradiente altitudinal influye específicamente en su distribución.

La regla de Rapoport (Steven, 1992), también ofrece un marco explicativo para anticipar patrones de distribución de especies. Dicha regla plantea que a medida que aumentan la altitud y la latitud, la diversidad de organismos decrece, efecto demostrado en cuanto a la altitud en los trabajos de Bhatt *et al.* (2012) y Chen *et al.* (2022), aunque no así en las investigaciones de Shimabukuro *et al.* (2021) y Nogueira *et al.* (2021). Esta diferencia de resultados sustenta la necesidad de validar la regla de Rapoport en el rango altitudinal de la región andino-amazónica, para lo cual es importante definir el grupo taxonómico. En este caso, el orden Ephemeroptera se considera un buen bioindicador ecológico en los ecosistemas acuáticos (Savic *et al.*, 2011; Jacobus *et al.*, 2019; Pandiarajan *et al.*, 2019). En este sentido, ya se publicó la relación del efecto de interés con este grupo (Beketov, 2009a, 2009b), pero en muchas regiones como el corredor andino-amazónico del departamento de Caquetá, no se ha documentado.

En este contexto, el objetivo de nuestro estudio fue analizar la distribución altitudinal del orden Ephemeroptera, buscando validar la regla de Rapoport (Steven, 1992) en la región andino-amazónica colombiana a partir de la estimación de la abundancia, la riqueza observada, la diversidad de Shannon-Wiener, y el índice de Gini-Simpson, considerando

como hipótesis la existencia de una relación inversa entre los estimativos de diversidad y el gradiente altitudinal, así como de un recambio taxonómico entre la cordillera de los Andes y la planicie amazónica.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la región andino-amazónica, flanco oriental de la cordillera de los Andes y las tierras bajas del departamento de Caquetá, incluidos los municipios de El Doncello, El Paujil, Montañita, Florencia, Belén de los Andaquíes, San José del Fragua y Milán (**Tabla 1, figura 1**). El área de estudio presentó una variación altitudinal que va desde los 231 m s.n.m hasta los 2.505. En las salidas de campo preliminares se establecieron tres regiones de estudio: Andes (1.697-2.205 m s.n.m), Transición (293-581 m s.n.m) y Amazonas (231-276 m s.n.m), y diez estaciones de muestreo en cada una. La forma de limitar cada región se hizo de manera visual, detectando cambios en los diferentes componentes del paisaje fluvial (sustrato, hidrodinámica del río, cobertura vegetal), contrastando esa información con la base de datos abiertos sobre coberturas del instituto SINCHI (**Datos Abiertos – Instituto SINCHI, 2023**).

Tabla 1. Información geográfica relacionada con el área de estudio. Las campañas de muestreo comprenden los meses de octubre a diciembre del 2021 y de febrero a abril del 2022. Altitud expresada en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m)

Estación	Altitud	XCOORD	YCOORD
E1	2205	-75,6796	1,8781
E2	2202	-75,6786	1,8773
E3	2070	-75,6700	1,8690
E4	1540	-75,6618	1,8404
E5	1000	-75,6470	1,7951
E6	957	-75,6394	1,7708
E7	2168	-75,7663	1,7627
E8	2041	-75,7496	1,7562
E9	1697	-75,7231	1,7359
E10	581	-75,6456	1,7294
E11	396	-75,6723	1,6236
E12	492	-75,9832	1,2977
E13	321	-75,9538	1,3350
E14	300	-75,9181	1,3622
E15	308	-75,8866	1,4083
E16	285	-75,2284	1,7665
E17	285	-75,2361	1,7539
E18	378	-75,3017	1,6362
E19	293	-75,3363	1,5427
E20	276	-75,3426	1,5205
E21	247	-75,3594	1,4283
E22	252	-75,3582	1,4253
E23	231	-75,3448	1,3754
E24	237	-75,3853	1,3572
E25	245	-75,4162	1,3358
E26	243	-75,4346	1,2999
E27	233	-75,4300	1,3052
E28	235	-75,4356	1,2954
E29	266	-75,4396	1,2821
E30	234	-75,4295	1,2973

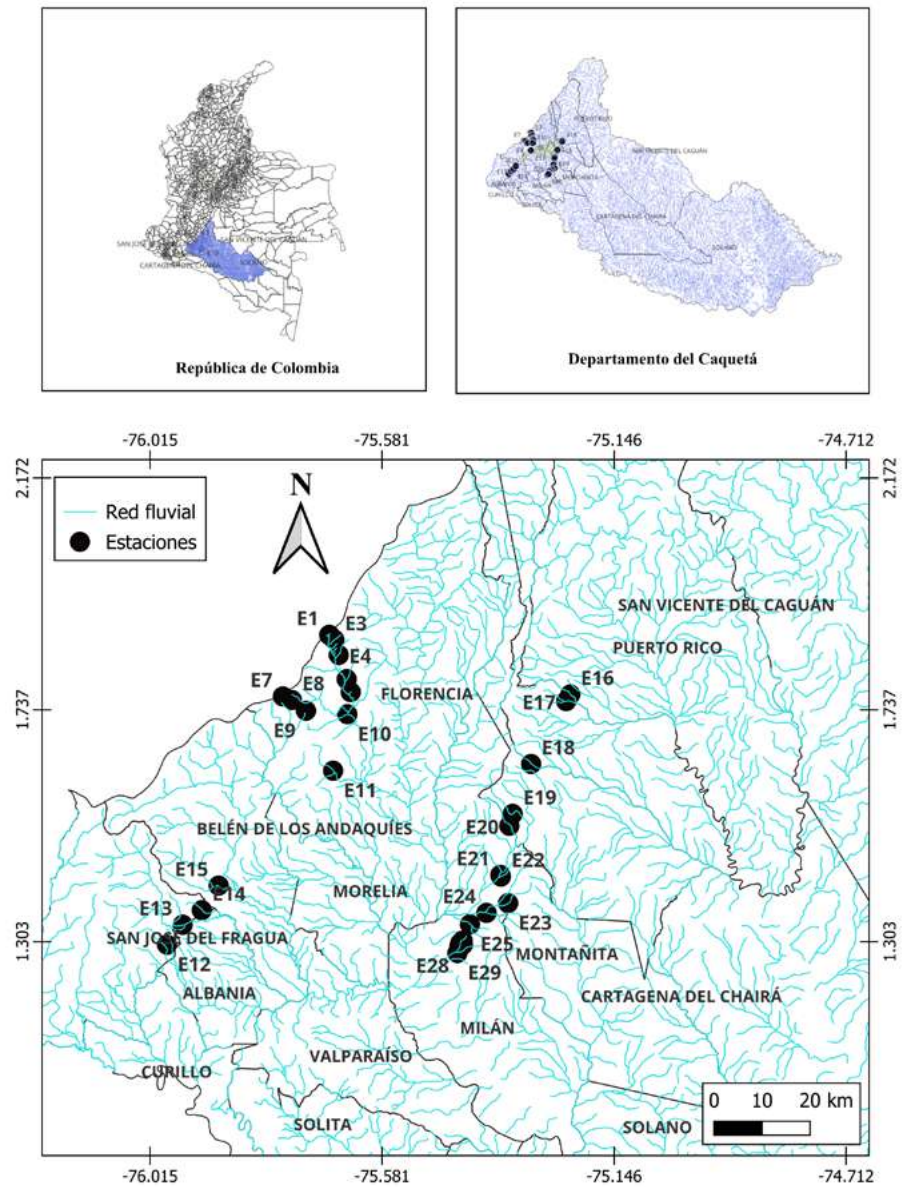


Figura 1. Localización y distribución de las 30 estaciones de muestreo asociadas a diferentes ecosistemas lóticos de la región andino-amazónica del departamento de Caquetá. (E): estación

Fase de campo y laboratorio

Se llevaron a cabo cuatro campañas bimensuales de muestreo entre octubre y diciembre del 2021 y febrero y abril del 2022. El material biológico se recolectó con el método de muestreo multihábitat según las recomendaciones de **Rodríguez-Capítulo *et al.*, (2009), Roldán & Ramírez (2022)** y **Wantzen & Rueda-Delgado (2009)**. En cada estación de muestreo, se hicieron diez arrastres de forma aleatoria utilizando una red Surber de 0,3 x 0,3 m y malla de 250 micras de poro para abarcar la mayoría de los microhábitats disponibles. Posteriormente se homogeneizó la muestra y se preservó en etanol al 75 %.

En laboratorio se separaron los individuos del orden Ephemeroptera con la ayuda de un estereoscopio Zeiss Stemi DV4 y un microscopio Zeiss Primo Star para luego identificar el material utilizando las guías y claves taxonómicas de **Domínguez *et al.* (2006, 2009)** y **Salles *et al.* (2018)**.

Análisis de datos

Todos los análisis de datos se llevaron a cabo utilizando el programa estadístico RStudio, versión 2023.03.1 Build 446. Se elaboró un gráfico de distribución altitudinal a partir de la presencia de cada uno de los taxones encontrados, utilizando la librería ggplot2 (Wickham, 2016), la cual permite ordenarlos de acuerdo con su amplitud (amplia= aquellos taxones con un rango altitudinal mayor a 1.000 m s.n.m.; media= entre 500 y 1000 m s.n.m, y baja= menor a 500 m s.n.m). Posteriormente, las abundancias de cada taxón de Ephemeroptera se convirtieron a valores de densidad (n/m^2).

Para identificar el recambio de taxones entre las regiones a lo largo del gradiente altitudinal, se aplicó un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (*non-metric multidimensional scaling*, NMDS) con distancia de Bray-Curtis, utilizando la librería vegan 2.6-4 y definiendo el número de grupos a partir del método del codo (*Elbow method*). El NMDS es una herramienta utilizada ampliamente en ecología para determinar la similitud o disimilitud entre muestras en una representación espacial ajustada (Palacio *et al.*, 2020). Además, se aplicó una ANOSIM, también con distancia de Bray-Curtis, para validar significativamente las diferencias entre los grupos formados teniendo en cuenta la composición taxonómica asociada y las altitudes.

Con la librería “hillR” se estimaron los números de Hill, o diversidad verdadera, teniendo en cuenta las recomendaciones de Jost (2006). Se calculó la riqueza observada (q.0), la diversidad de Shannon-Wiener (q.1) y el índice de Gini-Simpson (q.2). Se sumaron la densidad de cada taxón y el gradiente altitudinal a los estimativos de diversidad y se transformaron en una escala $\log(x-1)$. Esto permitió determinar correlaciones a partir del método de Pearson, que evalúa la relación entre dos variables cuantitativas, expresada como la relación de la covarianza con el producto de la desviación estándar de cada variable (Palacio *et al.*, 2020), mediante la librería “ggcorrplot”.

Después se hizo un análisis de regresión lineal simple, el cual se usa para predecir o explicar una variable de interés en relación con otra conocida como predictor (Guisande *et al.*, 2011). Mediante varios modelos, se estableció qué variables pueden depender de la altitud, buscando corroborar la regla de Rapoport en la región andino-amazónica del Caquetá. Posteriormente, se aplicó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y una prueba de heterocedasticidad de varianzas no constantes (NCV) a cada uno de los modelos de regresión lineal utilizando las bibliotecas “ggplot2” y “car”.

Resultados

Distribución altitudinal y recambio taxonómico

Según los rangos de distribución altitudinal referencia (Figura 2), se establecieron las siguientes agrupaciones: 1) taxones con amplia distribución altitudinal: *Baetodes* spp., *Trichorythodes* spp., *Thraulodes* spp., *Leptohyphes* spp., *Farrodes* spp., *Haplohyphes* spp., *Aturbina* spp., *Camelobaetidius* spp., *Varipes* spp., *Lachlania* spp., *Prebaetodes* spp., *Cloeodes* spp., *Nanomis* spp. y *Americabaetis* spp.; 2) taxones con amplitud de distribución altitudinal media: *Mayobaetis* spp., *Guajirolos* spp., *Terpides* spp. e *Hydrosmilodon* spp., y 3) taxones con distribución altitudinal baja: *Andesiops peruvianus*, *Waltzoyphius* spp., *Traverhyphes* spp., *Fittkaulus amazonicus*, *Miroculis* spp., *Brasilocaenis* spp., *Ecuaphlebia* spp., *Amanahyphes* spp., *Paracloeodes* spp., *Tricorythopsis* spp., *Callibaetis* spp., *Campsurus* spp., *Apobaetis* spp., *Caenis* spp., *Tricorythopsis rondonienseis*, *Ulmeritoides* spp., *Campylocia* spp., *Coryphorus aquilus* y *Euthyplocia* spp. En la Tabla 1S del material suplementario se relaciona la información sobre la composición del orden Ephemeroptera en la región andino-amazónica del departamento de Caquetá.

El resultado al aplicar el método del codo (*elbow*), sugiere un $k=2$ para el agrupamiento en el análisis multivariado NMDS (Figura 3). El modelo presentó un valor de stress de 0,081 y un R^2 no paramétrico de 0,993 en las dos agrupaciones establecidas. En el primer grupo se asociaron los taxones de distribución amplia y media según el resultado de distribución altitudinal y en el segundo grupo, los taxones con distribución restringida. El resultado de la ANOSIM indicó una diferencia significativa ($p=0,001$; $R=0,814$).

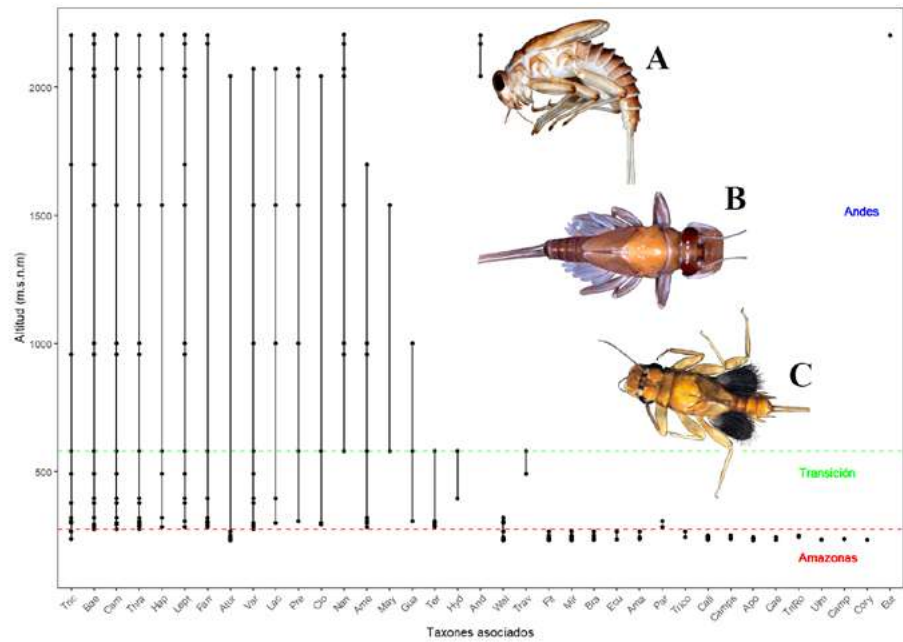


Figura 2. Distribución altitudinal de los diferentes taxones de Ephemeroptera presentes en la región andino-amazónica, departamento de Caquetá, Colombia, recolectados en el periodo octubre-diciembre del 2021 a febrero-abril del 2022. Se detallan tres géneros representativos: *Baetodes* spp. (A) con amplia distribución; *Hydrosmilodon* spp. (B), asociado principalmente a la región Transición; *Ulmeriotoides* spp. (C) con distribución baja, presente en Amazonas. En la **tabla S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2631/4026> se detallan las abreviaturas de cada taxón

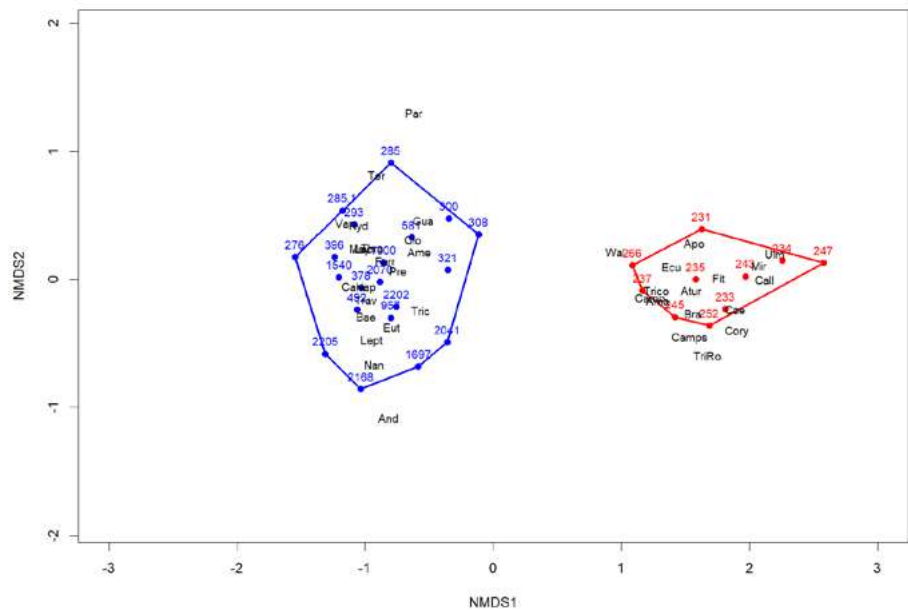


Figura 3. Resultados del análisis multidimensional de escalamiento no métrico (NMDS) aplicado a los datos de distribución altitudinal de los taxones de Ephemeroptera asociados a ríos de la región andino-amazónica en el departamento de Caquetá, Colombia, recolectados entre octubre a diciembre de 2021 y febrero-abril de 2022. En azul se relacionan las altitudes de las regiones de Andes y Transición. En rojo la región Amazonas. En negro las abreviaturas de los taxones de Ephemeroptera, las cuales pueden ser consultadas en la **tabla S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2631/4026> del material suplementario

La diversidad taxonómica y la regla de Rapoport

En la **tabla 2** se presentan los resultados de varios modelos que examinan la relación entre el gradiente altitudinal, los números de Hill y los valores de densidad. Entre los modelos analizados solo cuatro se ajustaron a una regresión lineal simple. Los números de Hill q.0 (CORR=-0,67; p=0,033; R²=0,451), q.1 (CORR=-0,75; p=0,011; R²=0,569), y q.2 (CORR=-0,78; p=0,008; R²=0,601) revelaron una correlación negativa en la región de los Andes, en tanto que la densidad en la interacción en la zona de transición de los Andes presentó una correlación positiva (CORR=0,55; p=0,011; R²=0,303). Los resultados de los modelos significativos se muestran en la **figura 4**.

Tabla 2. Modelos de regresión lineal simple aplicados a los estimativos de diversidad y la densidad del orden Ephemeroptera de muestras recolectadas durante las campañas de muestreo de 2021 y 2022. Riqueza observada de especies (q0), diversidad de Shannon-Wiener (q1), índice de Gini-Simpson (q2); correlación de Pearson (CORR)

MODELO	CORR.	P	R ²	SHAPIRO_T	ncvTest
N~ALTITUD_TOTAL	0,310	0,099	0,094	(-)	(-)
q.0~ALTITUD_TOTAL	0,210	0,276	0,042	(-)	(-)
q.1~ALTITUD_TOTAL	0,230	0,221	0,053	(-)	(-)
q.2~ALTITUD_TOTAL	0,250	0,179	0,063	(-)	(-)
N~ALTITUD_ANDES	-0,202	0,574	0,040	(-)	(-)
q.0~ALTITUD_ANDES	-0,678	0,031*	0,459	0,512	0,294
q.1~ALTITUD_ANDES	-0,750	0,011*	0,569	0,723	0,252
q.2~ALTITUD_ANDES	-0,780	0,008**	0,601	0,837	0,273
N~ALTITUD_TRANSICIÓN	0,230	0,530	0,051	(-)	(-)
q.0~ALTITUD_TRANSICIÓN	0,340	0,344	0,112	(-)	(-)
q.1~ALTITUD_TRANSICIÓN	0,360	0,310	0,128	(-)	(-)
q.2~ALTITUD_TRANSICIÓN	0,370	0,294	0,136	(-)	(-)
N~ALTITUD_AMAZONAS	0,060	0,881	0,002	(-)	(-)
q.0~ALTITUD_AMAZONAS	0,220	0,538	0,049	(-)	(-)
q.1~ALTITUD_AMAZONAS	0,100	0,791	0,009	(-)	(-)
q.2~ALTITUD_AMAZONAS	-0,010	0,982	6,89X10 ⁻⁰⁵	(-)	(-)
N~ALTITUD_ANDES_TRANSICIÓN	0,550	0,011*	0,303	0,830	0,716
q.0~ALTITUD_ANDES_TRANSICIÓN	0,160	0,504	0,025	(-)	(-)
q.1~ALTITUD_ANDES_TRANSICIÓN	0,090	0,711	0,007	(-)	(-)
q.2~ALTITUD_ANDES_TRANSICIÓN	0,060	0,788	0,004	(-)	(-)
N~ALTITUD_ANDES_AMAZONAS	0,200	0,403	0,039	(-)	(-)
q.0~ALTITUD_ANDES_AMAZONAS	0,160	0,493	0,026	(-)	(-)
q.1~ALTITUD_ANDES_AMAZONAS	0,220	0,364	0,046	(-)	(-)
q.2~ALTITUD_ANDES_AMAZONAS	0,250	0,280	0,064	(-)	(-)
N~ALTITUD_TRANSICIÓN_AMAZONAS	-0,190	0,431	0,034	(-)	(-)
q.0~ALTITUD_TRANSICIÓN_AMAZONAS	0,150	0,538	0,021	(-)	(-)
q.1~ALTITUD_TRANSICIÓN_AMAZONAS	0,290	0,222	0,081	(-)	(-)
q.2~ALTITUD_TRANSICIÓN_AMAZONAS	0,380	0,095	0,146	(-)	(-)

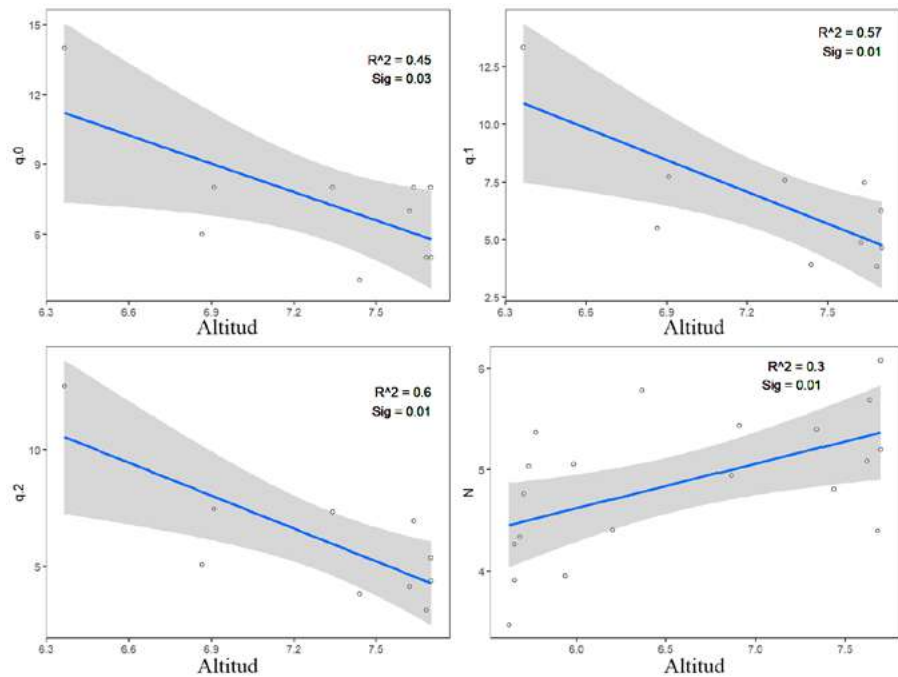


Figura 4. Modelos de regresión lineal simple donde se relaciona la altitud con la riqueza observada (q.0) en la región Andes, índice de diversidad de Shannon-Wiener (q.1) en la región Andes, índice de Gini-Simpson (q.2) en la región Andes, y densidad (N) en la interacción Andes-Transición. Los modelos se basan en el material biológico recolectado entre octubre-diciembre de 2021 a febrero-abril de 2022

Discusión

Según los resultados de distribución altitudinal, la mayoría de los taxones coinciden con la información disponible en la literatura consultada sobre Colombia (Gutiérrez & Reinoso-Flórez, 2010; Hoyos *et al.*, 2014; Gutiérrez & Dias, 2015; Rúa *et al.*, 2015; Forero-Céspedes *et al.*, 2016; Mosquera *et al.*, 2022). Sin embargo, existen algunos taxones, por ejemplo *Mayobaetis* spp. o *Traveryphe* spp., que presentan un rango altitudinal más amplio, por lo que es necesario recolectar muestras en otras áreas de Caquetá cercanas al municipio de San Vicente del Caguán para validar con mayor exactitud los rangos altitudinales asociados especialmente con los taxones de distribución baja.

Además de los datos de distribución altitudinal, la composición a nivel taxonómico de género, arrojó que la región de estudio alberga el 65,4 % de lo reportado por Hincapié-Montoya *et al.* (2022) para el país, lo que convierte el corredor andino-amazónico de Caquetá en un área de referencia para el estudio de Ephemeroptera, con la existencia de una taxocenosis de alta riqueza en los ecosistemas acuáticos evaluados en el gradiente ambiental.

La separación regional en los dos conjuntos establecidos en el NMDS, evidencian un reemplazo taxonómico y validan la hipótesis planteada. Al revisar los datos, la mayoría de los géneros asociados al primer conjunto (azul) son característicos de ríos de alta montaña, con una mayor variabilidad altitudinal (Gutiérrez & Dias, 2015; Forero-Céspedes *et al.*, 2016; Molineri *et al.*, 2020; Hincapié-Montolla *et al.*, 2022), en tanto que los géneros asociados a la región Amazonas (conjunto rojo) son comunes de tierras bajas, con poca variación altitudinal (Domínguez *et al.*, 2002; Zúñiga *et al.*, 2004; González *et al.*, 2020; Hincapié-Montolla *et al.*, 2022; González, 2022; Barros *et al.*, 2024).

Además, el resultado del NMDS es consistente con un estudio previo de González *et al.* (2020) en el sendero Andakí en Caquetá, en el que se indica la influencia altitudinal en el reemplazo de taxones de macroinvertebrados acuáticos. Asimismo, los trabajos de

Domínguez & Ballesteros (1992), Ramírez et al. (2004), Chaves et al. (2008), Scheibler et al. (2014), y Múrria et al. (2014) también resaltan esa relación, siendo el gradiente altitudinal una variable determinante en el establecimiento de los grupos biológicos acuáticos.

Así, la determinación de un recambio taxonómico en el área de estudio es base fundamental para analizar posteriormente la capacidad de dispersión de cada uno de estos taxones (p. ej., *Andesiops peruvianus*, *Coryphorus aquilus*, *Tricorythopsis rondoniensis*, *Fittkaulus amazonicus*), y cómo puede verse afectada por el aumento progresivo de la desconexión entre los Andes y la Amazonía, como se documenta en los trabajos de **Anderson et al. (2018), Clerici et al. (2019)** y **Murillo-Sandoval et al. (2022)**.

En cuanto a los estimativos de diversidad verdadera (números de Hill), se validó la hipótesis planteada que indicaba una relación inversa con el gradiente altitudinal, con excepción de la densidad. Tal como se observó en los gráficos del modelo de regresión lineal, la disminución de la riqueza (q.0) con respecto a la altitud concuerda con las investigaciones realizadas por **Jacobsen (2004), Kubendran et al. (2017), y Tyufekchieva et al. (2022)** al analizar la riqueza de diferentes grupos de macroinvertebrados acuáticos. Asimismo, los resultados muestran que el índice de Shannon-Wiener (q.1) también puede ser un estimativo de esa relación inversa.

En cuanto a la densidad, no se cumpliría con lo planteado en la hipótesis, al encontrarse una relación positiva. Sin embargo, en la región de los Andes se evidenció una correlación negativa (-0,202), lo que sugiere que, al estudiar estaciones con mayores altitudes, se cumpliría con la hipótesis, como fue corroborado por **Maltchik et al. (2009)**. Por último, el índice de Gini-Simpson (q.2) es el modelo con mejor ajuste en el presente estudio al evidenciar esa relación inversa con el gradiente altitudinal, algo que ya fue comprobado en tierras altas en el trabajo de **Farooq et al. (2021)**.

La validación de la regla de Rapoport propuesta por **Steven (1992)**, es decir, el aumento del gradiente altitudinal y latitudinal frente a una disminución de la riqueza de especies, su alcance en la región andino-amazónica estaría limitado a una diferenciación regional, cuyos efectos son evidentes principalmente en la región de los Andes, y no en todo el gradiente altitudinal. Los estudios de **Beketov (2009a; 2009b)** demuestran la regla de Rapoport (**Steven, 1992**) en efímeras asociadas con diferentes hábitats en Siberia. Sin embargo, este efecto macroecológico no es evidente en todos los ecosistemas fluviales, como se demuestra en el trabajo de **Shimabukuro & Trivinho-Trivinho (2021)**, quienes analizaron macroinvertebrados acuáticos asociados a un gradiente altitudinal desde los 200 m s.n.m hasta los 2.700 en montañas del bosque atlántico en el sureste de Brasil.

Conclusiones

El corredor andino-amazónico de Caquetá alberga una importante riqueza taxonómica del orden Ephemeroptera, abarcando géneros o especies de distribución amplia y media en la cordillera de los Andes, y una distribución más restringida en la región Amazonas, lo que indica, además, un recambio de especies dentro del gradiente altitudinal evaluado.

En cuanto a la regla de Rapoport para lo altitudinal (**Steven, 1992**), en el área de estudio se evidenció principalmente en los Andes. La riqueza observada (q.0), la diversidad de Shannon-Wiener (q.1) y el índice de Gini-Simpson (q.2) validaron este concepto ecológico en el departamento de Caquetá.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en: <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2631/4026>

Agradecimientos

Un especial agradecimiento al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) de Brasil por financiar parte del proyecto, con tasa bancaria asociada a la beca doctoral, proceso 141626/2020-8.

Contribución de los autores

JGG: conceptualización, investigación, análisis formal, redacción del borrador original; OR: conceptualización, redacción, revisión y edición; MPR: revisión y edición; OAJ: investigación, revisión y edición.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Anderson, E.P., Jenkins, C.N., Heilpern, S., Maldonado-Ocampo, J.A., Carvajal-Vallejos, F.M., Encalada, A.C., Rivadeneira, J.F., Hidalgo, M., Cañas, C.M., Ortega, H., Salcedo, N., Maldonado, A., Tedesco, P.A.** (2018). Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams. *Science advances*, 4(1), eaa01642.
- Barros Santos, N. B., Martins Cruz, G., Sampaio Monteles, J., Justino de Faria, A. P., Caetano Firmino, V., Shimano, Y., Santos Ferreira, V.R., Luiza-Andrade, A., Salles, F.F., Castro, D.M.P., Quintero, F.B., Lima, L.R.C., Gomez Dias, L., O. Pes, A.M., Hamada, N., Juen, L.** (2024). Database of immature stage traits of Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera (EPT) genera for the Amazon. *Aquatic Sciences*, 86(2), 35. <https://doi.org/10.1007/s00027-024-01051-4>
- Beketov, M.A.** (2009a). The Rapoport effect is detected in a river system and is based on nested organization. *Global Ecology and Biogeography*, 18(4), 498-506. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00466.x>
- Beketov, M.A.** (2009b). Cross-Eurasian and altitudinal distribution of lotic mayflies—species with wider altitudinal ranges have narrower geographical distribution. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 45(4), 209-218. <https://doi.org/10.1051/limn/2009024>
- Bhatt, J.P., Manish, K., Pandit, M.K.** (2012). Elevational gradients in fish diversity in the Himalaya: water discharge is the key driver of distribution patterns. *PLOS ONE*, 7(9), e46237. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046237>
- Bhat, J.A., Kumar, M., Negi, A.K., Todaria, N.P., Malik, Z.A., Pala, N.A., Kumar, A., Shukla, G.** (2020). Species diversity of woody vegetation along altitudinal gradient of the Western Himalayas. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01302. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01302>
- Bogotá-Gregory, J.D., Jenkins, D.G., Acosta-Santos, A., Agudelo-Córdoba, E.** (2024). Fish diversity of Colombian Andes-Amazon streams at the end of conflict is a reference for conservation before increased land use. *Ecology and Evolution*, 14(3), e11046. <https://doi.org/10.1002/ece3.11046>
- Caldas, B., Thieme, M.L., Shahbol, N., Coelho, M.E., Grill, G., Van Damme, P.A., Aranha, R., Cañas, C., Fagundes, C.K., Franco-León, N., Herrera-Collazos, E.E., Jézequel, C., Montoya, M., Mosquera-Guerra, F., Oliveira-da-Costa, M., Paschoalini, M., Petry, P., Oberdorff, T., Trujillo, F., Tedesco, P. A., de Brito Ribeiro, M. C. L.** (2023). Identifying the current and future status of freshwater connectivity corridors in the Amazon Basin. *Conservation Science and Practice*, 5(1), e12853. <https://doi.org/10.1111/csp2.12853>
- Chaux, J.P., Pimentel-Parra, G.A., Murcia-Ordóñez, B., Chaves-Moreno, L.C., Acosta, L.C., Suárez, L.F.** (2018). Biodiversidad de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos asociados al Río Fragua Chorroso y su papel como bioindicador de calidad de agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(2), 130-137. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3222>
- Chaves, M.L., Rieradevall, M., Chainho, P., Costa, J.L., Costa, M.J., Prat, N.** (2008). Macroinvertebrate communities of non-glacial high altitude intermittent streams. *Freshwater Biology*, 53(1), 55-76. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01867.x>
- Chen, A., Li, Z., Zheng, Y., Zhan, J., Yang, B., Yang, Z.** (2022). Decreasing Species Richness with Increase in Elevation and Positive Rapoport Effects of Crambidae (Lepidoptera) on Mount Taibai. *Insects*, 13, 1125. <https://doi.org/10.3390/insects13121125>
- Clerici, N., Salazar, C., Pardo-Díaz, C., Jiggins, C.D., Richardson J.E., Linares, M.** (2019). Peace in Colombia is a critical moment for Neotropical connectivity and conservation: Save the northern Andes–Amazon biodiversity bridge. *Conservation Letters*, 12(1), e12594. <https://doi.org/10.1111/conl.12594>

- 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>
- Datos abiertos – Instituto SINCHI.** (11 de julio de 2023). Coberturas de la tierra SIMCOBA. <https://datos.siatac.co/pages/coberturas>.
- Domínguez, E. & Ballesteros-Valdéz, J.M.** (1992) Altitudinal replacement of Ephemeroptera in a subtropical river. *Hydrobiologia*, 246, 83-88.
- Domínguez, E., Zúñiga, M.C., Molineri, C.** (2002). Estado actual del conocimiento del orden Ephemeroptera (Insecta) en la región Amazónica. *Caldasia*, 24(2), 459-469.
- Domínguez, E., Molineri, C., Pescador, M., Hubbard, M.D., Nieto, C.** (2006). Ephemeroptera of South America, Vol. 2. Pensoft Publishers, Sofia, Moscow.
- Domínguez, E., Molineri, C., Nieto, C.** (2009). Ephemeroptera, capítulo 3. En: Domínguez, E., Fernández, H.R. (eds.). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología* (55-93). Fundación Miguel Lillo.
- Farooq, M., Li, X., Tan, L., Fornacca, D., Li, Y., Cili, N., Tian, Z., Yang, L., Deng, X., Liu, S., Xiao, W.** (2021). Ephemeroptera (Mayflies) Assemblages and Environmental Variation along Three Streams Located in the Dry-Hot Valleys of Baima Snow Mountain, Yunnan, Southwest China. *Insects*, 12(9), 775. <https://doi.org/10.3390/insects12090775>
- Forero-Céspedes, A.M., Gutiérrez, C., Reinoso-Flórez, G.** (2016). Composición y estructura de la familia Baetidae (Insecta: Ephemeroptera) en una cuenca andina colombiana. *Hidrobiológica* 26(3), 459-474.
- González, I.G., Núñez-Avellaneda, M., Zúñiga, M.C.** (2020). Los macroinvertebrados acuáticos de la región andino-amazónica colombiana: Camino Andakí, departamento de Caquetá. *Revista Colombiana Amazónica*, 12, 191-202.
- González I, Núñez-Avellaneda M, Castro-Pulido, W.** (2022). Colección de Macroinvertebrados Acuáticos de la Amazonia Colombiana. Version 2.1. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - SINCHI. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15472/j75tor> <https://www.gbif.org/occurrence/3805035772>
- Guillén-Ludeña, S., Cheng, Z., Constantinescu, G., Franca, M.J.** (2017). Hydrodynamics of mountain river confluences and its relationship to sediment transport. *JGR Earth Surf.*, 122, 901-924. <https://doi.org/10.1002/2016JF004122>
- Guisande-González, C., Vaamonde-Liste, A., Barreiro-Felpeto, A.** (2011). Tratamiento de datos con R, STATISTICA y SPSS. Editorial Díaz de Santos, Universidad de Vigo.
- Gutiérrez, C. & Reinoso-Flórez, G.** (2010). Géneros de ninfas del orden Ephemeroptera (Insecta) del departamento del Tolima, Colombia: listado preliminar. *Biota Colombiana* 11(1,2): 23-32.
- Gutiérrez, Y. & Dias, L.G.** (2015). Ephemeroptera (Insecta) de Caldas-Colombia, claves taxonómicas para los géneros y notas sobre su distribución. *Papéis Avulsos de Zoologia*, 55(2), 13-46. <https://doi.org/10.1590/0031-1049.2015.55.02>
- Gutiérrez-Garaviz, J., Peláez-Rodríguez, M., Ovalle-Serrano, H.** (2016). Macroinvertebrados acuáticos presentes en dietas de peces de la cuenca del río Hacha (Caquetá, Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(156), 420-432. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.344>
- Hincapié-Montoya, D.M, Posada-García, J.A, Álvarez-Arango, L.F, Velásquez, C., Serna-Arbeláez, J.D.** (2022). Lista de macroinvertebrados acuáticos continentales de Colombia. v3.3. Grupo Taxón-MIA. Dataset/Checklist. <https://doi.org/10.15472/hmyvdl>
- Hoorn, C., Wesselingh, F.P., Ter-Steege, H., Bermúdez, M.A., Mora, A., Sevink, J., Sanmartín, I., Sánchez-Meseguer, A.C., Anderson, L., Antonelli, A.** (2010). Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. *Science* 330(6006): 927-931. <https://doi.org/10.1126/science.1194585>
- Hoyos, D.C., Rivera-P, F. A., López-G, G.A., Zúñiga, M.C., Gomes Dias, L.** (2014). Contribución al conocimiento de las especies de *Haplohyphes* Allen (Insecta: Ephemeroptera: Leptohiphidae) en Colombia. *Caldasia* 36(1), 125-138.
- Jacobus, L.M., Macadam, C.R., Sartori, M.** (2019). Mayflies (Ephemeroptera) and their contributions to ecosystem services. *Insects*, 10(6), 170. <https://doi.org/10.3390/insects10060170>
- Jacobsen, D.** (2004). Contrasting patterns in local and zonal family richness of stream invertebrates along an Andean altitudinal gradient. *Freshwater Biology*, 49, 1293-1305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01274.x>

- Jiménez-Robles, A.M., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A.** (2016). Effects of basin bottom slope on jet hydrodynamics and river mouth bar formation, *JGR Earth Surf.*, 121, 1110-1133. <https://doi.org/10.1002/2016JF003871>
- Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113, 363-375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
- Kubendran, T., Selvakumar, C., Sidhu, A., Murali Krishnan, S., Nair, A.** (2017). Diversity and distribution of Baetidae (Insecta: Ephemeroptera) larvae of streams and Rivers of the southern Western Ghats, India. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5(3), 613-625.
- Maltchik, L., Stenert, C., Spies, M.R., Sieglach, E.** (2009). Diversity and Distribution of Ephemeroptera and Trichoptera in Southern Brazil Wetlands. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 82(2), 160-173. <https://doi.org/10.2317/JKES808.04.1>
- Molineri, C., Nieto, C., Dos Santos, D.A., Emmerich, D., Zúñiga, M.C., Fierro, P., Pessacq, P., Gómez, D., Márquez, J.A., Domínguez, E.** (2020). Do mayflies (Ephemeroptera) support a biogeographic transition zone in South America? *Journal of Biogeography*, 00, 1-14. <https://doi.org/10.1111/jbi.13868>
- Mosquera-Murillo, Z., Córdoba-Aragón, K.E., Mosquera-Mosquera, M.M.** (2022). Riqueza genérica y distribución de los efemerópteros (Insecta: Ephemeroptera) de la Colección Limnológica del Chocó. *Biota Colombiana*, 23(2), 1-12. <https://doi.org/10.21068/2539200X.1049>
- Murillo-Sandoval, P. J., Clerici, N., Correa-Ayram, C.** (2022). Dense satellite data reveals landscape connectivity decline in the Andes-Amazon region. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.02.17.480775>
- Múrria, C., Morante, M., Rieradevall, M., Ribera, C., Prat, N.** (2014). Genetic diversity and species richness patterns in Baetidae (Ephemeroptera) in the Montseny Mountain range (North-East Iberian Peninsula). *Limnetica*, 33(2), 313-326. <http://doi.org/10.23818/limn.33.24>
- Nogueira, A.D.A., Brescovit, A.D., Perbiche-Neves, G., Venticinque, E.M.** (2021). Spider (Arachnida-Araneae) diversity in an amazonian altitudinal gradient: are the patterns congruent with mid-domain and rapoport effect predictions? *Biota Neotropica*, 21, e20211210. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2021-1210>
- Palacio, F.X., Apodaca, M.J., Crisci, J.V.** (2020). Análisis multivariados para datos biológicos: teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R. Fundación Historia Natural Feliz de Azara.
- Pandiarajan, S., Thambiratnam, S., Sivaruban, I.R.B.** (2019). Bio-monitoring and detection of water quality using Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera (EPT) complex in Karanthamalai Stream of Eastern Ghats. *Indian journal of Ecology*, 46(4), 818-822.
- Ramírez, J.J., Roldán-Pérez, G., Yepes, G.A.** (2004). Altitudinal variation of the numerical structure and biodiversity of the taxocenosis of ephemeroptera in the South, North, and Central Regions of the Department of Antioquia, Colombia. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 16(4), 329-339.
- Ramos-Pastrana, Y., Córdoba-Suarez, E., Lopera-Toro, A.** (2023). Sex ratio of the coprophagous beetle community (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae) in the Andean Amazon, Caquetá, Colombia. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. Univ. Caldas*, 27(2), 227-243. <https://doi.org/10.17151/bccm.2023.27.2.13>
- Ren, C., Zhang, W., Zhong, Z., Han, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G.** (2018). Differential responses of soil microbial biomass, diversity, and compositions to altitudinal gradients depend on plant and soil characteristics. *Science of the Total Environment*, 610, 750-758. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.110>
- Rodríguez-Capítulo, A., Muñoz, I., Bonada, N., Gaudes, A., Tomanova, S.** (2009). La biota de los ríos: los invertebrados, capítulo 14. En: Elosegui, A. & Sabater, S. (Eds). *Conceptos y técnicas en Ecología Fluvial* (pp. 253-270). Fundación BBVA, Rubes Editorial.
- Roldán-Pérez, G., Ramírez-Ramírez, J.J.** (2022). *Fundamentos de Limnología Neotropical*, 3 edición. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Salles, F., Domínguez, E., Molineri, C., Boldrini, R., Nieto, C., Gomes Dias, L.** (2018). Order Ephemeroptera, Chapter 3. En: Hamada, N., Thorp, J.H., & Rogers, D.C. (eds). *Keys to Neotropical Hexapoda, fourth edition*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804223-6.00003-2>
- Savić, A., Randelović, V., Branković, S., Krpo-Četković, J.** (2011). Mayfly (Insecta: Ephemeroptera) community structure as an indicator of the ecological status of the Nišava river (Central Balkan Peninsula). *Aquatic ecosystem health & management*, 14(3), 276-284. <https://doi.org/10.1080/14634988.2011.602595>
- Scheibler, E.E., Claps, M.C., Roig-Juñent, S.A.** (2014). Temporal and altitudinal variations in benthic macroinvertebrate assemblages in an Andean River basin of Argentina. *J. Limnol.*, 73 (1), 76-92. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2014.789>

- Serna, J.P., Fernández, D., Vélez, F., Ruiz, J., Breckling, B., Aguirre, N.** (2022). Altitudinal distribution of the functional feeding groups of aquatic macroinvertebrates using an ecological network in Andean Streams. *Revista de Biología Tropical*, 70, 82-95. <https://doi.org/10.15517/rbt.v70i0.46904>
- Shimabukuro, E.M., Trivinho-Strixino, S.** (2021). Elevational boundaries influence richness patterns at large spatial scales evinced by malcolous insects of the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Entomology*, 46(5), 1036-1046. <https://doi.org/10.1111/een.13039>
- Shimabukuro, E.M., Gómez-Rodríguez, C., Lamas, C.J.E., Baselga, A.** (2023). Mountain passes are higher at low latitudes for malcolous insect communities of the Neotropical region. *Diversity and Distributions*, 29(9), 1118-1128. <https://doi.org/10.1111/ddi.13747>
- Stevens, G.C.** (1992). The elevational gradient in altitudinal range: an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude. *The American Naturalist*, 140, 893-911.
- Tamaris-Turizo, C.E., Pinilla-A., G.A., González-Trujillo, J.D.** (2023). Diversity of aquatic macroinvertebrates along altitudinal gradients in Colombia, chapter 5. En: Myster, R.W. (ed.). *Neotropical gradients and their analysis*. (pp. 151-164). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22848-3_5
- Tyufekchieva, V., Vidinova, Y., Evtimova, V., Varadinova, E., Botev, I.** (2022). Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera (Insecta) of Mountain Tributaries of the Struma River: Diversity in Relation to Environmental Parameters and Zoogeographic Features. *Acta Zool. Bulg.*, 16, 35-48. http://www.acta-zoologica-bulgarica.eu/2022/Suppl_16_04
- Wantzen, K.M., Rueda-Delgado, G.** (2009). Técnicas de muestreo de macroinvertebrados acuáticos bentónicos, capítulo 1. En: Domínguez, E. & Fernández, H.R. (eds.). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología* (pp. 17-45). Fundación Miguel Lillo.
- Wickham, H.** (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Zúñiga, M.C., Molineri, C., Domínguez, E.** (2004). El Orden Ephemeroptera (Insecta) en Colombia. En: Fernández, F., Andrade, G., Amat, G. (eds.). *Insectos de Colombia*, 3(17-42). Universidad Nacional de Colombia.

Sección especial: los hipopótamos invasores en Colombia

La presencia de numerosos hipopótamos en el medio natural colombiano es inusual y muy controvertida. En la década de 1980, el tristemente célebre narcotraficante Pablo Escobar importó cuatro hipopótamos a su hacienda privada en Puerto Triunfo, Antioquia, como parte de su colección de animales exóticos. Tras su muerte, los hipopótamos quedaron abandonados en la hacienda; con el tiempo y la falta de control, su población comenzó a crecer y a salirse de los predios de la hacienda, estableciéndose en ecosistemas cercanos y expandiéndose por la cuenca del valle Medio del Magdalena. Recientemente los hipopótamos se han catalogado como especie invasora en Colombia, pues se ha encontrado que su creciente población representa graves amenazas para el ecosistema local y la seguridad pública, ya que pueden ser muy agresivos.

Ha habido múltiples esfuerzos para controlar esta población, sin embargo, su manejo sigue siendo un desafío importante para las autoridades colombianas. Por esta razón, los editores de la **Revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** invitaron a una serie de expertos a exponer su visión particular sobre los diferentes aspectos de esta problemática. Dada su experiencia y trayectoria en el tema, invitamos a escribir sus experiencias y reflexiones a expertos de las universidades y los grupos de investigación que han hecho estudios en sus poblaciones (**Jiménez y colaboradores**), aquellos que participaron activamente en el reciente estudio de campo emprendido por el Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Alexander von Humboldt (**Moreno**), a expertos en mastozoología y especies de mamíferos invasoras en el país (**Ramírez-Chaves y colaboradores**), así como a aquellos que han enfrentado directamente el problema en las corporaciones autónomas regionales del área invadida (**Echeverry y Fernández**) y, por último, a quienes desde su visión legal han analizado el escenario jurídico del problema y sus posibles soluciones, incluido el concepto de la justicia de especies (**Doornbos**). En este sentido, cabe resaltar que el asesor jurídico consultado señaló que todavía está pendiente determinar la legalidad de la Resolución No. 0346 de 2022, expedida por el Ministerio de Ambiente, frente a lo dispuesto por el Legislador en la Ley 1774 de 2016, cuya nulidad fue solicitada al Consejo de Estado, pues desconocía la atribución de los hipopótamos a la categoría de “seres sintientes” en oposición al de simples bienes.

Los aportes que aquí aparecen ilustran la complejidad del manejo de estas poblaciones, ya que deben tenerse en cuenta los derechos e intereses de la especie, al tiempo que se protege el medio ambiente y las comunidades humanas. Por ello se insta a encontrar soluciones mixtas de manejo de las poblaciones de hipopótamos que estén muy bien informadas para minimizar su impacto negativo y aprovechar las oportunidades de investigación y educación que ofrecen. Por último, se subraya la necesidad de un enfoque multifacético para su gestión, equilibrando las consideraciones ecológicas, sociales y éticas. Ojalá esta sección aclaratoria del problema de los hipopótamos invasores en Colombia brinde a todos nuestros lectores sustento suficiente para formarse una opinión informada.

✉ **Martha Patricia Ramírez Pinilla**

Escuela de Biología, Universidad Industrial de Santander
Editora Asociada

Breve recuento histórico y una reflexión sobre los hipopótamos del Magdalena Medio colombiano

Brief historical account and a reflection on the hippos in the Colombian Magdalena Medio region

El Magdalena Medio colombiano es una región afectada por importantes procesos de expansión de la frontera agrícola, y especialmente de la ganadera, así como por el desarrollo del turismo alrededor de atracciones como el avistamiento de especies exóticas. Este es el caso del Parque Temático Hacienda Nápoles (corregimiento de Doradal, municipio de Puerto Triunfo, Antioquia), ocupado anteriormente por la denominada hacienda Nápoles, propiedad del barón de la mafia Pablo Escobar. Desde la década de los 80, se introdujeron en ella varias especies de fauna exótica de África y Asia bajo el amparo de la corrupción auspiciada por el capo, quien tenía poder en muchas instancias de decisión del gobierno de la época. Como parte de las introducciones mencionadas llegó un grupo de cuatro hipopótamos, los cuales se integraron a la colección zoológica de fauna exótica más grande del país, alojada en esa hacienda. Durante años esta colección, y la hacienda misma, se convirtieron en sitio obligado de visita de todos aquellos que ansiaban conocer, no solamente a estos magníficos animales, sino también la opulencia y la ostentación con que eran mostrados. Así, el país y la región pasaron a depender mucho de la relación con dichas especies, con lo que se transformó su legado cultural y natural (Rodríguez-Gómez & Jiménez, 2023).

Una vez muere Pablo Escobar y sus propiedades son expropiadas, los animales de la hacienda fueron asignados en custodia a la Dirección Nacional de Estupefacientes. Esta entidad, al no tener competencia técnica para el manejo adecuado de los animales, los entregó en custodia a la autoridad ambiental regional (CORNARE). Algunos de los animales recibidos fueron donados a zoológicos, en tanto que otros permanecieron en la hacienda Nápoles, incluidos los hipopótamos. Progresivamente se fueron haciendo mejoras y adecuaciones a las instalaciones de la hacienda y siguió el proceso de decisión sobre su administración. Pero el tiempo pasó y la población fundadora de hipopótamos no tuvo un manejo adecuado, lo que condujo a que los animales se reprodujeran durante varios años sin control alguno. Sumado a ello, los ejemplares no enfrentaron ninguna presión por la presencia de enfermedades, depredadores o competidores que diezmaran su crecimiento. Desde el punto de vista ecológico, se dieron las condiciones para que la población creciera de manera exponencial hasta el día de hoy (Subalusky *et al.*, 2021). Hoy se ha calculado mediante modelos poblacionales que el número de ejemplares se eleva a 100 o más, todos descendientes de aquella población fundadora de cuatro hipopótamos (Subalusky *et al.*, 2023). Semejante aumento nos enfrenta a un dilema extremo dado el impacto que una población de ese tamaño genera en la fauna y flora de los ecosistemas, así como en los modos de vida y la seguridad de las personas (Subalusky *et al.*, 2021). Al hacer un recuento histórico de la dinámica de los individuos de la especie, desde 2007 se tienen registros de hipopótamos que deambulan por fuera de la hacienda, desplazándose paulatinamente al norte de la cuenca del Magdalena; además, su número sigue aumentando en esa zona tan rica en biodiversidad (Subalusky *et al.*, 2021; Jiménez *et al.*, 2018) (Figura 1).

Estos movimientos se relacionan con la dinámica social de esta especie, cuyos machos jóvenes se desprenden del núcleo o clan familiar y migran con algunas hembras jóvenes a una nueva laguna en donde fundan un nuevo clan. Este comportamiento se encuentra

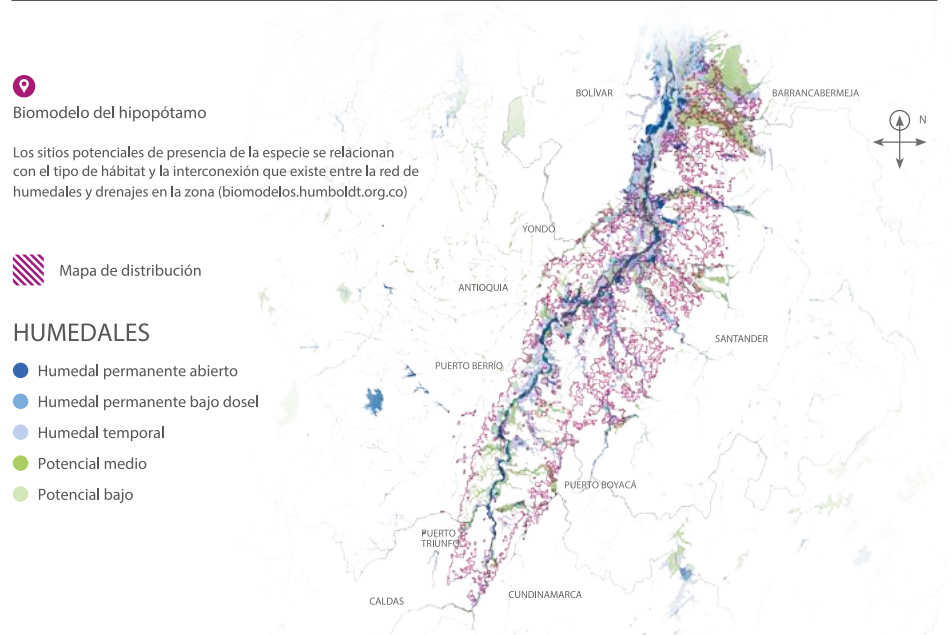
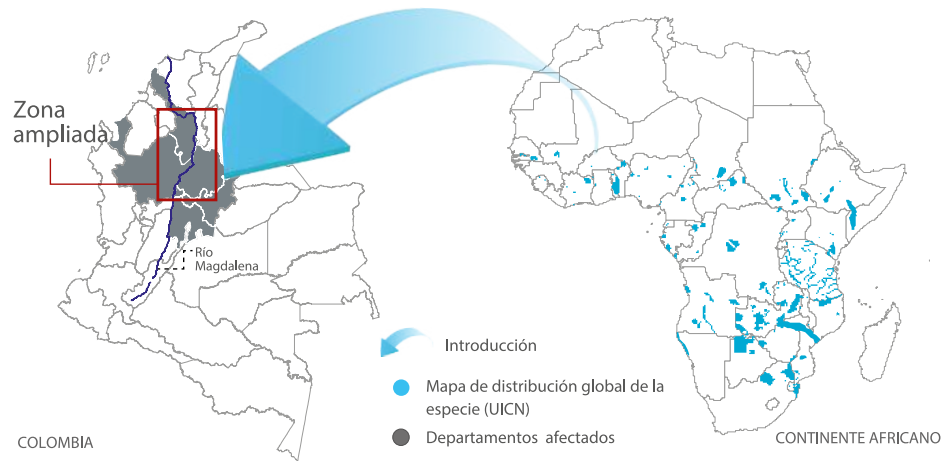


Figura 1. Datos asociados a la presencia histórica y la distribución asociada a los movimientos de hipopótamos en la cuenca media del Magdalena colombiano, 2018. Fuente: **Jiménez et al.** (2018)

anclado a su naturaleza fuertemente territorial, lo que ha llevado a que los animales se acerquen mucho más a las áreas en donde existen asentamientos humanos y es allí donde aumenta la posibilidad de conflictos. Como ejemplo vale mencionar que en el 2007 la comunidad del río San Bartolo (Puerto Berrío) empezó a reportar la presencia de un hipopótamo llamado Pepe, que constituía una amenaza para las personas y el ganado. Como solución, en el 2009, el Ministerio de Medio Ambiente decidió aplicar la medida de caza de control, la cual desencadenó una respuesta negativa por parte de los defensores de los animales por la forma en que se ejecutó, pues no hubo cautela en el manejo del personal vinculado ni de la información. Los defensores de los animales presionaron a un juez que decidió prohibir la caza de hipopótamos en el 2012, situación que afectó la actuación del Ministerio y dividió a la opinión pública alrededor del tema (**Rodríguez-Gómez & Jiménez, 2023**). A dichas corrientes de opinión se sumó la evidencia científica que permitió percatarse del tipo de amenazas que surgen cuando no se hace nada para manejar las invasiones biológicas desde una perspectiva ecológica y socioeconómica.

En primer lugar, desde la perspectiva ecológica, las amenazas identificadas han sido: 1) la ocupación de los espacios (hábitats) de las especies que habitan en el sitio de llegada (especies nativas), en este caso, hay evidencia de la expansión y ocupación de hábitats en el Magdalena medio (Subalusky *et al.*, 2021, Jiménez *et al.*, 2018); 2) el crecimiento exponencial de la especie invasora y su conquista de los hábitats de otras especies; pues los datos demográficos de Colombia y África indican que los ejemplares de la especie aumentan rápidamente (Subalusky *et al.*, 2021, 2023); 3) la modificación física y química de los hábitats de las especies nativas, ya que hay evidencia directa de la alteración provocada en algunos ecosistemas por los cambios en la composición química de los cuerpos de agua asociados con la presencia de los hipopótamos (Shurin *et al.*, 2020), de la compactación física del suelo y la formación de cárcavas en él.

En segundo lugar, desde la perspectiva socioeconómica las amenazas identificadas han sido: 1) las situaciones de estrés y miedo asociados con la presencia de los hipopótamos; integrantes de algunas de las comunidades que habitan en esta cuenca manifiestan que hay miedo por la presencia de la especie, lo que los obliga a modificar sus actividades productivas diarias (Subalusky *et al.*, 2021); 2) los riesgos para la salud de las personas (incapacidad o muerte) por los posibles ataques de los hipopótamos, dada su territorialidad y agresividad; hay evidencia de que los animales han atacado a personas que han quedado incapacitadas o lisiadas física y psicológicamente (The Conversation, 2023); 3) los riesgos para los bienes materiales de las personas que han tenido los encuentros con los animales, pues ha habido daños a bienes en los accidentes que involucran a la especie (The Conversation, 2023).

Estas amenazas propiciaron los esfuerzos que entre el 2016 y el 2022 desplegaron principalmente CORNARE y, en algunos casos, CORANTIOQUIA, para adoptar medidas orientadas al manejo de la especie, así como para advertir a las comunidades sobre su impacto. Entre dichas medidas cabe mencionar la esterilización y la captura y reubicación, las cuales, infortunadamente, entrañan peligro para los equipos de campo, y son costosas y poco efectivas (Subalusky *et al.*, 2023). En consecuencia, y con base en la evidencia científica, hoy el Ministerio de Ambiente cuenta con una propuesta de plan de manejo cuyos objetivos son, de todas maneras, difíciles de alcanzar por las limitaciones de presupuesto y los requerimientos técnicos para abordar el manejo de esta especie.

Ante este complejo escenario, que implica, por un lado, las percepciones, necesidades, esperanzas y demandas de las personas con respecto a esta especie carismática, y, por el otro, la urgente necesidad de conservar la biodiversidad y garantizar el bienestar de las generaciones presentes y futuras, no es posible proponer una solución única. Quizás es hora de que, como sociedad, comprendamos las consecuencias de nuestras acciones sin importar cuán dolorosas y duras sean para algunos. Nadie quiere sacrificar a una especie, porque cada una representa un legado evolutivo de belleza y complejidad. Sin embargo, es imperativo sopesar si se privilegia la conservación de una especie carismática invasora frente a la conservación de la biodiversidad nativa de una región. En nuestro parecer la respuesta es clara: en principio debemos privilegiar a nuestras especies nativas. Representan el capital natural que es el resultado de los procesos ecosistémicos que nos brindan bienes y servicios. Las decisiones sobre las estrategias de gestión de especies invasoras pueden ser extremadamente difíciles y costosas, así que si queremos alcanzar un equilibrio, las partes interesadas deberán desplegar enormes esfuerzos.

En este contexto, se recomienda la adopción de decisiones de gestión en las primeras etapas de la invasión, porque el tiempo, las responsabilidades y la búsqueda de fondos son cruciales. Asimismo, debe prestarse especial atención a las percepciones y las relaciones con los hipopótamos de quienes habitan en la cuenca del Magdalena, así como de los grupos animalistas que protegen la vida de esta especie, tratando de evitar enfrentamientos e invitándolos a ser parte de las alternativas de solución. Debemos entender todos que en algunos casos medidas como la esterilización química o la reubicación podrían aplicarse, pero en los casos en los que los animales se han diseminado por un extenso territorio más allá del Parque Nápoles, donde no hay fronteras que limiten el movimiento y la expansión,

se deben considerar otras opciones para el efectivo de control de esta población. Estas recomendaciones deberán considerarse seria y juiciosamente en futuros procesos de investigación en el marco de una visión socio-ecosistémica, dadas las posibilidades de aumento de los riesgos para los ecosistemas y las personas y sus bienes. Cualquiera que sea el destino que consideremos posible para estos animales, es esencial que no permanezcan en la cuenca si queremos proteger nuestra biodiversidad y con ella la base para el sustento y el bienestar de las comunidades del río Magdalena y de todos los colombianos. De otra forma, tendremos que aprender a convivir con ellos, asumiendo los riesgos de su presencia en nuestro país.

Germán Jiménez¹, David Santamaría-Castiblanco², Amanda Subalusky³, Elizabeth Anderson²

¹ Departamento de Biología, Unidad de Ecología y Sistemática UNESIS, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

² Department of Earth and Environment and Institute of Environment, Florida International University, Miami, FL, USA

³ Department of Biology, University of Florida, Gainesville, FL, USA.

Referencias

- Jiménez, G., Echeverri, D., Baptiste, M.P., Isaacs-Cubides, P., García L., Noguera-Urbano, L.M., Velásquez-Tibatá, E.A., Moreno-Escobar, J.W.F.** (2018). Hipopótamos en Colombia: El proceso de invasión, avances desde la investigación y necesidades de gestión. En: Moreno, L. A, Andrade, G. I. y Gómez, M.F. (Eds.). *Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. p. 21. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <https://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2018/cap2/205/#seccion8>
- Rodríguez-Gómez, S. & Jiménez, G.** (2023). Animalista, Narco-Cultural, Conservacionista. Visions of Nature Around the Case of Hippos in Colombia. *Biosemitotics*, 16, 457-478. <https://doi.org/10.1007/s12304-023-09541-y>
- Shurin, J. B., Aranguren-Riaño, N., Duque-Negro, D., Echeverri-López, D., Jones, N. T., Laverde-R O., Neu, A., Pedroza-Ramos, A.** (2020). Ecosystem effects of the world's largest invasive animal. *Ecology*, e02991. <https://doi.org/10.1002/ecy.2991>
- Subalusky A., Anderson E.P., Jiménez G., Post D., Echeverri-López D, García S, Nova-León L.J., Reátiga-Parrish J.F., Rojas A., Solari S., Jiménez-Segura L.F.** (2021). Potential ecological and socio-economic effects of a novel megaherbivore introduction: The hippopotamus in Colombia. *Oryx*, 55(1), 105-113. <https://doi.org/10.1017/S0030605318001588>
- Subalusky, A.L., Sethi, S.A., Anderson, E.P., Jiménez, G., Echeverri-López, D., García-Restrepo, S., Nova-León, L.J., Reátiga-Parrish, J.F., Post, D.M., Rojas, A.** (2023). Rapid population growth and high management costs have created a narrow window for control of introduced hippos in Colombia. *Nature Scientific Reports*, 13, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33028-y>
- The Conversation.** (2023). Los “hipopótamos de la coca” de Pablo Escobar son un problema para Colombia. <https://theconversation.com/los-hipopotamos-de-la-coca-de-pablo-escobar-son-un-problema-para-colombia-204127>

Opinión

Reflexiones sobre el manejo de la invasión de hipopótamos en Colombia: deber, virtud y consecuencias

Reflections on the management of the hippos invasion in Colombia: Duty, virtue, and consequences

Hoy se reconoce que las invasiones biológicas son uno de los motores indirectos de la pérdida de biodiversidad y una de las mayores amenazas para los beneficios que la naturaleza brinda a las personas (Roy *et al.*, 2023). Esa pérdida ocasiona, además de la potencial extinción de poblaciones de organismos nativos, cambios drásticos en el equilibrio de las redes ecológicas que la coexistencia de los organismos permite a escala temporal, ecológica y evolutiva. Hay múltiples ejemplos de animales responsables de tales cambios en la base de datos global de especies invasoras (ISSG, 2024), entre ellos, herbívoros como las cabras en las islas Galápagos y los camellos en Australia, que han transformado las coberturas vegetales, afectando negativamente a los herbívoros nativos; los depredadores, como la rana toro en Colombia, que compiten ferozmente con las especies nativas, y otros organismos que han extinguido poblaciones enteras, como lo hizo la serpiente arborícola café con las aves en la isla de Guam. Hay otros invasores que afectan la salud de los animales nativos, pues son vectores de enfermedades que de otra forma no los contagiarían (Ellwanger & Bogo-Chies, 2019).

Uno de los efectos negativos de dichas invasiones en la integridad y estabilidad ecosistémicas es el cambio en el acceso a los servicios de la naturaleza, lo que afecta principalmente a las comunidades humanas más empobrecidas. Ese es el caso de los hipopótamos invasores en Colombia, los cuales, además de afectar negativamente los ecosistemas acuáticos y sus especies, han generado áreas vedadas para quienes viven de la pesca, limitando su libre movilidad a los periodos en los que estos animales son menos activos (Figura 1). Asimismo, han ocasionado graves accidentes de tránsito (El Espectador, 2023) y atacado brutalmente a algunas personas (El Tiempo, 2020). Los efectos positivos de los hipopótamos son apenas evidentes y solamente benefician a una pequeña porción de personas que tienen las capacidades económicas y la infraestructura para aprovechar la invasión haciendo recorridos fluviales de observación de los animales. En conclusión, esta especie invasora tiene efectos negativos para muchos y positivos para muy pocos.



Figura 1. Carteles de advertencia sobre la presencia de hipopótamos en los municipios de Puerto Nare y Puerto Triunfo en Antioquia que evidencian las limitaciones a las que están sometidas las personas por su presencia en la zona

Dicha asimetría se refleja en las diversas visiones sobre el manejo (control letal) de la invasión, exacerbando las diferencias entre urbanitas y campesinos, privilegiados y no privilegiados y entre quienes no conviven con el problema y los que sí. Esos grupos, dependiendo de sus necesidades más apremiantes, se adhieren a posiciones éticas normativas en las que priman los deberes, las virtudes o las consecuencias, posiciones que generan comportamientos discriminatorios de unos frente a otros. Un ejemplo desafortunado de esta circunstancia son los continuos ataques que reciben en las redes sociales los defensores de los ecosistemas y de los medios de subsistencia de las comunidades por parte de quienes defienden a los hipopótamos o los que se lucran de ellos. Otro ejemplo es la acción popular No. 11001032400020220023600, que busca la nulidad de la declaratoria de los hipopótamos como especie invasora, aduciendo que la sintiencia de los hipopótamos debe prevalecer frente a los intereses de las personas y los ecosistemas. Lo anterior evidencia por un lado un comportamiento excluyente de parte de los que sostienen que el único sujeto de consideración moral dentro del manejo de la invasión debe ser el hipopótamo por su condición sintiencia y por otro lado un comportamiento integrador expresado por los que argumentan que la ponderación de los intereses de todos los afectados (ecosistemas, especies nativas, interacciones ecológicas, humanos e hipopótamos) es la manera más ética de enfrentar la problemática de la invasión.

La organización de la vida en la tierra es como una matrioska: la muñeca más pequeña representa a los individuos y sus genes; la intermedia, a las poblaciones y las comunidades, y la más grande, a los ecosistemas. Pero a diferencia de la matrioska, cuyas muñecas lucen todas igual, cada nivel de organización de la vida exhibe diferentes atributos y tiene propiedades intrínsecas y emergentes. Las invasiones biológicas afectan todos estos niveles, porque ocurren dentro de la matrioska más grande y afectan a todas las del interior, así como a sus atributos y propiedades intrínsecas y emergentes.

Las valoraciones morales basadas en un solo atributo son absolutamente ineficientes para abordar el problema de las invasiones biológicas. Un enfoque basado en atributos individuales, como la sintiencia (**Singer**, 1990), o los requerimientos para lograr una vida próspera (**Nussbaum**, 2006), discrimina negativamente a los otros niveles de organización de la vida y es improcedente para trazar una ruta en el manejo de problemas complejos como las invasiones biológicas, cuyas consecuencias se extienden más allá de los individuos y, por lo tanto, son incompatibles en términos de ética aplicada con el manejo de las invasiones biológicas mediante control letal.

Las consideraciones morales basadas exclusivamente en el individuo se contraponen al manejo de las invasiones porque, al basarse en atributos de un solo nivel, nos someten a dilemas éticos por la omisión de los otros niveles de organización, los cuales merecen una valoración moral ajustada a sus atributos particulares. Esos dilemas son una camisa de fuerza que nos atrapa en ciclos deontológicos, dadas las consecuencias que tendría la discriminación de un nivel de organización frente a otro, cuando ambos son susceptibles de valoración moral, y en ciclos de virtud y no virtud, pues no es posible afirmar que es más virtuoso valorar moralmente un nivel de organización que otro. Recientemente **Bobier & Allen** (2022) explicaban que, incluso bajo posturas individualistas basadas en el deber o la virtud, existen principios (p. ej., el principio del más perjudicado) que permitirían la implementación del control letal de las invasiones biológicas.

Las aproximaciones que permiten la ponderación y se enmarcan en una ética de la biodiversidad desde la perspectiva aplicada son las que normalmente se acogen en la biología de la conservación (**Sarkar**, 2005). Tal postura ética de la biodiversidad es superior a las mencionadas para el manejo de las invasiones biológicas porque evita dilemas éticos al ponderar simultáneamente los intereses de todos los aspectos del problema en aras de alcanzar una decisión más adecuada a la organización jerárquica de la biodiversidad. Como cualquier otra postura, la ética de la biodiversidad no está exenta de discriminación negativa, por lo que su justificación se basa en el elemento que sufre las mayores consecuencias comparadas con las del resto. Se rompe, así, la camisa de fuerza porque no se omiten deliberadamente los intereses de los discriminados.

Aunque la ética ecosistémica es superior, no es la panacea para manejar éticamente el problema de las invasiones biológicas, ya que los problemas complejos no se solucionan con única herramienta. Si bien una postura ecosistémica permite abordar los problemas entre elementos, es insuficiente para aproximarse a los que surgen dentro de cada elemento. Por ejemplo, la única vía para garantizar el mejor control letal, el mejor procedimiento de esterilización y las mejores condiciones de cautiverio de los hipopótamos, es adoptar una postura que vele por los intereses de los individuos, es decir, los atributos de sintiencia, bienestar, intereses o capacidades deberían ser de consideración obligatoria en dichas valoraciones. Incluso es necesaria la postura antropocéntrica para garantizar la mejor forma de restaurar las libertades y los medios de subsistencia de las personas afectadas por los hipopótamos.

El manejo ético de las invasiones no debe abordarse desde posturas éticas individuales porque ni la sintiencia permite considerar moralmente un ecosistema, ni la productividad primaria permite considerar moralmente el sufrimiento de un hipopótamo o las necesidades vitales de un grupo particular de personas. Así, el manejo debe hacerse con una aproximación sinérgica entre las diferentes éticas. Las consecuencias que genera el rápido crecimiento de la población de hipopótamos sobre el ambiente y las personas obligan a incluir el control letal. Naturalmente, la compasión es una virtud que obliga a que haya más medidas además del control letal. Evitar el sufrimiento es un deber a la hora de los confinamientos y las translocaciones, pero restaurar los medios de subsistencia de las personas y mantener un ambiente sano son deberes constitucionales.

● **Rafael Moreno-Arias**

Grupo de morfología y ecología evolutiva, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
rafamorearias@gmail.com

Referencias

- Bobier, C. A. & Allen, B.L.** (2022). Compassionate conservation is indistinguishable from traditional forms of conservation in practice. *Frontier in Psychology, 13*, 750313. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.750313>
- El Espectador.** (2023). Hipopótamo causa otro accidente en Puerto Triunfo, Antioquia. <https://www.elespectador.com/ambiente/hipopotamo-murio-tras-chocar-con-un-carro-en-puerto-triunfo-antioquia-noticias-hoy/>
- El Tiempo.** (2020). Enorme hipopótamo atacó a un campesino en Puerto Triunfo. <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/enorme-hipopotamo-ataco-a-un-campesino-en-puerto-triunfo-494412>
- Ellwanger, J. H. & Bogo Chies, J.A.** (2019). The triad “dogs, conservation and zoonotic diseases” – An old and still neglected problem in Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation, 17*(3), 157-161.
- Invasive Species Specialist Group - ISSG.** (2024). Global Invasive Species Database. <https://www.iucngisd.org/gisd/>
- Nussbaum, M.** (2006). The Moral Status of Animals. *The chronical of higher education, 52*(22), 6-8. <https://www.chronicle.com/article/the-moral-status-of-animals/>
- Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P., Renard T, T., Lipinskaya, T., Vicente, J. R.** (2023). Chapter 1: Introducing biological invasions and the IPBES thematic assessment of invasive alien species and their control. En Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P., and Renard Truong, T. (Eds.), *Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. (5 -69). IPBES secretariat. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7430723>
- Sarkar, S.** (2005). *Biodiversity and Environmental Philosophy: An Introduction*. Cambridge University Press.
- Singer, P.** (1990). *Animal Liberation*. Random House.

Opinión

Los hipopótamos introducidos en Colombia: una oportunidad para los estudios biológicos y la educación ambiental

Introduced hippos in Colombia: a chance for biological studies and environmental education

Los hipopótamos (*Hippopotamus amphibius*) introducidos en la cuenca interandina del río Magdalena representan un gran problema para la salud de los ecosistemas de Colombia, sus componentes bióticos y el bienestar de varias comunidades humanas. Diversos trabajos han descrito los riesgos potenciales de la introducción de esta especie de gran tamaño (Castelblanco-Martínez *et al.*, 2021) y el manejo inadecuado de las poblaciones establecidas, lo que ha conllevado a un incremento preocupante del número de individuos asilvestrados en la geografía nacional y de los costos requeridos para su control (Subaluský *et al.*, 2023). Aunque expertos y animalistas han hecho varias propuestas de manejo de estas poblaciones exóticas en los medios nacionales de opinión, aún no es claro cuál será el proceder para controlar o erradicar los problemas asociados con su presencia en la región transandina de Colombia.

El sector animalista juzga los procedimientos que implican el sacrificio de los hipopótamos como «antropocéntricos», aduciendo que es un problema generado por humanos, pero que son los hipopótamos los que asumen el costo. En realidad, considerando no sólo el bienestar de los hipopótamos, sino de todos los animales y ecosistemas afectados, la cacería de control es el procedimiento más «hipopotamocéntrico». Es claro, y todas las partes razonablemente documentadas están de acuerdo, que debe aplicarse una estrategia mixta de control para extraer todos los individuos de la especie de las áreas silvestres que están ocupando. La cacería de control a cargo de profesionales debidamente entrenados y que empleen material de un calibre adecuado, resultaría en la desensibilización inmediata del individuo, sin causarle estrés ni sufrimiento. Por otro lado, las estrategias basadas en traslocaciones o esterilizaciones implican procedimientos altamente estresantes para un animal silvestre, entre ellos, la persecución, la restricción química y física, el confinamiento y el transporte, lo que, en ocasiones, puede llegar a ocasionar afecciones mortales (p. ej., la miopatía de captura), además de las fases posquirúrgicas cuando estas se requieren. Por lo tanto, tales estrategias deben considerarse para el control de una proporción mínima de individuos. En ese sentido, el promover estas opciones como alternativa «humanitaria» es simplemente un acto egoísta, que pretende absolver o liberar de culpa a quienes la defienden por ser parte de la sociedad que permitió esta situación, privilegiando sus emociones frente al bienestar animal y de los ecosistemas afectados por la presencia de las especies introducidas.

Si se acepta que la estrategia más oportuna para contrarrestar la invasión biológica de esta especie, es la cacería de control, deben propiciarse las oportunidades de aprendizaje que brinda dicha situación. En este orden de ideas, debe quedar claro lo que se hará con los hipopótamos sacrificados, ya que la información que se obtenga de estos individuos es clave para avanzar en el conocimiento de los riesgos del establecimiento de especies exóticas invasoras.

Por ello, esta reflexión, elaborada a partir de conversaciones con colegas de diversas áreas de la biología, pretende señalar alternativas para el aprovechamiento de los individuos de hipopótamos sacrificados. Entre estas destacamos las encaminadas a generar educación ambiental y proveer datos sistemáticos sobre la carga parasitaria, la genética de poblaciones y los patógenos asociados a los hipopótamos.

La educación ambiental

Como se sabe, el estudio de la diversidad biológica de un área determinada, o de un grupo de especies con características puntuales, ha sido clave para la apropiación social del conocimiento sobre los recursos naturales. Es así como los hipopótamos sacrificados pueden contribuir a ampliar las exhibiciones de los museos de historia natural del país. Para ello, pueden emplearse técnicas de taxidermia y de montaje de esqueletos para los fines divulgativos propios de los museos de historia natural. Por otra parte, las partes de los individuos sacrificados (cráneos, esqueletos parciales o totales, muestras de tejidos) pueden entregarse a colecciones biológicas reconocidas para ser empleados en cursos de zoología, anatomía comparada, o análisis de genética de poblaciones.

Implicaciones sociales de la introducción de especies

Las poblaciones humanas cercanas a los sitios de establecimiento de los individuos invasores podrían cambiar las dinámicas sociales asociadas a los hipopótamos una vez estos sean erradicados. Por ello, sería deseable documentar desde la perspectiva de las ciencias sociales las modificaciones en la percepción que los locales tienen de las especies nativas (especialmente de los grandes mamíferos silvestres) y de los impactos de la presencia de especies exóticas en los ecosistemas naturales.

Genética de poblaciones y evolución

La toma de muestras de tejidos de cada órgano y la perfecta conservación de los individuos sacrificados son claves para evaluar la dinámica poblacional desde un punto de vista genético. La información genética de estos individuos puede usarse, por ejemplo, para evaluar cuellos de botella poblacionales y, así, informarnos sobre cómo una población puede sobrevivir después de una reducción poblacional y genética drástica (**Frankham *et al.*, 2002**). Esta información puede ser clave para la conservación de otras especies de grandes mamíferos silvestres que experimentan una problemática similar actualmente. Además, permitirá evaluar qué tan genéticamente heterogéneas son las poblaciones de los individuos introducidos, evaluar posibles relaciones de parentesco, generar información sobre las regiones del genoma de mamíferos más propensas a la recombinación, si existe evidencia de adaptaciones genéticas y evaluar la presencia de desórdenes genéticos debidos a la alta endogamia.

Estudios sobre patógenos y enfermedades

Al estar en contacto con el medio natural, los hipopótamos están expuestos y exponen a otras especies nativas a ectoparásitos y endoparásitos. La evaluación de estos parásitos en los individuos sacrificados puede respondernos varias preguntas. Por una parte, es posible analizar las especies de los parásitos y de los patógenos de los hipopótamos que no representan linajes neotropicales y conocer su potencial invasor en la región neotropical. Esta información permitiría generar estrategias de manejo enfocadas en la protección de especies nativas. Asimismo, es posible hacerse una idea de las especies nativas de parásitos que se hayan asociado con estos mamíferos exóticos. Así, podría evaluarse el papel de los hipopótamos en las redes de interacción de estos parásitos y la posible afectación de los mamíferos nativos. Por otra parte, se pueden describir y contrastar las enfermedades adquiridas por los hipopótamos introducidos con documentos similares elaborados para poblaciones nativas (**Cowan *et al.*, 1967**).

Estudios sobre microbiomas no patógenos

Mediante el estudio de los microbiomas de los hipopótamos se podrían determinar las diferencias de estas comunidades con respecto a las observadas en los hipopótamos nativos, lo que permitiría establecer qué tipo de adaptaciones a escala de microbioma les permiten a los individuos invasores sobrevivir con una dieta compuesta de especies neotropicales. Además, es posible evaluar si el microbioma intestinal liberado por los hipopótamos altera

los procesos biogeoquímicos mediados por microbios, los cuales pueden afectar a otras especies, como ya se ha sugerido en estudios previos (Dutton *et al.*, 2021). Por último, podría compararse el microbioma de especies nativas que tienen similitud ecológica con los hipopótamos invasores (p. ej., manatíes, tapires), o cercanía filogenética (p. ej., especies de artiodáctilos), para evaluar si la ecología o la filogenia influyen en la estructura taxonómica de los microbiomas.

En resumen, debe hacerse un uso integrativo de la información que pueda obtenerse de los hipopótamos sacrificados para avanzar en el conocimiento de los riesgos de las invasiones biológicas de especies de gran talla en los ecosistemas. Dicha información es clave en la conservación, los estudios evolutivos, y el manejo del transporte de individuos destinados al cautiverio u otro tipo de aprovechamiento. Agradecemos a todos los investigadores en Colombia que han contribuido con ideas relevantes para la mitigación de los problemas derivados de la introducción de especies exóticas e invitamos a los expertos nacionales e internacionales a ampliar este ensayo para consolidar las oportunidades de investigación asociadas al sacrificio de los hipopótamos exóticos invasores.

• Héctor E. Ramírez-Chaves^{1,*}, • Néstor Roncancio-Duque²,
• Darwin M. Morales-Martínez³

¹ Grupo de Investigación en Genética, Biodiversidad y Manejo de Ecosistemas (GEBIOME), Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas; Centro de Museos, Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

² Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, Colombia

³ Museum of Natural Science and Department of Biological Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA.

* hector.ramirez@ucaldas.edu.co

Referencias

- Castelblanco-Martínez, D.N., Moreno-Arias, R.A., Velasco, J.A., Moreno-Bernal, J.W., Restrepo, S., Noguera-Urbano, E.A., Baptiste, M.P., García-Loaiza, L.M., Jiménez, G. (2021). A hippo in the room: Predicting the persistence and dispersion of an invasive megavertebrate in Colombia, South America. *Biological Conservation*, 253, 108923. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108923>
- Cowan, D.F., Thurlbeck, W.M., Laws, R.M. (1967). Some Diseases of the *Hippopotamus* in Uganda. *Veterinary Pathology*, 4, 553-567. <https://doi.org/10.1177/030098586700400604>
- Dutton, C.L., Subalusky, A.L., Sanchez, A., Estrela, S., Lu, N., Hamilton, S.K., Njoroge, L., Rosi, E.J., Post, D.M. (2021). The meta-gut: community coalescence of animal gut and environmental microbiomes. *Scientific Reports*, 11(1), 23117. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02349-1>
- Frankham, R., Ballou, J.D., Briscoe, D.A. (2002). *Introduction to Conservation Genetics*. Cambridge University Press.
- Subalusky, A.L., Sethi, S.A., Anderson, E.P., Jiménez, G., Echeverri-López, D., García-Restrepo, S., Nova-León, L.J., Reátiga-Parrish, J.F., Post, D.M., Rojas, A. (2023). Rapid population growth and high management costs have created a narrow window for control of introduced hippos in Colombia. *Scientific Reports*, 13(1), 6193. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33028-y>

Opinión

Acciones de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare para atender la problemática de los hipopótamos invasores en Colombia

Actions undertaken by the Autonomous Negro and Nare Rivers Basin Regional Corporation (Cornare) to address the problem of invasive hippos in Colombia

La presencia de hipopótamos en Colombia, introducidos originalmente por el narcotraficante Pablo Escobar Gaviria en la década de 1980, ha generado una seria problemática ambiental en la región del Magdalena Medio y un reto sin precedentes para la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare), pues en su jurisdicción se ubica la Hacienda Nápoles, otrora propiedad de Escobar, donde habitan estos ejemplares. Sin contar con suficiente información científica y con poco o ningún acompañamiento de otros sectores del país, Cornare ha tenido que recurrir a los recursos disponibles y ensayar procedimientos para enfrentar el problema, implementando diversas estrategias de control y mitigación del impacto de esta especie invasora, hecho que desde el 2009 se establecía claramente en los primeros documentos enviados al entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible (Cornare, 2009).

El hipopótamo común (*Hippopotamus amphibius*) es un mamífero artiodáctilo con cuerpo muy grande y robusto, similar a un barril. Tiene cuatro patas muy cortas, con cuatro dedos bien desarrollados terminados en pezuña. Su cabeza y su boca son grandes y anchas, con colmillos de gran tamaño. Posee piel lisa de color café a rojizo (Medellín *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2010), pesa entre 1,5 y 4,5 toneladas y mide de 3,3 a 5,2 m de largo y 56 cm a 1,5 m de altura, aproximadamente (Eltringham, 1999). El hipopótamo común es nativo del África subsahariana, donde habita en una amplia gama de ecosistemas de humedales y sabanas adyacentes a ríos. Pasa el día refugiado en el agua y sale en la noche para alimentarse de plantas en los pastizales aledaños (Medellín *et al.*, 2005; Lewison & Pluháček, 2017).

El equipo técnico de Cornare ha requerido tiempo, estudio y ensayos de prueba y error para entender las dimensiones de la problemática que representa la presencia de esta especie, así como un seguimiento de más de 15 años al comportamiento de los hipopótamos que hoy configuran varios grupos poblacionales. Asimismo, ha representado apreciables esfuerzos técnicos, financieros y logísticos, aunque también algunas oportunidades de gestión conjunta con entidades universitarias de otros países, y de acciones encaminadas a encontrar soluciones integrales. Porque si algo hemos entendido, es que se trata de un tema complejo: primero, la comunidad tiene una percepción muy positiva de la especie; segundo, muchas veces el oportunismo político trata de aprovechar con fines no muy claros el atractivo que los hipopótamos tienen para los medios de comunicación, y tercero, las dificultades inherentes al manejo de una especie como *H. amphibius* (Cornare, 2024).

A continuación, se hace un análisis exhaustivo de las acciones que ha emprendido Cornare para abordar esta problemática.

Captura de hipopótamos

La primera cirugía de hipopótamos se realizó en el 2011 a un macho que se encontraba en la hacienda Siberia, en zona rural de municipio de Puerto Triunfo, Antioquia. Se hizo a campo abierto, con un equipo de cerca de 20 personas, y se tuvo que esperar más de

dos (2) meses por las dificultades para capturar al hipopótamo en una zona abierta con pequeños jagüeyes que servían como resguardo del hipopótamo y los costos se elevaron a los 100 millones de pesos colombianos; además, fueron necesarias acciones de seguimiento muy peligrosas para el personal. Todo ello nos llevó a la conclusión de que este tipo de metodología no se puede emplear para los procesos de esterilización y, en ese sentido, Cornare no la recomienda (Subalusky *et al.*, 2023).

Animados por el propósito de seguir avanzando en la búsqueda de posibles soluciones a la problemática de la presencia de poblaciones de hipopótamos en estado silvestre en nuestra área de acción, Cornare continuó investigando sobre el comportamiento de la especie y la posibilidad de un proceso de encierro o captura que no requiriera tanto esfuerzo logístico y disminuyera los riesgos para el personal y los animales (Figura 1). Comenzamos, así, a ensayar barreras de confinamiento de los ejemplares con diferentes estructuras: cerca eléctrica, tela de sarán y caliza fracturada (rajón de mármol). Los mejores resultados se obtuvieron con las calizas fracturadas dispersas en el suelo y la tela de sarán elaborada en polietileno de alta densidad, pues los hipopótamos no pasaban por encima de la caliza y, al encontrarse con la tela, se detenían. En el 2014 se inició también la siembra de cercos vivos con el llamado limón swingle (*Swinglea glutinosa*) (Figuras S1 a S3, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2668/4020>).

Asimismo, se hizo un primer ensayo de construcción de un corral de manejo en un predio de propiedad del municipio de Puerto Triunfo, colindante con el parque temático Hacienda Nápoles (Cornare, 2015). La evaluación del comportamiento de los hipopótamos evidenció la funcionalidad del corral, puesto que los animales ingresaron en él a comer la zanahoria que se dispuso a modo de cebo. Sin embargo, al sentirse encerrados, destrozaron el corral, que en esta primera versión estaba hecho de madera y tenía una altura que no garantizaba el encierro efectivo de los hipopótamos. El corral, no obstante, fue el punto de partida de nuevas soluciones posibles del problema, ya que, encerrados de esta manera, se podían hacer las cirugías y reubicar los hipopótamos en sitios que contaran con las garantías legales y de hábitat para albergarlos.

Los ensayos de confinamiento han servido para evitar que los hipopótamos sigan acercándose a la zona urbana de Doradal; sin embargo, para una contención definitiva se requiere la instalación de un cerco adicional y para ello no se cuenta con los recursos económicos. Además, el cuidado de los hipopótamos en términos de alimentación permanente y manejo tendría que asumirlo alguna entidad que garantice el bienestar de los hipopótamos, por lo que un confinamiento definitivo no es viable en estos momentos (Cornare, 2023).



Figura 1. Ejemplares capturados en el 2024 en la zona de manejo del corral actual

Actualmente se cuenta con una zona de manejo bastante estructurada, constituida por tres corrales de confinamiento temporal de los individuos antes de la esterilización quirúrgica. Es importante resaltar que el corral garantiza los requerimientos básicos de agua, sombra, alimento y movimiento de los hipopótamos y que constantemente se hacen procesos de cebsa para que continúen ingresando a la zona de manejo.

Esterilización quirúrgica

Una de las primeras medidas adoptadas por Cornare fue la esterilización quirúrgica de algunos de los hipopótamos, sobre todo aquellos que se encontraban aislados de los grupos poblacionales ya establecidos. Cuando se constató que el corral y el método de cebsa y captura de los hipopótamos funcionaban, volvieron a ser posibles las cirugías de esterilización, ya que los animales estaban en un espacio seguro para ellos y para el personal técnico a cargo. Sin embargo, este procedimiento sigue siendo complejo, costoso, peligroso e impredecible en términos del tiempo requerido para la captura de los hipopótamos debido a su comportamiento. Además, el costo de una cirugía de hipopótamo es de 30 millones de pesos colombianos aproximadamente (Cornare, 2023).

En Cornare, a la fecha (2024), se han realizado 25 cirugías de esterilización de hipopótamos, 13 cirugías mediante diferentes procesos de gestión, con la participación de la Universidad CES, la Universidad Nacional de Colombia, Organizaciones No Gubernamentales - ONGs, Corporaciones Autónomas Regionales como Corantioquia y el Área metropolitana del Valle del Aburrá. Las otras 12 han sido realizadas directamente por el equipo de veterinarios de Cornare, con financiamiento del convenio 907 2023, suscrito entre Cornare, la Gobernación de Antioquia y el Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible – Minambiente (**Figuras S4 a S7**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2668/4020>).

La esterilización quirúrgica por sí sola no soluciona de fondo este problema, ya que su objetivo es, exclusivamente, contener el crecimiento poblacional descontrolado de los hipopótamos y con ello evitar nuevas migraciones de pequeños grupos o de hipopótamos aislados, especialmente machos, porque la movilización de individuos dentro de las poblaciones influye directamente en la densidad local y en las subpoblaciones (Smith & Smith, 2007). No obstante, ha sido un paso importante para reducir la tasa de reproducción de la especie.

La aplicación de esta medida de control poblacional ha evidenciado algunos contratiempos debidos a la falta de información sobre la particular anatomía de esta especie, ya que la esterilización de las hembras es considerablemente más complicada que la de los machos (Cornare, 2023).

Reubicación de hipopótamos en zoológicos

El confinamiento de los hipopótamos en el corral y el método de cebsa y captura también han hecho posible la reubicación de individuos en zoológicos colombianos que los incluyen en sus planes de colección y cuentan con la licencia de funcionamiento y los hábitats disponibles para recibirlos. En esta línea de acción se han capturado siete hipopótamos y se los ha reubicado (**Figuras S8 y S9**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2668/4020>) en los siguientes zoológicos nacionales:

- Parque zoológico Jaime Duque (un hipopótamo macho sin esterilizar)
- Zoológico Santa Cruz (un hipopótamo macho sin esterilizar)
- Zooparque los Caimanes (una hipopótamo hembra esterilizada)
- Bioparque Zoológico Ukumari (dos hipopótamos machos sin esterilizar)
- Zoológico Parque Temático Hacienda Nápoles (dos hipopótamos machos, uno de ellos esterilizado).

Inmunización con la vacuna GnRH

En Cornare también se ha implementado una prueba piloto de inmunización con la vacuna GnRH, donada por el servicio USDA Aphis del gobierno de Estados Unidos. Este método, nunca antes probado en hipopótamos, busca reducir la fertilidad con el producto administrado mediante dardos. Aunque se han presentado serios inconvenientes en la aplicación del marcaje de hipopótamos, en Cornare seguimos explorando su potencial como parte de una estrategia multifacética para estabilizar la población de hipopótamos (**Figuras S10 y S11**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2668/4020>).

Uso de telemetría para el seguimiento de los hipopótamos

Se ha recurrido a la telemetría para comprender mejor los movimientos y hábitos de los hipopótamos. Se han instalado equipos de seguimiento en algunos hipopótamos para monitorizar sus desplazamientos y actividades en tiempo real. Esta información serviría para identificar las áreas más afectadas y planificar intervenciones más efectivas; además, los datos recopilados ayudan a evaluar los impactos ambientales causados por estos animales.

Es fundamental conocer la forma en la que se desplazan los individuos dentro de los ecosistemas para comprender cómo usan los recursos, cuáles son las áreas de ocupación potencial, las rutas de desplazamiento y cómo se dan los movimientos dentro de las subpoblaciones, pues estos pueden generar una expansión dispersa de la zona actual con presencia de la especie (**Smith & Smith, 2007**), lo que es de especial importancia tratándose de una especie exótica invasora. Debe señalarse que la tecnología, el diseño y el desarrollo de los equipos de telemetría son colombianos y su elaboración estuvo a cargo del equipo de Cornare, de expertos en inteligencia artificial de la Universidad Javeriana y del Serpentario Nacional de Colombia (**Figura S12**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2668/4020>) (**Cornare, 2022**).

El seguimiento con este equipo se llevó a cabo a lo largo de tres días y los reportes de posición geográfica se emitieron cada 10 minutos, con fecha, hora, coordenadas, velocidad entre puntos, dirección del movimiento, carga de la batería y eficiencia del panel solar; sin embargo, pasados los tres días el hipopótamo perdió el dispositivo, al parecer debido al contacto con otros individuos (**Figura S13**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2668/4020>).

Declaración de especie invasora

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible declaró oficialmente a *Hippopotamus amphibius* como una especie exótica invasora en el territorio colombiano mediante la resolución 0346 del 24 de marzo de 2022. Esta incorporación en el listado de especies invasoras en el país ha permitido al Ministerio justificar y estudiar las medidas de manejo que deberán implementarse; asimismo, a partir de la experiencia de Cornare, el Ministerio podrá reforzar las acciones, priorizar algunas y continuar otras, así como adoptar algunas más drásticas y complejas como la caza controlada.

Este gran paso fue posible teniendo como antecedente principal la experiencia de más de 10 años de Cornare en el manejo de la especie y su comportamiento como potencial invasor, así como algunos estudios científicos que respaldan claramente la declaración debido al comportamiento, desarrollo y establecimiento exitoso de la especie en el país. La declaración también ha facilitado la colaboración internacional y el acceso a recursos adicionales para gestionar la crisis, ya que se han recibido ofrecimientos para recibir hipopótamos en las colecciones de zoológicos y en centros de rescate ubicados en otros países como México, India, Filipinas, Ecuador y Perú.

Investigación científica y modelos de población

Cornare ha colaborado con varias universidades e institutos de investigación para desarrollar modelos de proyección del crecimiento de la población de hipopótamos. En algunos

estudios se ha advertido que si no se intensifican las acciones de control, la población podría llegar a los 1.500 individuos en el 2039. Estos modelos ayudan a evaluar la efectividad de estrategias como la castración y la contención, y a planificar intervenciones futuras.

A lo largo de los años Cornare también ha hecho monitoreos poblacionales en los cuerpos de agua lóticos y lénticos con presencia de la especie dentro de su jurisdicción. Estos monitoreos contemplan el seguimiento directo e indirecto con métodos de invasivos (**Figura S14**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2668/4020>); sin embargo, aún hay varios retos, especialmente al evaluar los grupos etarios y las proporciones sexuales dentro de las poblaciones.

Educación y sensibilización

La educación y la sensibilización de la comunidad local son componentes críticos de la estrategia de Cornare. La Corporación lleva años trabajando para informar a las comunidades sobre los riesgos asociados con los hipopótamos, incluidos los peligros para la salud humana y los impactos ambientales. Estas campañas buscan promover la cooperación y el apoyo comunitario para las medidas de control implementadas (**Figura S15**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2668/4020>). Con las jornadas de intervención social en las zonas de presencia de la especie se busca, asimismo, promover la apropiación social de conocimiento sobre las especies nativas, para así concentrar los esfuerzos de las poblaciones en la conservación de aquéllas que se han visto vulneradas en los ecosistemas del Magdalena Medio. También se ha contado con el apoyo de Corantioquia y Corpoboyacá al abordar a las comunidades ribereñas donde se encuentra la especie invasora con actividades de formación activa en torno a los métodos de avistamiento y monitoreo de fauna nativa, dirigidas especialmente a los niños.

Cornare ha buscado y recibido apoyo internacional para abordar la problemática de los hipopótamos. La colaboración con entidades de Estados Unidos ha sido clave, especialmente en la implementación de nuevas técnicas como la inmunocastración, pero también se han hecho alianzas con universidades locales (Udea, UPTC, Universidad Javeriana, Unal) y el Instituto Alexander Von Humboldt, así como con algunas instituciones internacionales, entre ellas, la Universidad de Yale y la de California en San Diego, lo que ha permitido recibir soporte técnico. Este apoyo no solo ha incluido donaciones de medicamentos, sino también asistencia técnica y asesoría científica, lo que ha fortalecido la capacidad de Cornare para manejar la situación.

Colaboración internacional para posibles translocaciones de hipopótamos

Existe también la alternativa de la translocación de hipopótamos hacia centros de rescate y zoológicos ubicados en otros países. Esta posibilidad no se concreta aún debido a que no ha sido posible obtener el aval legal y sanitario de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES).

Los países con entidades interesadas en recibir hipopótamos son India (hasta 30 ejemplares), México (hasta 10 ejemplares) y Filipinas (hasta cinco ejemplares). También hemos establecido contacto con zoológicos de Tailandia, Perú, Uruguay y República Dominicana interesados en recibir hasta dos hipopótamos cada uno.

Conclusiones y alternativas de manejo

En este contexto, es deber de Cornare manifestar de forma clara que, a pesar de que nuestro equipo tiene toda la voluntad de colaborar en la búsqueda e implementación de soluciones para el problema que representa la presencia de hipopótamos en estado silvestre, hemos propuesto algunas alternativas y seguimos a la espera de que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible autorice mediante la expedición del permiso CITES la alternativa de translocación. También estamos a la espera de que se establezcan las condiciones técnicas para implementar la caza controlada de hipopótamos.

En los procesos que involucran la presencia de una especie invasora en el país deben tenerse en cuenta los aspectos sociales (percepción socioambiental de la especie), las posibles interacciones en cuanto a la convivencia, las afectaciones que pueden presentarse y la respuesta de las comunidades. Ello le daría a las autoridades ambientales un mayor conocimiento y la posibilidad de mapear las relaciones que se generan y las necesidades de las poblaciones humanas con respecto a la presencia y los cambios que generan las especies invasoras. Por ello, Cornare trabaja arduamente en minimizar las situaciones de riesgo que se presentan por la presencia de la especie.

En conclusión, esta problemática requiere una mirada integral. Nuestra experiencia nos ha enseñado que no hay una única solución para ponerle fin, ya que existe una percepción muy positiva de la especie entre algunos habitantes de la región de Puerto Triunfo que llevan años conviviendo con los hipopótamos.

En Cornare continuaremos haciendo los esfuerzos necesarios en los diferentes frentes propuestos para, algún día, dar una solución adecuada a la problemática que representa la presencia de esta especie.

• **David Echeverri López, Sofía Fernández Africano**

Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare)
decheverri@cornare.gov.co - africano.bio@gmail.com

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2668/4020>

Referencias

- Chen, W., Handigund, M., Ma, J., López, L., Zhang, X.** (2010). Behavioural responses of ex-situ captive hippopotamus (*Hippopotamus amphibius*) in lactation season: Maternal investment and plasticity of infant self-independence. *Frontiers in Biology*, 5, 556-563. <https://doi.org/10.1007/s11515-010-0540-5>
- Corporación Autónoma de los Ríos Negro y Nare - Cornare.** (2009). Informe de Gestión, vigencia 2009.
- Corporación Autónoma de los Ríos Negro y Nare - Cornare.** (2015). Informe de Gestión, vigencia 2015.
- Corporación Autónoma de los Ríos Negro y Nare - Cornare.** (2022) Informe de Gestión, vigencia 2022.
- Corporación Autónoma de los Ríos Negro y Nare - Cornare.** (2023) Informe de Gestión, vigencia 2023.
- Corporación Autónoma de los Ríos Negro y Nare - Cornare.** (2024) Informe de Gestión, vigencia 2024.
- Lewison, R. & Pluháček, J.** (2017). *Hippopotamus amphibius*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T10103A18567364. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T10103A18567364.en>
- Medellín, R., Gómez de Silva, H. Álvarez-Romero, J., Ita, A., Equihua, C.** (2005). *Vertebrados superiores exóticos en México: diversidad, distribución y efectos potenciales*. Informe final SNIB-CONABIO, Proyecto U020. DOI:10.13140/RG.2.1.1820.6163
- Smith, T. & Smith, R.** (2007). *Ecología*. Edición 6. Pearson Educación (Ed). ISBN 8478290842, 9788478290840.
- Subalusky AL, Sethi SA, Anderson EP, Jiménez G, Echeverri-López D, García-Restrepo S, Nova-León LJ, Reátiga-Parrish JF, Post DM, Rojas A.** (2023). Rapid population growth and high management costs have created a narrow window for control of introduced hippos in Colombia. *Scientific Reports Nature*, 13(1), 6193. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33028-y>. PMID: 37062768; PMCID: PMC10106455.
- Subalusky AL, Anderson EP, Jiménez G, Subalusky, A.L., Anderson, E.P., Jiménez, G., Post, D.M., Echeverri Lopez, D., García R, S., Nova León, L.J., Reátiga Parrish, J.F., Rojas, A., Solari, S., Jiménez-Segura, L.F.** (2019). Potential ecological and socio-economic effects of a novel megaherbivore introduction: the hippopotamus in Colombia. *Oryx*, 55(1), 105-113. <https://doi.org/10.1017/S0030605318001588>

Opinion

In the interest of hippos: Reflecting on the interests of the Colombian hippo population and their management

Por el interés de los hipopótamos: reflexión sobre los intereses de la población colombiana de hipopótamos y su manejo

In 2009 an individual *Hippopotamus amphibius*, colloquially known as “Pepe”, was killed and later photographed with by members of the Colombian military. Garnering both national and international attention, this resulted in any further cullings being put on hold. This hippo was part of a growing population that came from drug trafficker Pablo Escobar’s estates’ private zoo at Hacienda Nápoles where four were trafficked over in the 1980s from the US. After Escobar’s death and the hippos were abandoned, concerns have been raised that this population could increase to over 1000 by 2035 (**Ministry of Environment and Sustainable Development**, 2023). This merits particular concern due to the wider environmental harm they are causing, as well as the risks of human-animal conflict associated with the species, which resulted in them being officially labelled an invasive species in 2022.

The debate surrounding managing this population has grown with discussions including politicians, conservationists, and ecologists exploring strategies for control and the wider impacts the hippos are having on the environment. Legal challenges have also arisen on behalf of the population by Colombian attorney Luis Domingo Gómez Maldonado with the legal case (Case No.: 25000234100020200044400) being brought forward to argue on behalf of hippos as an interested party. This case was to be taken into account when considering how the species should be managed, stipulating that previous decisions such as the euthanasia of the hippo in 2009 did not coincide with the interests of the hippos. The case was further supported by the 2021 deposition case based out of an Ohio court in the US in which two witnesses were to give testimony to support the initial Colombian case. This was done under 28 U.S. Code § 1782, used to assist foreign and international tribunals and litigants before such tribunals. In this case, it was raised due to allegations that the Colombian courts were not considering all available evidence and to help further the interests of the hippos in their management. Taking this and wider environmental and sociopolitical factors into account, this all culminated in the announcement by the Ministry of Environment and Sustainable Development in November of 2023 of guidelines for the hippos’ management including the beginning of the surgical sterilisation of hippos alongside exploring both translocation and euthanasia strategies all working together (**Ministry of Environment and Sustainable Development**, 2023). The question this raises is whether this management strategy has considered the interests of the hippos and what are the challenges of doing this?.

Species rights and interests of the hippos

Green criminology explores criminal offenses as well as harms and risks to the environment and animals regardless of legal status. This critical lens is used due to many harms against the environment not being recognized under criminal law. Under the majority of jurisdictions, the environment and non-human animals are often not seen as a priority with legal systems taking an anthropocentric stance (**Nurse & Wyatt**, 2020). Concepts of species justice sit within this, arguing that the rights and protection of species should not be based on anthropocentric values but instead on sentience and species’ interests

(Benton, 1998). As such, the management decision and the Colombian hippos' case can be explored from this perspective. This raised interesting debates regarding the reality of invasive species management and just how feasible it is to maintain the interests of the hippos while protecting the environment and human populations.

To varying extents, all three components of this strategy: euthanasia, translocation, and surgical sterilisation, consider species interests and rights. The most controversial and heavily debated aspect of this strategy is ethical euthanasia. This aspect will explore the killing of an unconfirmed number of hippos and work alongside the other two strategies. The term of ethical euthanasia and what this entails has not been clarified, however, it does suggest that the methods involved would be as painless as possible in comparison to previous hippo killings. Although this is not in the interest of the species and there is still the possibility of pain depending on the decided method, at least on the surface recognises them as living beings. From a species justice perspective, this goes against the interests of the hippos. Recognized as a sentient species, hippos live on average for between forty and fifty years which they would be deprived of under this part of the strategy. Sentience of species is recognized under Colombian law 1774 of 2016, however, this is complicated by the invasive nature of the hippos. Additionally, an argument could be made that these hippos are indirect victims of the drug trade with the species being introduced as a result of Pablo Escobar's collection of exotic species and the profits the Medellín cartel made. By viewing them as victims, arguments could be made to explore these species' justice perspectives in management strategies.

Secondly, the sterilization process will be conducted on both male and female hippos aiming to sterilize around 40 per year. This part of the strategy poses some risks to the species with these procedures being complex. However, as an alternative to killings, this is more in line with concepts of species justice by recognizing their interest in life. There are still risks, including death, to the species due to factors such as chemical imbalance (Ministry of Environment and Sustainable Development, 2023). Furthermore, some animal rights activists are fundamentally against the sterilization of animals, as any interference with wildlife is seen as problematic (Simberloff, 2015). The final part of this strategy is the translocation of some of the hippos to other countries. In the November announcement, India, Mexico, and the Philippines were mentioned and at least 60 would be sent to India. From a species justice perspective, this is the one most in line with the interests of the hippos by preserving life and not limiting reproduction. This demonstrates how the management strategy is making a conscious effort to at least consider the interests and well-being of the hippos.

However, the challenge surrounding building species justice approaches into the management strategy is the wider issues that emerge from it, with both the rights and interests of the humans who live near the hippos and the environment and native species being put at further risk. Firstly, the recognition and debate regarding building the interests of the species into the management process takes a long period of time. For instance, the initial court case took place in 2020, the deposition in 2021, the declaration of being an invasive species in 2022, and the control decisions in 2023, all allowing the hippo population to grow further.

Although Colombia does recognize animal sentience globally, there is no consensus on animal rights. Discussions have increased since the 1960s, however, attempts to pass UN declarations have failed due to lack of political will, challenges of what these rights could look like, and which species get which rights all hindering progress (Nurse & Wyatt, 2020). Furthermore, some components of the strategy are not quick fixes. The sterilization component will only slowly reduce the population on its own, hippos will still reside in the region, and translocation planning takes time. This creates further risks for environmental destruction and harm to human beings. Invasive species in many cases have been found to pose significant risks to native species and the wider biosphere. The hippos are no exception with significant environmental challenges resulting from their growing population,

including the deaths of fish species and water pollution as a result of the initial increasing population, which may persist at a smaller level as the population slowly declines due to their management. In addition, although at the time of writing no human deaths connected to the hippos have been reported, there are reports of destruction of property, and injuries. With hippo populations potentially persisting this could pose further risks to local areas and communities. However, it should also be noted that some animal rights activists would see any form of interference as problematic. Many cases involving the control of invasive species have been opposed citing arguments that humans do not have the right to kill animals besides having issues with the methods used (Simberloff, 2015).

In addition to these collective risks, the costs of incorporating decisions more in line with the interests of the species are higher than the more commonly used methods. As part of the sterilization plan, 808 million pesos have been invested with each sterilization likely to cost around 40 million pesos. This is in sharp contrast to wider conservation initiatives which generally have far smaller budgets or struggle to maintain funding. Also, quotations regarding the relocation part of the strategy have been estimated to reach \$3.5 million US dollars. In comparison, ethical euthanasia is seen as the cheaper and less resource-draining part of the strategy. This reveals the expensive nature of considering species interests and further supports the high-profile nature of this case.

In short, none of the strategies are fully in the interests of the hippos or fit neatly into the species justice framework demonstrating the challenge of building species interests into control measures. The combination of all three prongs of the strategy has at least considered the hippos' interests whilst protecting the Colombian ecosystem. This case demonstrates the possibility of considering species interests in decision-making regarding invasive species control and elements of good practices from a species justice perspective (Doornbos, 2023). Doing this opens the way to exploring wider species management options in certain cases, particularly given the difficulties related to predicting which species will become invasive and the ethically questionable practices some management schemes utilize (Simberloff, 2015). However, the hippos are a rather unique case as an invasive species. Among many other factors, being recognized as a charismatic megafauna and the consistent media attention have likely influenced this case. These are generally not seen with other invasive species globally such as with wild boars and lionfish. Furthermore, as a megafauna species, the hippos have had a relatively slow reproduction rate. In contrast, other smaller species reproduce quicker with a higher risk of causing damage to the biosphere and, as such, may need to be managed quicker (Simberloff, 2015) creating challenges in considering their interests. Overall, a pragmatic balance between the interests and rights of the species vs the wider environment and human residence needs should be struck.

The management of this hippo population provides a unique case in which the control of an invasive species has garnered international attention. From a species justice perspective, considering the interests of the hippos does demonstrate areas of positive practice in the control and management of species which may be explored in other management cases where possible. However, it should be recognized that an invasive megafauna species such as the hippos poses unique challenges regarding their control. If species interests are to be more widely considered in management, this would need to be taken on a case-by-case basis with some species likely being more challenging than others (Doornbos, 2023). Where wildlife protections have consistently been based on anthropocentric notions of value, recognizing the interests of species in decisions of their management from a legal perspective should be seen as a positive. However, these interests have to be weighed against wider environmental and sociopolitical factors to balance the interests of the species whilst also safeguarding the biosphere.

Elliot Doornbos

School of Social Sciences, Nottingham Trent University, Nottingham, UK
elliot.doornbos@ntu.ac.uk

References

- Benton, T.** (1998). Rights and justice on a shared planet: more rights or new relations? *Theoretical Criminology*, 2, 149-75.
- Doornbos, E.** (2023). Colombian Hippos and Species Management: Exploring the Legal Case Surrounding the Management and Control of the Colombian Hippos from a Species Justice Perspective. *Laws*, 12, 29.
- Ministry of Environment and Sustainable Development.** (2023). Sterilization phase of the management plan to control hippos in Colombia begins (online) <https://www.minambiente.gov.co/inicia-fase-de-esterilizacion-del-plan-de-medidas-que-busca-controlar-la-poblacion-de-hipopotamos-en-colombia/>
- Nurse, A. & Wyatt, T.** (2021). *Wildlife Criminology*. Bristol: Bristol University Press.
- Simberloff, D.** (2015). *Invasive Species: What everyone needs to know*. Oxford University Press.

Club de revistas/Journal Club

Reseña sobre el artículo

Gastaldo, R., Gensel, P., Glasspool, I., Hinds, S., King, O., McLean, D., Park, A., Stimson, M., Stonesiferet, T. (2024). Enigmatic fossil plants with three-dimensional, arborescent-growth architecture from the earliest Carboniferous of New Brunswick, Canada, *Current Biology*, 34, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.01.011>

Enigmática planta fósil con arquitectura tridimensional de crecimiento arborescente del Carbonífero temprano de New Brunswick, Canadá

Enigmático como incierto es el nuevo fósil del Carbonífero temprano registrado por **Gastaldo et al.** (2024), el cual sería un árbol del sotobosque de New Brunswick, Canadá. La evidencia fósil son fragmentos que, de acuerdo con la reconstrucción que se hizo mediante ecuaciones alométricas (**Niklas**, 1994), sería un elemento arbóreo con crecimiento monopodial de cerca de 3 m de altura; sobre el tallo hay cicatrices resultantes del desprendimiento de las hojas, evidentes hacia el ápice del tallo, donde hay aproximadamente 200 de ellas con distribución espiralada. Estos órganos foliares tienen una longitud de 1,75 m y no siguen la serie de Fibonacci (1/13). Aunque la evidencia es fragmentaria, al parecer se habrían ramificado tres veces.

El nuevo fósil recibió el nombre de *Sanfordiacaulis densifolia* y debido a la falta de evidencia morfológica, anatómica y reproductiva no se ha incluido en una categoría taxonómica supragenérica. **Gastaldo et al.** (2024) sólo hacen comparaciones con base en la morfología encontrada y lo relacionan principalmente con Helechos y Pteridospermas. El modelo general de crecimiento monopodial y cicatrices foliares a lo largo del tallo, con concentración de hojas o ramas hacia el ápice, era común en el Carbonífero inferior en las licopodophytas (**Orlova et al.**, 2017) y en otros grupos del pasado y actuales, pero con la evidencia disponible es muy difícil ubicarlo en algún linaje definido.

La reinterpretación de las evidencias fósiles únicamente de fragmentos para proponer nuevas especies, o inclusive géneros, ha permitido concluir que más que nuevas entidades taxonómicas, se trataba de diferentes estados del desarrollo a partir de la misma especie. Como bien lo señalan **Gastaldo et al.** (2024), un fósil representa sólo el estado ontogenético del organismo en un periodo de tiempo. Falta evidencia de la base del árbol, y lo que sería un individuo de 3 m, podría ser uno de mayor altura, como muchos del Carbonífero, un periodo en el que según **Gastaldo et al.** (2024) había árboles del dosel o hierbas, pero no árboles establecidos en el sotobosque.

Todavía no se ha encontrado la base del tallo, clave para ubicarlo quizás dentro de Marattiales, Cyatheales o Pteridospermas (**Gastaldo et al.**, 2024), ya que estos grupos presentan abundantes raíces en esta parte del eje principal (**Stewart & Rothwell**, 1993). Probablemente, este nuevo fósil no está en la línea de evolución de los helechos arborescentes, pues recientemente **Ramírez** (2024) encontró que las Cyatheales iniciaron su historia evolutiva en el Triásico, casi 100 millones de años después de existir *S. densifolia*. La anatomía del peciolo podría dar indicios sobre su posible relación con las Marattiales. Tanto en *Psaronius* como en algunos filicales el tejido vascular es en forma de "C", lo cual también ocurre dentro de las Pteridospermas (**Stewart & Rothwell**, 1993). En los helechos actuales se ha visto que los peciolos acanalados pueden presentar esta forma del tejido conductor, lo cual podría presentarse en *S. densifolia*, teniendo en cuenta que tiene peciolos con esta forma. En su figura 4B **Gastaldo et al.** (2024) muestran peciolos en sección transversal, sin embargo, no se conserva el sistema vascular y en el interior solo se presenta barro.

Aparentemente, las hojas de *S. densifolius* están representadas por ejes ramificados hasta un tercer orden, y en ellas no se aprecia un tejido laminar; **Gastaldo et al.** (2024) señalan que las hojas no eran dicotómicas, sin embargo, en la parte inferior de la figura

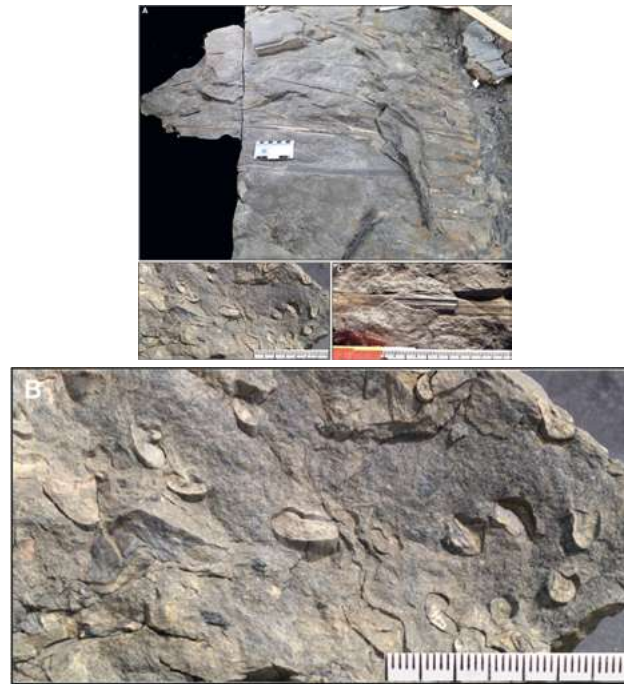


Figure 4. Características morfológicas del tallo y de las hojas de *S. densifolius*.

(B) Corte transversal de peciolo mostrando el canal adaxial, pero sin detalle de los haces vasculares. Tomado de Gastaldo *et al.* (2024)

5E se presenta una ramificación que sería dicotómica; en esa misma figura aparece una rama de segundo orden, la cual podría haberse desarrollado por sobrecrecimiento, dando la apariencia de una estructura principal con ramas laterales.

Las Trimerophytosida, las Progymnospermas y las Pteridospermas exhiben una gran diversidad morfológica en las estructuras foliares para captar la luz, dar un mejor soporte mecánico y tener ventajas en la dispersión de las estructuras reproductivas (Niklas, 1997); en ellas el sobrecrecimiento y la reducción alteraron la ramificación dicotómica de éstas primeras plantas vasculares (Stewart & Rothwell, 1993; Niklas, 1997). Estas características foliares, además del porte arborescente, podrían llevar a pensar que *S. densifolius* estaría relacionada con las Progymnospermas y, quizás dentro de estas, con los Aneurophytales (Stewart & Rothwell, 1993), pero también con las Pteridospermas; sin embargo, la mayoría de los fósiles de este último grupo presentan estructuras laminares (Stewart & Rothwell, 1993). No obstante, una correcta inclusión de *S. densifolius* en alguno de estos grupos no será posible sin la descripción de las características anatómicas y reproductivas.

El nuevo fósil no presenta “hojas juveniles” y, por lo tanto, no se conoce su vernación, la cual podría indicarnos su posible relación con las Marattiales, Progymnospermas o con las Pteridospermas, en las cuales se puede presentar una vernación circinada, típica de los helechos actuales (Tryon & Tryon, 1982), un carácter que se registra desde el Paleozoico en *Psaronius* (Stewart & Rothwell, 1993).

Otra característica sorprendente de *S. densifolia* es que la filotaxis de las hojas no sigue la serie de Fibonacci, lo que no es inesperado si se tiene en cuenta que se han encontrado fósiles que no la presentan (Turner *et al.*, 2023). La filotaxis es el resultado de una interacción fisiológica, genética y de adaptación al ambiente (Niklas, 1988), y especialmente la actividad de las auxinas determina en gran medida como será la distribución de los órganos laterales (Niklas, 1988; Gola & Banasiak, 2016), la cual inclusive podría cambiar

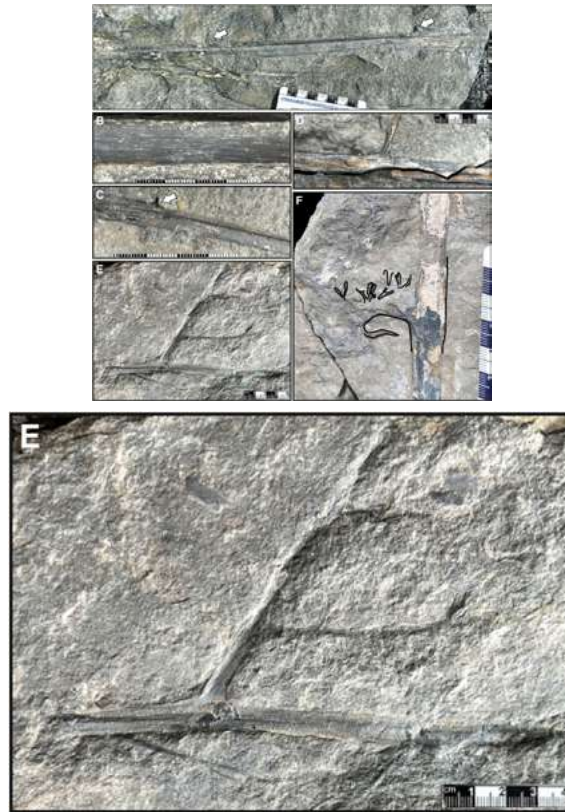


Figure 5. Variación morfológica de las hojas de *S. densifolius*.
(E) Detalle de la ramificación foliar. Tomado de Gastaldo *et al.* (2024)

a lo largo de la vida de una planta (Guzmán *et al.*, 2022). Un mejor conocimiento de estos factores y su relación en la evolución de las plantas terrestres nos ayudaría a comprender la falta de este patrón general de organización de los órganos laterales en algunos grupos del pasado geológico. La serie Fibonacci se presenta en todos los grupos de plantas vasculares, sin embargo, en las Lycopodiales es común que no se desarrolle, y tampoco se presenta en uno de los grupos fósiles cercano Drepanophytales (v. g., *Asteroxylon mackiei*, Turner *et al.*, 2023). Teniendo en cuenta que en las Pteridospermas e incluso en los representantes de helechos del Carbonífero ya se presentaba este patrón de organización (Stewart & Rothwell, 1993), la ubicación taxonómica de *S. densifolia* se hace más confusa, por lo tanto, tendremos que esperar nuevos hallazgos fósiles de esta planta para entender e interpretar sus relaciones con los grupos que se desarrollaron durante el Carbonífero temprano.

José Murillo-A.

Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá
jcmurilloa@unal.edu.co

Agradecimientos

A Orlando Rangel por su invitación y motivación para elaborar este documento. A Orlando Rangel y a Robert Gastaldo por los comentarios y sugerencias al manuscrito, lo que permitió mejorarlo.

Referencias

- Gastaldo, R., Gensel, P., Glasspool, I., Hinds, S., King, O., McLean, D., Park, A., Stimson, M., Stonesiferet, T.** (2024). Enigmatic fossil plants with three-dimensional, arborescent-growth architecture from the earliest Carboniferous of New Brunswick, Canada, *Current Biology*, 34, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.01.011>
- Gola, E.M., Banasiak, A.** (2016). Diversity of phyllotaxis in land plants in reference to the shoot apical meristem structure. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 85(4), 3529. <https://doi.org/10.5586/asbp.3529>
- Guzmán, E., Fernández, M., Alcalde, JA. Contreras, S., Raunonen, P., Picco, L., Montalba, C., Tejos, C.** (2022). Phyllotaxis transition over the lifespan of a palm tree using Magnetic Resonance Imaging (MRI) and Terrestrial Laser Scanning (TLS): the case of *Jubaea chilensis*. *Plant Methods*, 18, 88. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00920-z>
- Niklas, K.** (1988). The role of phyllotactic pattern as a “developmental constraint” on the interception of light by leaf surface, *Evolution*. 42, 1-16.
- Niklas, K.** (1994). Predicting the height of fossil plant remains: an allometric approach to an old problem, *American Journal of Botany* 81, 1235-1242.
- Orlova, O., Pustovoit, K., Anikeeva, E.** (2017). Pteridosperms from the Lower Carboniferous of South Urals, Russia. *Plant Systematics and Evolution*, 303, 1-11. [10.1007/s00606-017-1421-z](https://doi.org/10.1007/s00606-017-1421-z).
- Ramírez, S.** (Aceptado). Incorporating fossils into the joint inference of phylogeny and biogeography of the tree fern order Cyatheales. *Evolution*. <https://doi.org/10.1093/evolut/qpae034>
- Stewart, W. Rothwell, G.** (1993). Paleobotany and the evolution of plants. Second edition, Cambridge university Press, New York, 521 pp.
- Turner, H., Humpage, M., Kerp, H., Hetherington, A.** (2023). Leaves and sporangia developed in rare non-Fibonacci spirals in early leafy plants. *Science*, 380, 1188-1192.
- Tryon, R. Tryon, A.** (1982). Ferns and allied plants, with special reference to tropical America. Springer-Verlag. New York, 858 pp.

Enigmatic fossil plants with three-dimensional, arborescent-growth architecture from the earliest Carboniferous of New-Brunswick, Canada

Enigmatic, as well as uncertain, is the new Early Carboniferous fossil recorded by **Gastaldo et al.** (2024), which is interpreted to have been an understory tree from New Brunswick, Canada. The fossil evidence that, according to the reconstruction made using allometric equations (**Niklas**, 1994), would be an arboreal element with monopodial growth of about 3 m in height. The lower stem is covered by scars resulting from the detachment of the leaves, which are still attached towards the apex of the trunk, where there are approximately 200 of them with a spiral distribution. These partial leaves are 1.75 m long and do not follow the Fibonacci series (1/13 phyllotaxis). Although the evidence is fragmentary, they would appear to have branched three times.

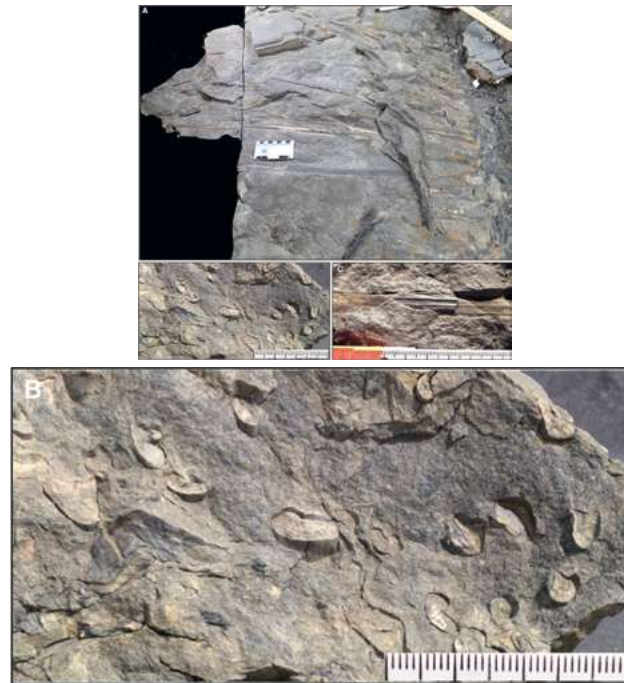
The new fossil was named *Sanfordiacaulis densifolia* and due to the lack of morphological, anatomical, and reproductive evidence it has not been included in a suprageneric taxonomic category. **Gastaldo et al.** (2024) only make comparisons based on the preserved morphology and relate it mainly to Ferns and Pteridosperms. The general pattern of monopodial growth and leaf scars along the stem, with concentration of leaves or branches towards the apex, was common in the Lower Carboniferous in Lycopodophytae (**Orlova et al.**, 2017) and in other past and present groups. But, the available evidence makes it very difficult to place the tree in any definite lineage.

The reinterpretation of fossil evidence from fragments alone to propose new species, or even genera, has led to the proposal that rather than new taxonomic entities, many may have been different stages of development of the same species. As **Gastaldo et al.** (2024) point out, a fossil represents only the ontogenetic stage of the organism in the period of time when it was preserved. Evidence of the base of the tree is lacking, and what would be

a 3 m individual could be one of greater height, like many from the Lower Carboniferous, a period when, according to **Gastaldo *et al.* (2024)**, there were canopy trees or herbs, but no evidence for trees in the understory.

The base of the stem has not yet been found, a key to place it perhaps within Marattiales, Cyatheales, or Pteridosperms (**Gastaldo *et al.*, 2024**), because these groups developed abundant roots and root mantles in this part of the main axis (**Stewart & Rothwell, 1993**). This new fossil may not be in the evolutionary line of tree ferns, because **Ramírez (2024)** recently found that Cyatheales started their evolutionary history in the Triassic, almost 100 million years after the existence of *S. densifolia*. The anatomy of the petiole could give clues about its possible relationship with the Maratheales. In both Psaronius and some filicalean ferns the vascular tissue is “C” shaped, which also occurs in some Pteridosperms (**Stewart & Rothwell, 1993**). In extant ferns it has been seen that grooved petioles can present this shape mimicking the conductive tissue, which could be present in *S. densifolia*, considering that it has similar shaped petioles. In their **figure 4B** **Gastaldo *et al.* (2024)** show petioles in transverse section; however, the vascular system is not preserved, and the interior of the petioles are mud filled.

Apparently, the leaves of *S. densifolius* are represented by branched axes up to a third order and the laminar pinnae or pinnules are not preserved. **Gastaldo *et al.* (2024)** point out that the leaf petioles were not dichotomous. However, in the lower part of **figure 5E** a dichotomous branching that is interpreted as photosynthetic laminae is presented. In that same figure, a second order branch appears, which could have developed by overgrowth, giving the appearance of a main structure with lateral branches.



"Figure 4. Trunk and petiolar features. Trunk and basal parts of leaves (right; NBM 22403/1) with adjacent block showing their continuation, indicating that leaves were longer than shown on main block. The counterpart removed and sectioned in figure 2D originates from the upper right (NBM 22403/2). Scale in cm and inches. NBM 22403-3. **(B) Petiole cross-sections proximal to the trunk exhibiting a heart-shaped geometry with an adaxial depression furrow in compressions. Scale in mm. NBM 23142.** (C) Mudcast petiole proximal to the trunk showing adaxial groove and fine striations. NBM 22403/2. Scale in cm and mm". (With permission of R. Gastaldo)

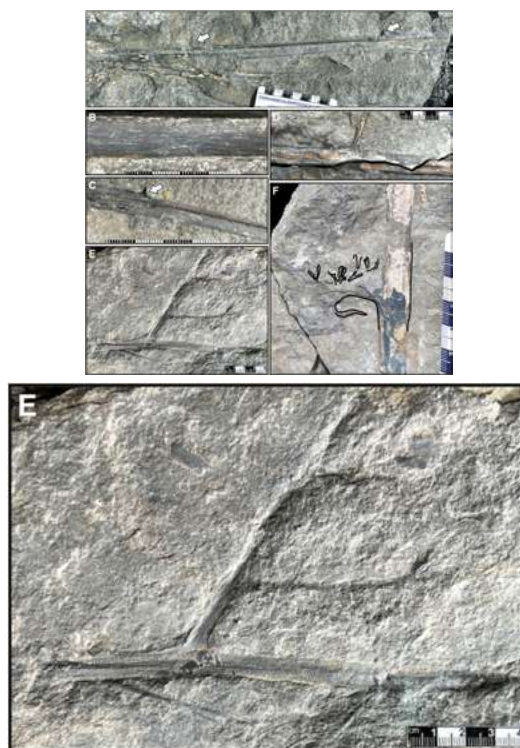


Figure 5. Evidence of compound leaves and pinnules. NBM 22403/. (A) Portions of two leaves in close spatial proximity. Arrows indicate bases of second-order laterals departing from upper axis. Scale in cm and mm. (B) Petiole/rachis detail showing fine striations and adaxial groove (top). Scale in mm. (C) Leaf rachis with white arrow indicating departure of another lateral. Scale in mm. (D) Longer second-order lateral departing from rachis. Scale in cm and mm. **(E) Isolated rachis on large block with second- and third-order laterals. Scale in cm and mm.** (F) Rachis with poorly preserved, Sphenopteridiumlike, pinnules (black outline) departing from second-order axes. Scale in cm and mm". (With permission of R. Gastaldo).

The Trimerophytopsida, Progymnosperms, and Pteridosperms exhibit a great morphological diversity in leaf structures to capture light. These features provided for better mechanical support and in the dispersion of reproductive structures (Niklas, 1997). It has been proposed that overgrowth and reduction alter the dichotomous branching of the earliest vascular plants (Stewart & Rothwell, 1993; Niklas, 1997). These foliar characteristics, in addition to the arborescent habit, could lead one to think that *S. densifolius* could be related to the Progymnosperms and, perhaps within these, to the Aneurophytales (Stewart & Rothwell, 1993). It is also possible that the plant could belong to the Pteridosperms. However, most of the fossils of the latter group show laminar structures and the petioles fork into two equivalent halves, each bearing photosynthetic laminae (Stewart & Rothwell, 1993). Nevertheless, the assignment and inclusion of *S. densifolius* into any of these groups will not be possible without a description of the anatomical and reproductive characteristics which, to date, have not been encountered.

The new fossil does not present “juvenile leaves” and, therefore, their departure from the growing tip is not known. If the developmental pattern was present, a possible relationship with the Marattiales, Progymnosperms, or Pteridosperms, in which a circinate vernation, typical of present-day ferns, may be concluded (Tryon & Tryon, 1982). Circinate vernation is a character recorded since the Paleozoic in the tree fern genus *Psaronius* (Stewart & Rothwell, 1993).

Another striking feature of *S. densifolia* is that leaf phyllotaxis does not follow the Fibonacci series, which is not unexpected considering that other fossil plants have been found that do not follow the pattern (Turner *et al.*, 2023). Phyllotaxis is the result of a physiological, genetic, and environmental adaptation interaction (Niklas, 1988), as auxin activity largely determines how the distribution of lateral organs will develop (Niklas, 1988; Gola & Banasiak, 2016). The formation of laterals, though, has been documented to change throughout the life of a plant in some taxa (Guzman *et al.*, 2022). A better understanding of these factors and their relationship in the evolution of land plants would help us understand the lack of this general pattern of lateral organ organization in some groups in the geological past. The Fibonacci series is present in all vascular plant groups; however, it is commonly absent in the Lycopodiales and in one of a closely related fossil group, the Drepanophytales (i.e., *Asteroxylon mackiei*; Turner *et al.*, 2023). Considering that the Pteridosperms and even some Upper Carboniferous ferns display this pattern of organization (Stewart & Rothwell, 1993), the taxonomic placement of *S. densifolia* becomes more confusing. Therefore, we will have to wait for new fossil finds of this plant to understand and interpret its relationships with the groups that developed during the early Carboniferous

● José Murillo-A.

Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá
jcmurilloa@unal.edu.co

Editors' note

The translation of Dr. Murillo's text was made by Dr. Robert Gastaldo, author of the article commented on. Our sincere thanks to him.

References

- Gastaldo, R., Gensel, P., Glasspool, I., Hinds, S., King, O., McLean, D., Park, A., Stimson, M., Stonesiferet, T. (2024). Enigmatic fossil plants with three-dimensional, arborescent-growth architecture from the earliest Carboniferous of New Brunswick, Canada, *Current Biology*, 34, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.01.011>
- Gola, E.M., Banasiak, A. (2016). Diversity of phyllotaxis in land plants in reference to the shoot apical meristem structure. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 85(4), 3529. <https://doi.org/10.5586/asbp.3529>
- Guzmán, E., Fernández, M., Alcalde, JA, Contreras, S., Raunonen, P., Picco, L., Montalba, C., Tejos, C. (2022). Phyllotaxis transition over the lifespan of a palm tree using Magnetic Resonance Imaging (MRI) and Terrestrial Laser Scanning (TLS): the case of *Jubaea chilensis*. *Plant Methods*, 18, 88. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00920-z>
- Niklas, K. (1988). The role of phyllotactic pattern as a “developmental constraint” on the interception of light by leaf surface, *Evolution*. 42, 1-16.
- Niklas, K. (1994). Predicting the height of fossil plant remains: an allometric approach to an old problem, *American Journal of Botany* 81, 1235-1242.
- Orlova, O., Pustovoit, K., Anikeeva, E. (2017). Pteridosperms from the Lower Carboniferous of South Urals, Russia. *Plant Systematics and Evolution*, 303, 1-11. [10.1007/s00606-017-1421-z](https://doi.org/10.1007/s00606-017-1421-z).
- Ramírez, S. (Aceptado). Incorporating fossils into the joint inference of phylogeny and biogeography of the tree fern order Cyatheales. *Evolution*. <https://doi.org/10.1093/evolut/qpae034>
- Stewart, W. Rothwell, G. (1993). Paleobotany and the evolution of plants. Second edition, Cambridge university Press, New York, 521 pp.
- Turner, H., Humpage, M., Kerp, H., Hetherington, A. (2023). Leaves and sporangia developed in rare non-Fibonacci spirals in early leafy plants. *Science*, 380, 1188-1192.
- Tryon, R. Tryon, A. (1982). Ferns and allied plants, with special reference

Opinion

Tracing the origin and evolution of the orchid family through genes and trees

El origen y la evolución de la familia de las orquídeas a través de genes y árboles

With 29,524 species distributed in nearly all terrestrial ecosystems, orchids are one of the largest groups amongst the flowering plants and an important component in the floras of tropical countries (Camara-Leret *et al.*, 2020; Pérez-Escobar *et al.*, 2022). Beyond their cultural significance (Seyler *et al.*, 2020), orchids are far from being a trivial plant family for human societies: they represent an important biological resource in the economies of several countries, valued for their ornamental and medicinal properties (Hinsley *et al.*, 2017). The multiple adaptations that orchids evolved to interact with other plants, fungi, and animals (Ackerman *et al.*, 2023) and upon which they rely for their subsistence and reproduction have made them a group of wide scientific interest, attracting research from different fields in plant science for nearly 300 years (Darwin, 1862; Dressler, 1993; Rudall & Bateman, 2002).

Following the introduction of DNA sequencing in evolutionary biology studies, the evolution of orchids has been actively researched, enabling for the first time formal research on the time and place of origin of orchids, and their mode and tempo of evolution. Hundreds of studies have been conducted to elucidate relationships within the family, the majority of which have focused on specific groups at the generic and sub-tribal levels (Cameron *et al.*, 1999; Bateman *et al.*, 2003; Freudenstein *et al.*, 2004; Bateman *et al.*, 2021). These studies mostly relied on inferring phylogenetic trees derived from a handful of genes sequenced from nuclear and organellar genomic regions. They were seminal in the establishment of new taxonomic classification systems (Chase *et al.*, 2015; 2021) and the conduction of comparative phylogenetic studies on character evolution (Martins *et al.*, 2018; Bogarín *et al.*, 2019, Pramanik *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024). Yet, these loci's limited informativeness and reduced taxon sampling prevented the resolution of several relationships at different taxonomic levels (Chase *et al.*, 2021).

With the advent of high-throughput sequencing, the generation of DNA sequences for hundreds of genes from both preserved and degraded specimens became scalable, facilitating the inference of orchid family-wide phylogenies (Givnish *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2019; Serna-Sánchez *et al.*, 2021; Pérez-Escobar *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023), and resolving previously unsupported relationships. The first attempt to estimate the birthplace of the orchid family using molecular data was conducted by Givnish *et al.* (2016). This study relied on a phylogeny that sampled 201 species, which represents approximately 1% of the currently accepted species, covering all subfamilies, 18/19 tribes and 40/43 subtribes. The phylogeny was inferred from 75 plastid genes, a genomic region uniparentally inherited in orchids (Cafasso & Cozzolino, 2005), thus reflecting evolutionary histories that might deviate from the true species-tree relationships (van der Niet & Linder, 2008; Pérez-Escobar *et al.*, 2017; 2021). Their findings suggested that the most recent common ancestor of extant orchids inhabited the American Tropics and Australasia around 85 Ma (Figure 1 in Givnish *et al.*, 2016).

Limited taxon sampling can introduce biases in phylogenetic tree inferences and the estimation of ancestral characters and diversification rates (Turner *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2022). For this, our study (Pérez-Escobar *et al.*, 2024) revisited the macroevolutionary hypotheses proposed by Givnish *et al.* (2016) by assembling an extended phylogenomic framework of the orchid family that included 38% (338) of the currently accepted genera,

Commentary on the paper:
Pérez-Escobar, O.A., et
al. (2024). The origin and
evolution of orchids. *New
Phytologist*, 242(2): 700-716

17 out of 22 subtribes, 40 out of 49 subtribes, and all subfamilies. Such a dataset was created by sequencing 353 low-copy nuclear genes from representative species of every genus; a robust phylogeny was produced (**Figure 1**) that confidently resolved most of the relationships between sampled lineages. Additionally, for the first time in the orchid tree of life, two previously unsampled genera, *Claderia* (Agrostophyllinae, Epidendroideae) and *Cooktownia* (Orchidiinae, Orchoideae), were placed.

While high-throughput sequencing has determined millions of DNA sequences for hundreds of specimens, producing and analyzing such a dataset for all currently accepted species remains cost-prohibitive and computationally time-intensive. Thus, a strategy to build joint, compatible phylogenomic frameworks from different types of sequence data already available in public repositories seems pragmatic to achieve improved taxon sampling. Here, phylogenetic trees serve as the common output for either type of gene dataset, which then can be combined into a single framework. Leveraging multilocus datasets available in public sequence repositories (NCBI), we sampled sequences of the Internal Transcribed Spacer (ITS) and the maturase-K loci for 1920 species (approximately 7% of the currently accepted species). Subsequently, using molecular clock models (**Bouckaert et al., 2019**), we inferred absolute ages of divergence from the publicly available NCBI sequences and the 353 nuclear gene datasets. The analyses produced thousands of phylogenies with branch lengths equivalent to time units (Ma), from which we then randomly sampled ten and merged using a prune-and-graft approach. This approach allowed us to combine the information on species-level relationships provided by the sequences collected from NCBI with the genus, subtribe, and tribe-level relationships inferred by the 353 low-copy nuclear genes. Besides, by relying on multiple merged phylogenies for our comparative analyses on ancestral area and speciation (λ) rate estimation (instead of using a single consensus tree as traditionally done), we took into consideration phylogenetic uncertainty (e.g., branch length and topological variation), which can consistently affect the outcome of phylogenetic comparative methods (**Cusimano & Renner, 2014**).

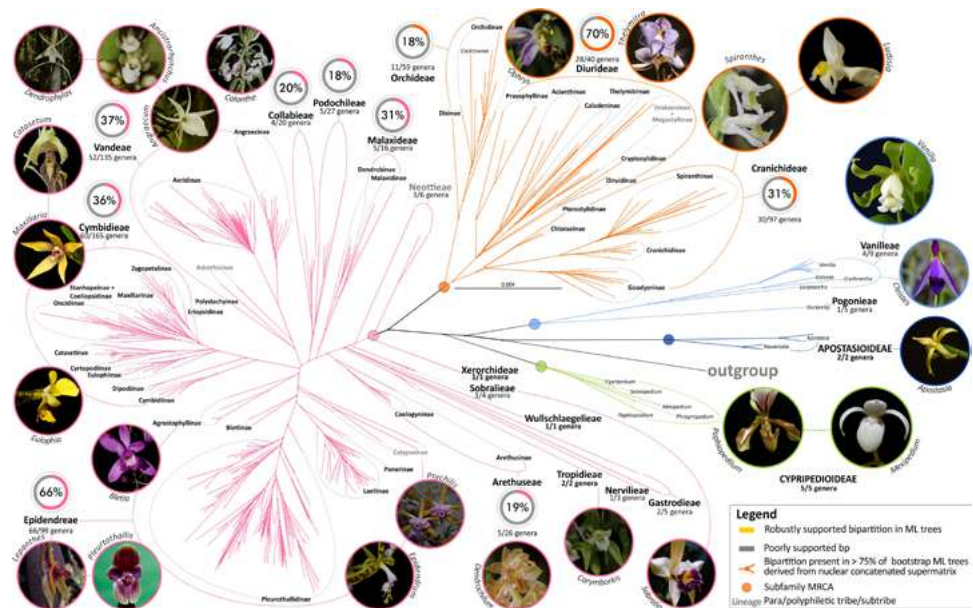


Figure 1. A consensus tree network depicting phylogenetic relationships in the Orchidaceae inferred from 200 bootstrap replicate maximum likelihood (ML) trees derived from the concatenated alignment of 339 low-copy nuclear genes. Circles at nodes represent bipartitions present in > 75% of the bootstrap ML trees. Non-monophyletic groups are highlighted in bold and grey. Samples sequenced from typological material are highlighted in bold and pink. Photos: Oscar A. Pérez-Escobar, Diego Bogarín, Sebastian Viera, Kerry Dressler. Modified from Pérez-Escobar *et al.* (2024)

Our ancestral area estimations revealed that the most recent common ancestor of extant orchids originated in Laurasia ~83 Myr ago (+/-10 Ma) (**Figure 2**). This result contradicts the Neotropical-Australian estimation of **Givnish *et al.* (2016)** and the hypothesis of **Chase (2001)** of a Gondwanan origin of the Orchidaceae, which was proposed on the family’s near-cosmopolitan current distribution. During the Middle Cretaceous period, Laurasian forests were dominated by conifers and extended to high latitudes, beyond the Arctic Circle, where light was scarce for many months of the year (winter) but it was warm enough for trees to grow. The origin of orchids in Laurasia tracks that of few other monocot groups with large distribution ranges, including yams (*Dioscorea*) (**Viruel *et al.*, 2015**) and palms (**Baker & Couvreau, 2012**), a family with a much richer fossil record than orchids and findings from the Northern Hemisphere dating back to the Upper Cretaceous (**Estrada-Ruiz & Cevallos-Ferriz, 2009**). The disparities between our results and those of **Givnish *et al.* (2016)** may stem from the influence of limited taxon sampling and phylogenetic uncertainty on ancestral character estimates, which was not accounted for in their study. Indeed, one of our ten ancestral area estimations (Figure 4 in **Pérez-Escobar *et al.*, 2024**) recovered the same ancestral area obtained by **Givnish *et al.* (2016)**.

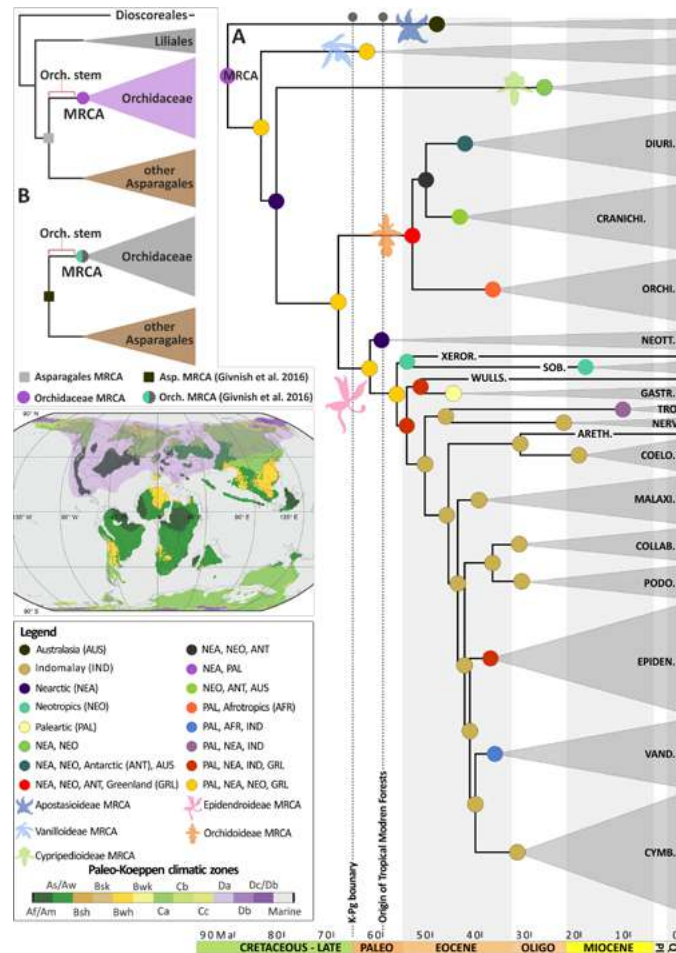


Figure 2. One of the ten possible biogeographic histories of the orchid family. **A)** Ancestral areas at nodes inferred on a posterior probability species tree as estimated by a Dispersal, Extinction, and Cladogenesis model (DEC). **B)** A summary of the outgroup sampling considered in **Pérez-Escobar *et al.*, 2024** and that of **Givnish *et al.*, 2016**. The orchid MRCA of orchids is indicated with a circle. (Inset: A palaeoclimatic and tectonic plate reconstruction at 90–80 Ma from **Burgener *et al.*, 2023**, showing the possible ancestral range of the orchid MRCA as estimated by **Pérez-Escobar *et al.*, 2024**)

The macroevolutionary speciation dynamics of the orchid family obtained by modeling speciation rates through time in our multiple trees revealed that there was a sharp increase in speciation rates (λ) approximately 40 myrs ago (**Figure 3**). However, the highest number of changes in λ (from lower to higher λ) occurred mostly throughout the Miocene. The drivers behind such increases in λ rates are yet to be investigated. The estimation of tip speciation rates (i.e., predicted time at present for a lineage to undergo a speciation event) across our orchid phylogenies has, for the first time, provided a detailed map of hotspots of orchid speciation worldwide (**Figure 3A**). When compared with patterns of orchid species diversity, they indicated that modern speciation rates are unevenly distributed across geographical areas and might or might not be linked to species richness, a pattern known to occur in other flowering plant groups (**Tietje *et al.*, 2022**). Importantly, our results pinpoint the American Tropics, especially in areas with active landscape buildup, as the area with the highest modern speciation rates on Earth. Our modern speciation rate estimations, coupled with orchid geographical distribution records, have the potential to inform conservation strategies for they can illuminate which ecosystems might have the highest evolutionary potential (**Forest *et al.*, 2007**) at present. Orchids are one of the most illegally traded groups due to their high market value as an ornamental plant and one that is highly sensitive to disturbances in their native ecosystems (**Parra-Sánchez & Banks-**

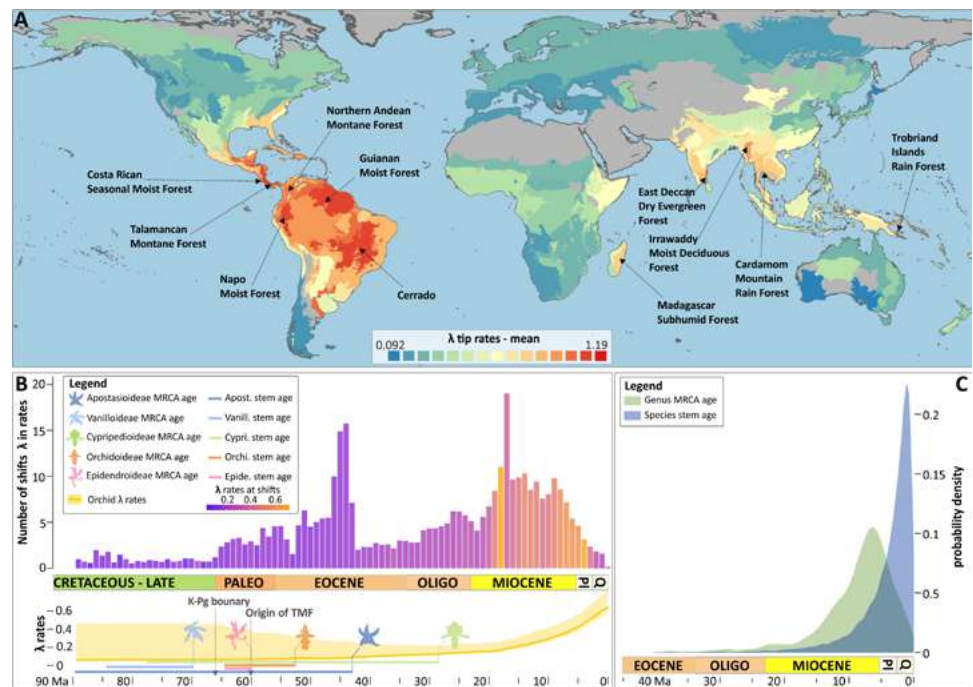


Figure 3. A) Global patterns of mean speciation (λ) tip rates per ecological region as defined by the WWF, derived from the BAMM software; warm colors indicate higher numbers of mean λ tip rates per ecological region whereas cold colors indicate lower mean λ tip rates. The highlighted geographical areas indicate eleven ecoregions with the highest mean λ tip rates (Inset: Maximum and minimum λ tip rate values for ecoregions containing 100 or more geographical distribution records for which λ tip rates were linked). Modified from **Pérez-Escobar *et al.* (2024)**. **B)** Speciation dynamics of the orchid family through time. The bar plot indicates the number of shifts in speciation rates through time (in intervals of 10 Ma). The intensity of the bar color represents the average speciation rate at a given interval, with warm colors indicating higher speciation rates. The line plot at the bottom reveals variation in speciation rates through time, with the shaded area indicating confidence in the estimated rate at a given time period. **C)** The age of modern orchid diversity (species and genera) as inferred from branch lengths obtained from ten Posterior Probability species trees. Modified from **Pérez-Escobar *et al.* (2024)**

Leite, 2020). Our analyses on the age of origin of modern orchid diversity, indicated by branch lengths of the tree tips, suggest that this diversity mostly originated during the last 5 Ma (Figure 3C). This timing starkly contrasts with faster extinction rates estimated for plants (~600 species in the last 250 years) (Humphreys *et al.*, 2019). This stresses the urgent need to preserve orchid natural habitats, in particular those that might exhibit higher evolutionary potential to support greater orchid diversity.

Although assembling a comprehensive orchid tree of life remains an ongoing task that is far from complete, our study provides a solid foundation upon which a densely sampled and robust framework, built from different sequencing datasets, can be constructed in a time-efficient manner. Expanded versions of the orchid tree of life will enable the establishment of more solid and definitive taxonomic classifications and support family-wide research on the evolution of key innovations linked to the extraordinary diversification of the orchid family.

Oscar A. Pérez-Escobar¹, Diego Bogarín^{2,3}, Carlos Jaramillo⁴

¹Royal Botanic Gardens, Kew, TW9 3AE, London, UK

²Lankester Botanical Garden, University of Costa Rica, Costa Rica

³Naturalis Biodiversity Centre, Leiden, The Netherlands

⁴Smithsonian Tropical Research Institute, Panama City, Panama

References

- Ackerman, J., Phillips, R.D., Tremblay, R.L., Karremans, A., Reiter, N., Peter, C.I., Bogarín, D., Pérez-Escobar, O.A., Liu, H. (2023). Beyond the various contrivances by which orchids are pollinated: global patterns in orchid pollination biology. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 202, 295-324.
- Baker, W.J. & Couvreur, T.L.P. (2012). Global biogeography and diversification of palms sheds light on the evolution of tropical lineages. II. Diversification history and origin of regional assemblages. *Journal of Biogeography*, 40, 286-298.
- Bateman, R.M., Hollingsworth, P.M., Preston, J., Yi-Bo, L., Pridgeon, A.M., Chase, M.W. (2003). Molecular phylogenetics and evolution of Orchidaceae and selected Habenariaceae (Orchidaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 142, 1-40
- Bateman RM, Rudall PJ, Murphy ARM, Cowan RS, Devey DS, Pérez-Escobar OA. (2021). Whole plastomes are not enough: phylogenomic and morphometric exploration at multiple demographic levels of the bee orchid clade *Ophrys* sect. *Sphogodes*. *Journal of Experimental Botany*, 72, 654-681.
- Bogarín, D., Pérez-Escobar, O.A., Karremans, A.P., Fernández, M., Kruzinga, J., Pupulin, F., Smets, E., Gravendeel, B. (2019). Phylogenetic comparative methods improve the selection of characters for generic delimitations in an hyperdiverse Neotropical orchid clade. *Scientific Reports*, 9, 15098.
- Bouckaert, R., Vaughan, T., Barido-Sottani, J., Duchene, S., Fourment, M., Gavryushina, A., Heled, J., Jones, G., Kuhnert, D., De Maio, N., Matschiner, M., Mendes, F.K., Muller, N.F., Ogilvie, H.A., du Plessis, L., Poppinga, A., Rambaut, A., Rasmussen, D.A., Siveroni, I., Suchard, M., Wu, Ch-H., Xie, D., Zhang, C., Stadler, T., Drummond, A.J. (2019). BEAST 2.5: an advanced software platform for Bayesian evolutionary analysis. *PLoS Computational Biology*, 15(4), e1006650.
- Burgener, L., Hyland, E., Reich, R.J., Scotese, C. (2023). Cretaceous climates: mapping paleo-Köppen climatic zones using a Bayesian statistical analysis of lithologic, paleontologic and geochemical proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 613, 111373.
- Caffaso, D. & Cozzolino, W.S. (2004). Chloroplast DNA inheritance in the orchid *Anacamptis palustris* using single-seed- polymerase chain reaction. *Journal of Heredity*, 96, 66-70.
- Cámara-Leret, R., Frodin, D. G., Adema, F., Anderson, C., Appelhans, M. S., Argent, G., Arias Guerrero, S., Ashton, P., Baker, W. J., Barfod, A. S., Barrington, D., Borsova, R., Bramley, G. L. C., Briggs, M., Buerki, S., Cahen, D., Callmander, M. W., Cheek, M., Chen, C. W., Conn, B J., Coode, M. J. E.... van Welzen, P. C. (2020). New Guinea has the world's richest island flora. *Nature*, 584(7822), 579-583. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2549-5>

- Cameron, K.M., Chae, M.W., Whitten, M.W., Kore, P.J., Jarrell, D.C., Albert, V.A., Yukawa, T., Hillis, H., Goldman, D.H.** (1999). A phylogenetic analysis of the Orchidaceae: evidence from *rbcL* nucleotide sequences. *American Journal of Botany*, 86, 208-224.
- Chang, J., Rabosky, D.L., Alfaro, M.E.** (2020). Estimating diversification rates on incompletely sampled phylogenies: theoretical concerns and practical solutions. *Systematic Biology*, 69, 602-611.
- Chase, M.** (2001). The origin and biogeography of Orchidaceae. In: Pridgeon AM, Cribb PJ, Chase MW, Rasmussen FN (eds). *Genera Orchidacearum*: vol. 2. Orchidoideae (part one). Oxford University Press.
- Chase, M.W., Cameron, K.M., Freudenstein, J.V., Pridgeon, A.M., Salazar, G., van den Berg, C., Schuiteman, A.** (2015). An updated classification of Orchidaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 177, 151-174.
- Chase, M.W., Schuiteman, A., Kumar, P.** (2021). Expansion of the orchid genus *Eulophia* (Eulophiinae; Epidendroideae) to include *Acrolophia*, *Cymbidiella*, *Eulophiella*, *Geodorum*, *Oeceoclades* and *Paralophia*. *Phytotaxa*, 491, 159-168.
- Cusimano, N. & Renner, S.S.** (2014). Ultrametric trees or phylograms for ancestral state reconstruction: does it matter? *Taxon*, 63(4), 721-726
- Darwin C.** (1862). *On the various contrivances by which British and foreign orchids are fertilised by insects*. John Murray.
- Dressler R.** (1993). *Phylogeny and classification of the orchid family*. Cambridge University Press.
- Estrada-Ruiz, E. & Cevallos-Ferriz, S.R.S.** (2009). *Palmoxylon enochii* sp. nov. de la formación Olmos (Campanioano superior-Maastrichtiano inferior), Coahuila, México. *Ameghiniana*, 46, 577-585.
- Forest, F., Grenyer, R., Rouget, M., Davies, T.J., Cowling, R.M., Faith, D.P., Balmford, A., Manning, J.C., Proches, S., van der Bank, M., Reeves, G., Hedderon, T.A.J., Savolainen, V.** (2007). Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. *Nature*, 445, 757-760.
- Freudenstein, J.V., van den Berg, C., Goldman, D.H., Kores, P.J., Molvray, M., Chase, M.W.** (2004). An expanded plastid phylogeny of Orchidaceae and analysis of jackknife branch support strategy. *American Journal of Botany*, 91, 149-157.
- Givnish, T.J., Spalink, D., Ames, M., Lyon, S.P., Hunter, S.J., Zuluaga, A., Iles, W.J.D., Clements, M.A., Arroyo, M.T.K., Leebens-Mack, J., Endara, L., Kriebel, R., Neubig, K.M., Whitten, W.M., Williams, N.H., Cameron, K.M.** (2015). Orchid phylogenomics and multiple drivers of their extraordinary diversification. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282, 20151553.
- Givnish, T.J., Spalink, D., Ames, M., Lyon, S.P., Hunter, S.J., Zuluaga, A., Doucette, A., Giraldo, G., McDaniel, J., Clements, M.A., Arroyo, M.T.K., Endara, L., Kriebel, R., Williams, N.H., Cameron, K.M.** (2016). Orchid historical biogeography, diversification, Antarctica and the paradox of orchid dispersal. *Journal of Biogeography*, 43 (10), 1905-1916.
- Hinsley, A., de Boer, H., Fay, M.F., Gale, S.W., Gardiner, L.M., Gunasekara, R., Kumar, P., Masters, S., Metusala, D., Roberts, D.L., Veldman, S., Wong, S., Phelps, J.** (2017). A review of trade in orchids and its implications for conservation. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 186, 435-455
- Li, Y-X., Li, Z-H., Schuiteman, A., Chase, M.W., Li, J-W., Huang, W-Ch., Hidayat, A., Wu, Sh-SH., Jin, X-H.** (2019). Phylogenomics of Orchidaceae based on plastid and mitochondrial genomes. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 139, 106540.
- Liu, J.W., Milet-Pinheiro, P., Gerlach, G., Ayasse, M., Nunes, C.E., Alves-dos-Santos, I., Ramírez S.** (2023). Macroevolution of floral scent chemistry across radiations of male euglossine bee-pollinated plants. *Evolution*, 78, 98-110.
- Martins, A., Bochorny, T., Pérez-Escobar, O.A., Chomicki, G., Monteiro, S., Smidt, E.C.** (2018). From tree tops to the ground: Reversals to terrestrial habit in *Galeandra* orchids (Epidendroideae: Catasetinae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 127, 952-960.
- Parra-Sánchez, E. & Banks-Leite, C.** (2020). The magnitude and extend of edge effects on vascular epiphytes across the Brazilian Atlantic Forest. *Scientific Reports*, 10, 18847.
- Pramanik, D., Becker, A., Roessner, C., Rupp, O., Bogarín, D., Pérez-Escobar, O.A., Dirks-Mulder, A., Droppert, K., Kocyan, A., Smets, E., Gravendeel, B.** (2023). Evolution and development of fruits of *Erycina pusilla* and other orchid species. *PLoS ONE* 18:e0286846.
- Pérez-Escobar, O.A., Gottschling, M., Chomicki, G., Condamine, F.L., Klitgaard, B.B., Pansarin, E., Gerlach, G.** (2017). Andean mountain building did not preclude dispersal of lowland epiphytic orchids in the Neotropics. *Scientific Reports* 7, 4919.

- Pérez-Escobar, O.A., Dodsworth, S., Bogarín, D., Balbuena, J.A., Schley, R.J., Kikuchi, I.Z., Morris, S.K., Epitawalage, N., Cowan, R., Maurin, O., Zuntini, A., Arias, T., Serna-Sánchez, A., Gravendeel, B., Torres, M.F., Nargar, K., Chomicki, G., Chase, M.W., Leitch, I.J., Forest, F., Baker, W.J.** (2021). Hundreds of nuclear and plastid loci yield novel insights into orchid relationships. *American Journal of Botany*, 108, 1166-1180.
- 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, 1-12.
- Pérez-Escobar, O.A., Bogarín, D., Przelomska, N.A.S., Ackerman, J.D., Balbuena, J.A., Bellot, S., Bühlmann, R.P., Cabrera, B., Cano, J.A., Charitonidou, M., Chomicki, G., Clements, M.A., Cribb, P., Fernández, M., Flanagan, N.S., Gravendeel, B., Hágsater, E., Halley, J.M., Hu, A-Q., Jaramillo, C., Mauad, A.V., ..., Antonelli, A.** (2024). The origin and speciation of orchids. *New Phytologist*, 242, 700-716.
- Rudall, P.J. & Bateman, R.M.** (2002). Roles of synorganisation, zygomorphy and heterotopy in floral evolution: the gynostemium and labellum of orchids and other lilioid monocots. *Biological Reviews*, 77, 403-441.
- Serna-Sánchez, M., Pérez-Escobar, O.A., Bogarín, D., Torres-Jiménez, M.F., Álvarez-Yela, A.C., Arcila-Galvis, J.E., Hall, C., de Barros, D., Pinheiro, F., Dodsworth, S., Chase, M.W., Antonelli, A., Arias, T.** (2021). Plastid phylogenomics resolves ambiguous relationships within the orchid family and provides a solid timeframe for biogeography and macroevolution. *Scientific Reports*, 11, 6858.
- Seyler, B.S., Gaouse, O.G., Tang, Y., Duffy, D.C., Aba, E.** (2020). Collapse of orchid populations altered traditional knowledge and cultural cultivation in Sichuan, China. *Anthropocene*, 29, 100236.
- Tietje, M., Antonelli, A., Baker, W.J., Govaerts, R., Smith, S.A., Eiserhardt, W.L.** (2022). Global variation in diversification rate and species richness are unlinked in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 119, e2120662119.
- Turner, A.H., Smith, N.D., Callery, J.A., Ebach, M.** (2009). Gauging the effects of sampling failure in biogeographical analysis. *Journal of Biogeography*, 36, 612-625.
- Van der Niet, T. & Linder, P.H.** (2008). Dealing with incongruence in the quest for the species tree: a case study from the orchid genus *Satyrium*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 47, 154-174.
- Viruel, J., Segarra-Moragues, J.G., Raz, L., Forest, F., Wilkin, P., Sanmartín, I., Catalán, P.** (2015). Late Cretaceous - Early Eocene origin of yams (*Dioscorea*, Dioscoreaceae) in the Laurasian Palaeartic and their subsequent Oligocene-Miocene diversification. *Journal of Biogeography*, 43, 750-672.
- Zhang, G., Hu, Y., Huang, M-Z., Huang, W-C., Liu, D-K., Zhang, D., Hu, H., Downing, J, L., Liu, Z-J., Ma, H.** (2023). Comprehensive phylogenetic analyses of Orchidaceae using nuclear genes and evolutionary insights into epiphytism. *Journal of Integrative Plant Biology*, Vol.? pages? <https://doi.org/10.1111/jipb.13462>

Opinión

Las rotaciones en la escala nanométrica: el efecto Moiré en los materiales 2D

Rotations at the nanoscale: the Moiré effect in 2D materials

Resumen

Desde hace ya varios años los materiales nanométricos bidimensionales (2D) han orientado el interés de los investigadores hacia el estudio cada vez más minucioso de sus propiedades y la forma en que éstas se pueden aprovechar, todo con la finalidad de llevar a niveles increíbles de eficiencia nuestra vida mediante el desarrollo de aplicaciones tecnológicas cada vez más avanzadas. Sin embargo, muy poco se ha revelado sobre un efecto conocido como Moiré, que ha aparecido en materiales 2D, generando propiedades formidables que podrían ser útiles en la recuperación de energía, la eliminación de compuestos utilizando procesos fotocatalíticos o, incluso, en la industria de fotodetectores.

Palabras clave: Rotaciones; Nanoescala; Efecto Moiré; Materiales bidimensionales; Aplicaciones tecnológicas.

Abstract

For several years now, two-dimensional (2D) nanometric materials have directed researchers' interest toward the increasingly detailed study of their properties and how these can be used to make our lives incredibly efficient by developing increasingly advanced technological applications. However, very little has been revealed about an effect known as Moiré that, in 2D materials, has generated super properties that could be useful in the recovery of energy, the elimination of compounds by photocatalytic processes, or even in the photodetector industry.

Keywords: Rotations; Nanoscale; Moiré effect; Bidimensional materials; Technological applications.

De lo macro a lo nano

Hoy la ciencia ha avanzado lo suficiente para permitir la observación de la materia en las formas más pequeñas imaginables con la ayuda de herramientas y equipos que fueron desarrollándose con la única intención de conocer el mundo examinándolo en su esencia. Tales dimensiones sólo se habían manejado en el plano teórico hasta hace unos años, pero actualmente el desarrollo de la escala nanométrica está en auge debido a que muchos de los materiales que se producen en ella presentan propiedades superiores a las de los materiales macro. El prefijo nano proviene del griego “nanus” que significa enano; esta dimensión nanométrica contiene todo aquello que se encuentra entre uno y cien nanómetros (nm) y que, por esta característica, no puede ser observado por el ojo humano. Para tener una comparación clara, un cabello humano tiene un diámetro de cerca de 60.000 nanómetros, es decir, 60 micrómetros (μm), o micras, grosor que para algunos ya es bastante difícil de captar con los ojos. Los materiales nanométricos miden entre mil y diez mil veces menos. **(Figura 1)**. En este artículo nos centraremos en los materiales bidimensionales, por ejemplo, el grafeno, material que, apilado en capas, forma el grafito que usamos en los lápices. Para darnos una idea de la delgadez del grafeno, un “edificio” de aproximadamente 600.000 pisos de grafeno mediría lo mismo que el diámetro de un cabello. Si construyéramos un edificio con ese número de pisos, su altura sería cercana a los 3 mil kilómetros, ¡similar al radio del planeta Marte! Estas comparaciones han originado una serie de inquietudes

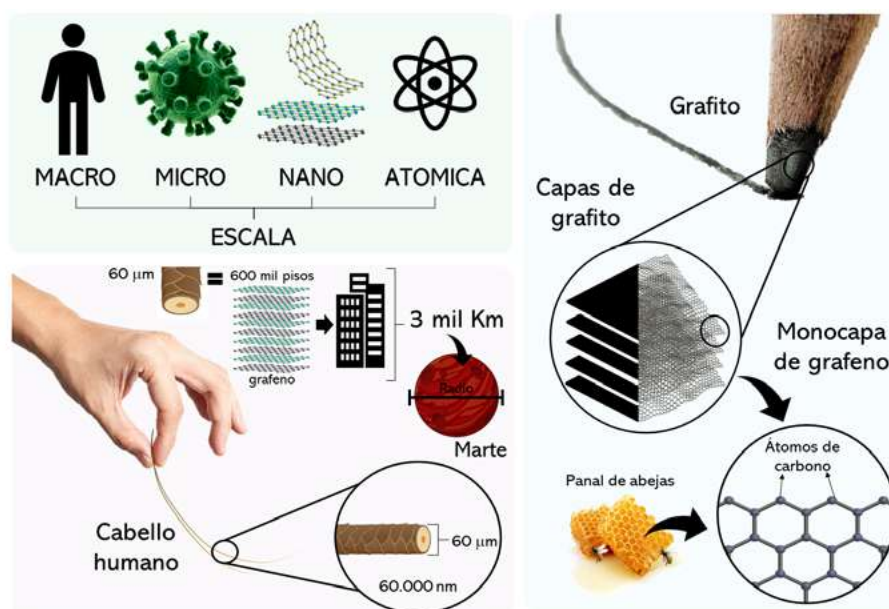


Figura 1. Ejemplos de las escalas macro, micro, nano y atómica. Comparación del tamaño de un cabello con el tamaño y la forma de las capas de grafeno presentes en el grafito.

en la comunidad científica, obligando a los investigadores a buscar respuestas sobre los materiales no sólo en la escala atómica, sino en la nanométrica, con miras a desarrollar nuevas y mejores aplicaciones.

Como se ha mencionado, el grafeno es un constituyente del grafito, material que usamos en los lápices, un pariente no muy lejano del carbón con el que preparamos ricas carnes asadas. Ambos están compuestos de átomos de carbono, arreglados de manera muy similar, aunque, estructuralmente hablando, el caso del grafeno es más que peculiar, pues en su espesor atómico está compuesto sólo por átomos de carbono densamente empaquetados de forma laminar que forman una red cristalina hexagonal similar a la de un panal de abejas. Este material se había estudiado teóricamente durante décadas, pero no fue sino hasta el 2004 cuando un equipo de investigadores en Manchester, Reino Unido, liderado por los doctores rusos Andre Geim y Konstantin Novoselov, logró aislar el grafeno hasta obtenerlo en su forma de una capa. Geim y Novoselov cuentan que un viernes en la tarde, cuando la universidad estaba prácticamente vacía y ellos seguían trabajando, lograron este hito: usando cinta adhesiva exfoliaron una monocapa de grafeno y comenzaron a medir sus propiedades electrónicas. El resto es historia. Se desencadenó una revolución en la ciencia de materiales que ha generado miles de combinaciones de compuestos bidimensionales con extraordinarias propiedades mecánicas, químicas, electrónicas, ópticas, etc., y tomaron por asalto miles de laboratorios alrededor del mundo donde se han hecho avances como los que comentaremos en este artículo. En el 2010, Geim y Novoselov fueron galardonados con el Premio Nobel de Física por sus experimentos innovadores relacionados con el material bidimensional grafeno (Brownson *et al.*, 2012).

Los materiales bidimensionales (2D)

El estudio de los materiales 2D se ha disparado en los últimos años debido a que se han podido sintetizar diversos compuestos con una o varias capas atómicas, que se conocen como materiales de capas monoatómicas o ultradelgados, cuyo espesor puede variar entre 0,1 y 1 nm si se encuentra entre una o varias capas de átomos. La unidad exacta para referirse a estos tamaños es una medida conocida como Ångström (Å), que normalmente se utiliza para indicar las distancias entre los átomos de una molécula. Los materiales

2D más ampliamente estudiados además del grafeno son los dicalcogenuros de metales de transición (*transition-metal dichalcogenide*, TMD), nombre que puede parecer un trabalenguas, pero que en realidad denota una serie de compuestos formados por átomos de dos elementos específicos con la forma MX_2 : primero, un M, que es un metal de transición (Mo, W, etc.) y, segundo, un X, que es un calcógeno (S, Se, o Te). Los metales de transición se encuentran en la parte central de la tabla periódica (por ejemplo, Mo y W en familia VI-B) y los calcógenos en la familia VI-A, justo debajo del oxígeno (Figura 2).

Los TMD tienen una particular cristalinidad, es decir, están formados por patrones de átomos que, repitiéndose en dos dimensiones, pueden llenar grandes áreas sin dejar huecos, como es el caso ya mencionado de la estructura repetitiva hexagonal de un panal de abejas, o el piso de mosaicos de muchas cocinas o baños. El ejemplo más claro de un compuesto cristalino es la sal de mesa, o NaCl (Figura 2), la cual forma una estructura ordenada con posiciones muy específicas. Los sólidos cristalinos, específicamente, se forman con una estructura mínima conocida como celda unitaria que se repite a lo largo del espacio como si se tratara de armar un mosaico en una pared con pequeños azulejos similares y que, vistos desde cualquier dirección, tendrían la misma estructura. Estos materiales cristalinos, o muy ordenados, poseen diversas propiedades fisicoquímicas que los hacen interesantes para su estudio y aplicación. Algunas de estas propiedades son eléctricas, ópticas o magnéticas y dependen de las estructuras periódicas y los átomos que se usen para su formación, es decir, la estructura del material y la distribución de los electrones de los átomos que forman el cristal son de vital importancia para entender qué ocurre a nivel atómico y cómo se revelan las propiedades únicas a nivel macro.

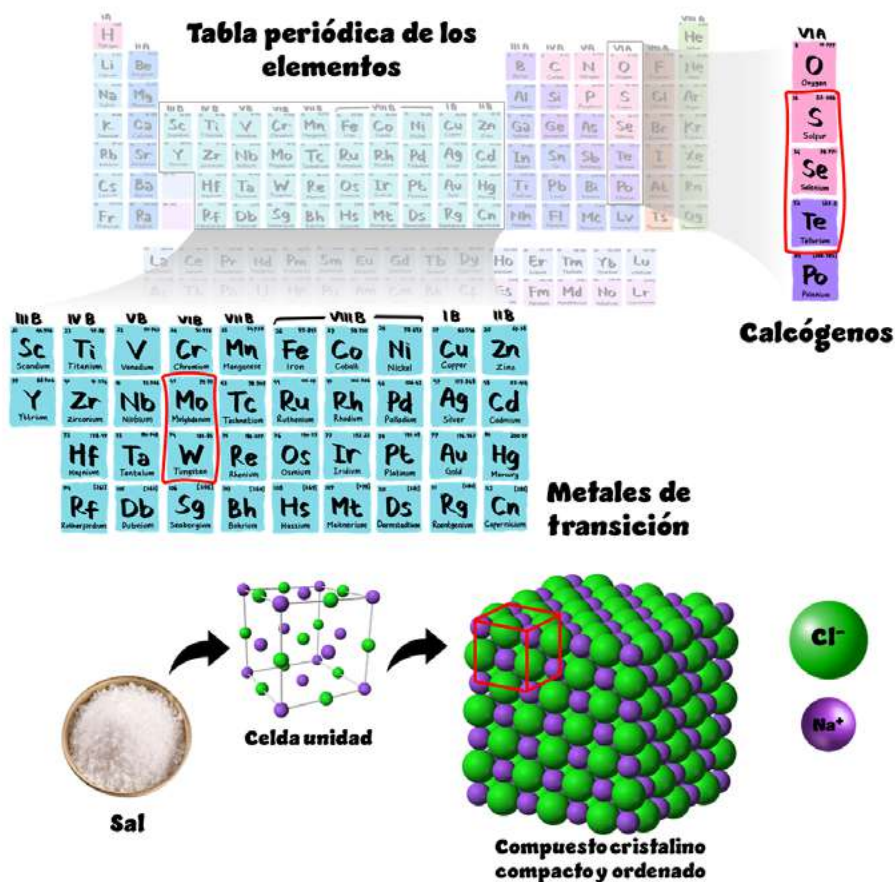


Figura 2. Tabla periódica de los elementos que muestra los metales de transición y calcógenos como elementos de estudio. Ejemplo de materiales cristalinos y sus patrones repetitivos

Los dicalcogenuros de metales de transición

Los TMD tienen propiedades interesantes, por lo que se ha experimentado ampliamente con su fabricación y síntesis (imaginen lo difícil que es “armar” estas capas atómicas), para poder usarlos en diversas aplicaciones, como la conversión de energía y los sensores. Entre algunas de las propiedades más destacadas de los TMD mencionaremos tres:

1. Rápida y eficiente conversión de energía solar a eléctrica (**Ferrante *et al.*, 2022**), lo que los convierte en piezas fundamentales con aplicaciones potenciales en paneles fotovoltaicos; además, son súper delgados y transparentes, propiedades que también se buscan en dichos paneles.
2. Capacidad de cambiar o tunear su transparencia a la luz y a la forma de transmitir la electricidad, por lo que tienen un papel importante en la nueva óptica y la fotoelectrónica (**Ermolaev *et al.*, 2020**).
3. Propiedades mecánicas y tribológicas que les permiten funcionar como excelentes lubricantes sólidos, o en transistores o fototransistores aprovechando el tuneo de propiedades electrónicas cuando se estira o comprime el material (**Zhu *et al.*, 2013**).

Debido a estas características, los TMD se conocen por sus aplicaciones en electrónica, transistores, generación termoeléctrica, optoelectrónica, fotodetección, fotoluminiscencia, y un largo etcétera.

Las técnicas de obtención de materiales 2D

El primer método que se usó para obtener estos materiales es el que Geim y Novoselov utilizaron para obtener una capa de grafeno. La idea es realizar una exfoliación mecánica a partir de un cristal tridimensional, básicamente utilizando cinta adhesiva, repitiendo la separación hasta que se obtenga una monocapa. Mediante este método se obtienen capas de bajo rendimiento, que generalmente se producen como escamas de formas impredecibles y pocas micras de longitud. La dificultad de este método de obtención de monocapas por exfoliación se debe a que entre ellas hay una pequeña fuerza de atracción, muy pequeña, pero lo suficientemente intensa para mantener ensamblado el material en capas. Es similar a lo que se sucede cuando se intenta desprender un piso de piezas de LEGO apiladas utilizando una de ellas; con la exfoliación no es posible saber cuándo se ha de obtener una monocapa, lo que hace que el método sea lento si se compara con el depósito de vapores químicos (*Chemical Vapour Deposition*, CVD), una excelente alternativa que explicaremos a continuación.

En el caso del CVD, no partimos de un cristal que contenga inmersa la monocapa, sino que la idea es seleccionar compuestos químicos que sean reactivos y contengan metales de transición y calcógenos. La **figura 3** muestra un dispositivo clásico para la obtención de TMD mediante la técnica de CVD. Se pueden observar dos zonas de calentamiento, en la primera se lleva a cabo la evaporación del precursor 1 (calcógeno), de manera que éste interactúe con el precursor 2 (metal de transición) en la zona de calentamiento 2. Esta interacción es posible gracias al flujo de un gas inerte (como el argón) que desplaza los átomos acumulados en forma gaseosa a través del tubo de reacción y los deposita finalmente sobre los sustratos, que pueden ser de distinta naturaleza (vidrio, óxido de silicio, etc.). Pongamos el ejemplo del disulfuro de molibdeno (MoS_2), el cual se puede formar con unos 100 mg de azufre (precursor 1) y otros 5 mg de óxido de molibdeno (precursor 2). El precursor 1 sigue una rampa de calentamiento relacionada con su punto de fusión, mientras que el precursor 2 se mantiene en otra que permite tener los dos disponibles en las cantidades y momentos necesarios. Así, una vez que hayan reaccionado entre ellos, podrá transportarse el producto hasta los sustratos. Al modificar los parámetros de la fabricación o síntesis (flujo del gas, cantidad de precursores, temperaturas en las zonas de calentamiento y tiempo de reacción) se pueden generar crecimientos de monocapas, bicapas o multicapas de diversos TMD. Las capas se depositan a lo largo de áreas que pueden ser muy extensas y con formas geométricas y cristalinas controladas, permitiendo la formación de monocapas

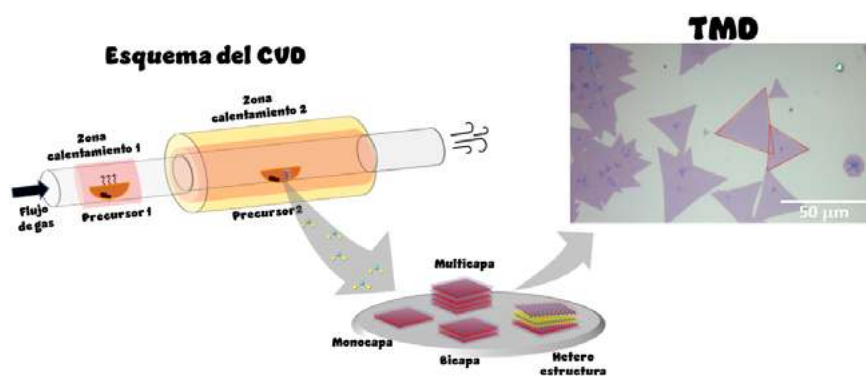


Figura 3. Esquema de la técnica de depósito de vapor químico (CVD) para la obtención de dicalcogenuros de metales de transición (TMD)

triangulares, romboédricas o hasta con forma de estrellas. En la parte derecha de la **figura 3** se observan triángulos monocapa de MoS_2 , que fueron generados por CVD a partir de este y azufre y evaporados a $750\text{ }^\circ\text{C}$ y $220\text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente, y luego depositados en un material parecido al vidrio. En la foto tomada con un microscopio óptico simple, se observan los MoS_2 en morado y el sustrato de fondo en amarillo.

Quizás es contraintuitivo que estas estructuras, con apenas algunos átomos de grosor, puedan observarse con un microscopio óptico. En la foto de la imagen, el triángulo central tiene un área similar a la del corte transversal de un cabello humano. Estas monocapas cristalinas pueden verse con una lupa o, en algunos casos, incluso a simple vista. Sin embargo, lo que vemos realmente es el contraste que tienen con el sustrato, pero si lo que se quiere es conocer su grosor o estudiar su composición y estructura cristalina a escala nanométrica, hay que ir más allá de lo observable por el ojo humano. La búsqueda de herramientas que faciliten estas observaciones ha llevado a los investigadores a explorar y desarrollar técnicas cada vez más fáciles de usar. Así, se utilizan microscopios que pueden ver más allá de los equipos convencionales y permiten descubrir si el material sintetizado es el correcto. Debido a que estas técnicas son más extensas y de manejo más complejo, se recomiendan algunas lecturas para facilitar su uso, aunque pueden mencionarse algunos como el microscopio electrónico de barrido (SEM), el microscopio de fuerza atómica (AFM), y el microscopio electrónico de transmisión (TEM). Estos son los más comunes, pero hay otros que permiten observar diversas propiedades y defectos de los materiales, y que no abordaremos en el presente artículo.

Materiales 2D transformados en heteroestructuras

Aunque los TMD ya tienen muchas aplicaciones, los científicos han querido ir un paso más allá, apilando capas de diferentes materiales 2D para estudiar sus características, con el fin de conseguir un supermaterial. Sin embargo, una vez que el material 2D en monocapa ha sido sintetizado, es muy complicado moverlo desde la superficie donde creció. Esto se debe a que, aunque el material tiene un área superior en "x/y" en el rango de las micras, el espesor o área en "z" es de unos escasos nanómetros, como ya se explicó. Esto conlleva un problema muy difícil de solucionar, puesto que cualquier movimiento brusco desprendería el material de la superficie y lo dejaría vulnerable al daño. Así como con el grafeno, la forma más conocida de exfoliar una capa de este material es usando un plástico especial, similar a la cinta adhesiva, que permite desprender una sola capa del material mediante un procedimiento muy delicado. Este método es muy parecido a los tatuajes temporales con los que los niños juegan usando un papel adhesivo como una estampa que transfiere el tatuaje al lugar escogido de su cuerpo. De la misma forma en que se colocan los tatuajes temporales en zonas particulares, la transferencia de monocapas de compuestos cristalinos se hace para adherirlos a la superficie deseada y, así, crear un nuevo dispositivo electrónico

o un sensor óptico. Asimismo, se pueden ir apilando arbitrariamente diversos materiales 2D hasta formar heteroestructuras más complejas, que darán pie a nuevas propiedades, directamente relacionadas con las características de las capas, y a un sinfín de rutas de análisis para corroborar el supermaterial que se está sintetizando.

Heteroestructuras y efecto Moiré

Cuando las monocapas de los TMD son apiladas una encima de otra para formar heteroestructuras, un interesante efecto llamado patrón o efecto Moiré, puede emerger de ese posicionamiento. Como se observa en la **figura 4**, cuando dos patrones periódicos se superponen y se rotan en diferentes ángulos, es posible observar un nuevo patrón, más complejo y con mayor consistencia gráfica. Si se traslada este fenómeno a las monocapas de materiales 2D, se pueden encontrar aplicaciones extremadamente prometedoras para estudiar fenómenos electrónicos, ópticos o de recuperación de energía. Para poder observar estos fenómenos, algunos investigadores “mueven” las capas en diferentes ángulos, llamados ángulos mágicos, y luego, a temperatura ambiente, los iluminan con una luz (por lo general infrarroja) que tiene un tamaño nanométrico. Cuando la luz toca los átomos y estos se excitan, se comprueba que se comportan de forma muy diferente a los habituales. Ello se debe a una desviación íntimamente relacionada con un movimiento peculiar de los electrones dentro de la superred de Moiré que se forma en la heteroestructura. Para explicarlo de manera esquematizada, en la **figura 4** se muestran dos capas superpuestas cuyo centro genera un patrón completamente diferente, o de Moiré, que posee características únicas y distintas a los patrones originales. Si bien este efecto parece ser uno completamente óptico a escala macrométrica, actualmente diversos estudios han demostrado que las rotaciones en sistemas nanométricos producirían cambios en las estructuras de los materiales, como ha sucedido con el grafeno y en materiales 2D como el MoS_2 , WSe_2 y otros (Najafidehaghani *et al.*, 2021).

Aplicaciones en la vida diaria

Actualmente existe una demanda gigantesca por la producción de nuevos materiales con potencial para usarse en dispositivos electrónicos (por ejemplo, celulares) y optoelectrónicos (por ejemplo, sensores). Dichos materiales han exigido muchas especificaciones, a manera de una síntesis escalable, que exigen que las capas de TMD sean uniformes y de alta calidad, asociada ésta a su elevada cristalinidad, es decir, a la pureza de la formación; que tengan un gran tamaño de dominio, o sea, de la relación superficial del crecimiento; que estén libre de defectos y, que, además, los márgenes de grano sean limitados, en otras palabras, un que tengan ordenamiento empacado. Para las nuevas generaciones de científicos, el interés en los TMD ha florecido irremediablemente debido a las numerosas y posibles aplicaciones de dichos materiales en moduladores, detectores ópticos, absorbentes de metamateriales y

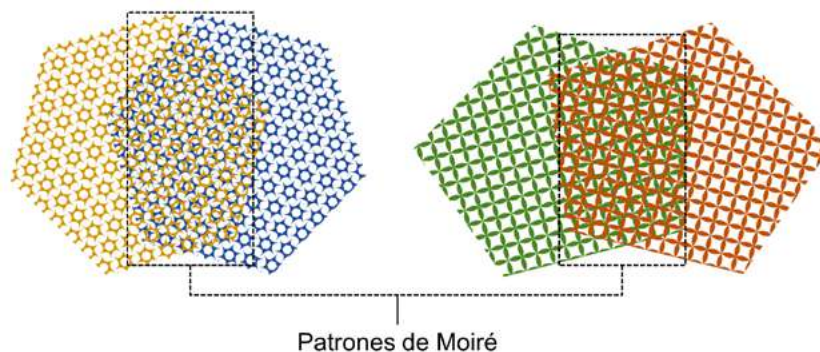


Figura 4. Representación del efecto Moiré sobre un patrón con un diseño superpuesto en diferentes ángulos

emisores, gracias a sus extraordinarias características eléctricas y ópticas que les permiten mejorar y mantener la absorción de luz con estabilidad a altas temperaturas. Esto ha abierto un gran abanico de posibilidades para los TMD en una gama de aplicaciones para la captación de energía, la detección y la fotocatalisis, necesarias hoy debido a los altos índices de contaminación y la escasez de recursos renovables.

Contribución de los autores

Todos los autores colaboraron en la escritura, revisión y elaboración de las figuras del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen ningún conflicto de intereses que pueda influir en la transparencia u objetividad del proceso de revisión por pares o la publicación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al programa de apoyo “Investigación en Verano” de la Universidad Iberoamericana, al proyecto Sinergias No. 1564464 y al proyecto de estancia posdoctoral del CONAHCYT (CVU 738128).

• Josué David Hernández-Varela¹, • Felipe Cervantes-Sodi²,
• Skarleth Estefanía García-Trujillo¹

¹ Departamento de Física y Matemáticas, Universidad Iberoamericana, Ciudad de México, México.

² Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

Editor asociado: Edgar González, Ph. D.

Referencias

- Brownson, D. A. C., Kampouris, D. K., Banks, C. E. (2012). Graphene electrochemistry: Fundamental concepts through to prominent applications. In *Chemical Society Reviews*, 41 (21). <https://doi.org/10.1039/c2cs35105f>
- Ermolaev, G. A., Stebunov, Y. V., Vyshnevyy, A. A., Tatarkin, D. E., Yakubovsky, D. I., Novikov, S. M., Baranov, D. G., Shegai, T., Nikitin, A. Y., Arsenin, A. V., Volkov, V. S. (2020). Broadband optical properties of monolayer and bulk MoS₂. *Npj 2D Materials and Applications*, 4(1), 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41699-020-0155-x>
- Ferrante, C., Di Battista, G., Parra-López, L. E., Batignani, G., Lorchat, E., Virga, A., Berciaud, S., Scopignod, T. (2022). Picosecond energy transfer in a transition metal dichalcogenide-graphene heterostructure revealed by transient Raman spectroscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(15), 1-7. <https://doi.org/10.1073/pnas.2119726119>
- Najafidehaghani, E., Gan, Z., George, A., Lehnert, T., Ngo, G. Q., Neumann, C., Bucher, T., Staude, I., Kaiser, D., Vogl, T., Hübner, U., Kaiser, U., Eilenberger, F., Turchanin, A. (2021). 1D p-n junction electronic and optoelectronic devices from transition metal dichalcogenide lateral heterostructures grown by one-pot chemical vapor deposition synthesis. *Advanced Functional Materials*, 31(27), 1-9. <https://doi.org/10.1002/adfm.202101086>
- Zhu, C. R., Wang, G., Liu, B. L., Marie, X., Qiao, X. F., Zhang, X., Wu, X. X., Fan, H., Tan, P. H., Amand, T., Urbaszek, B. (2013). Strain tuning of optical emission energy and polarization in monolayer and bilayer MoS₂. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 88(12), 1-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.121301>

Opinión

Fuego y agua: cambio global, resiliencia de los bosques y riesgo del punto de no retorno para la Amazonía

Fire and water: global change, forest resilience, and the risk of the point of no return for the Amazon

El bosque amazónico, uno de los ecosistemas más antiguos y biodiversos del planeta, esencial para la circulación del agua y el clima, enfrenta un punto crítico en su existencia (**Figura 1**). En años recientes, la Amazonía, bastión ecológico y corazón de la Tierra, ha sido azotada por incendios devastadores, exacerbados por el cambio climático y actividades humanas cada vez más intensivas (**Figura 2**). Estos incendios no sólo amenazan su vasta biodiversidad, también ponen en peligro la estabilidad climática regional y global. Es una región del planeta donde el fuego no ha sido parte de la evolución de los ecosistemas, pero sí de las prácticas de las comunidades que la habitan. Numerosos pueblos indígenas utilizaban el fuego antes de la llegada de los colonizadores europeos con diversos fines: facilitar el acceso a lugares de uso, desplazarse, cazar y realizar rituales, así como para la producción agrícola y la protección de sus aldeas (**Berlinck & Batista, 2020a**). No obstante, su uso ha sido radicalmente transformado por prácticas agrícolas expansivas y otras intervenciones humanas cada vez más intensivas. Esto ha hecho que los incendios sean ahora más frecuentes y severos, acelerando la pérdida de biodiversidad y liberando enormes cantidades de dióxido de carbono que deterioran la calidad del aire y alteran los ciclos hidrológicos y climáticos a nivel local, regional y global.

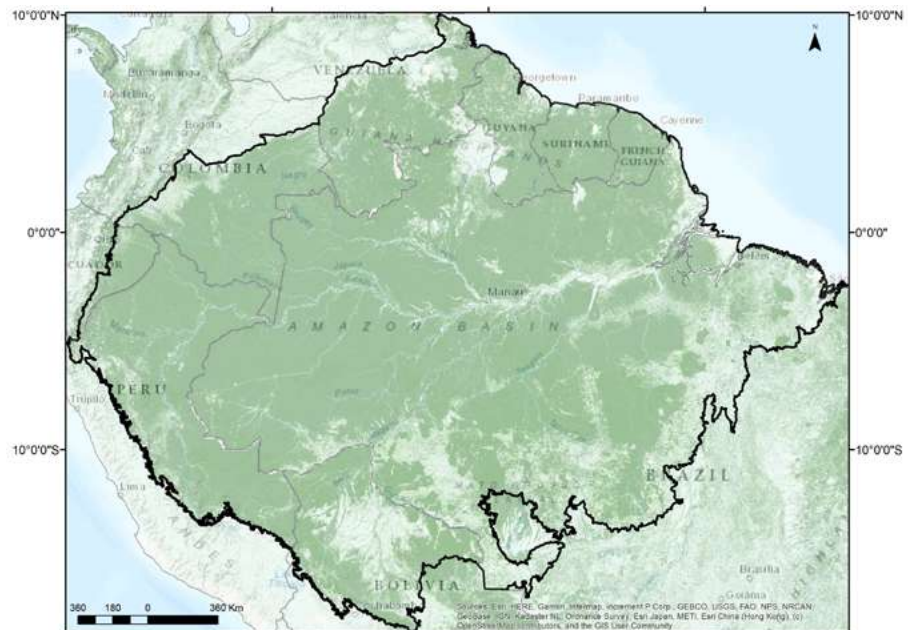


Figura 1. Distribución del bosque tropical en el bioma amazónico 2020. Elaboración propia. Fuente datos: Global Forest Watch (GFW), Tropical tree cover, Resolución 0.5 ha (<https://data.globalforestwatch.org/datasets/gfw::tropical-tree-cover/about>). Límite biomas. RAISG, 2023 - Biomas. Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada <https://www.raisg.org/es/mapas/>

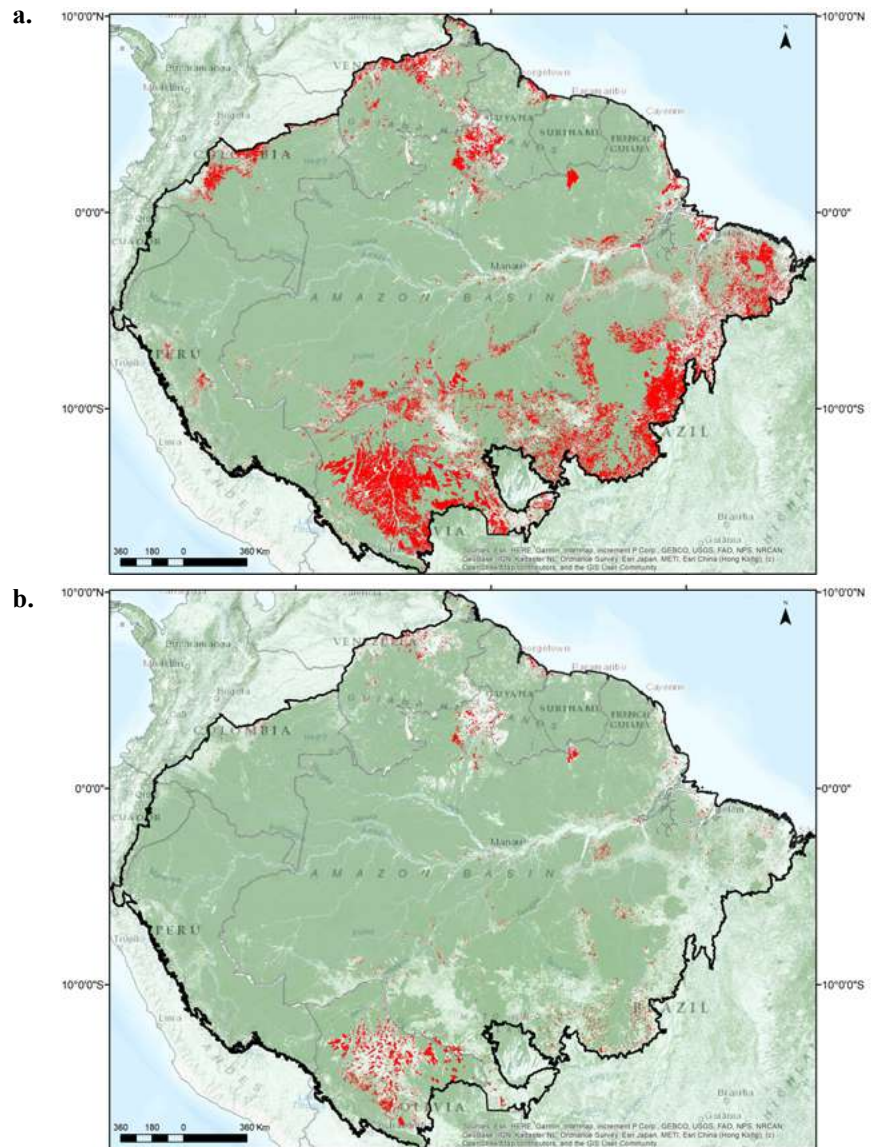


Figura 2. Área quemada **a)** Enero 2001 hasta abril 2024, **b)** Enero 2023 a abril 2024. Elaboración propia. Fuente datos: Google Earth Engine, Catálogo de Datos MODIS producto Área quemada MCD64A1

¿Son suficientes la evolución y la adaptación de los bosques tropicales para resistir perturbaciones y no superar los umbrales críticos?

Los bosques de la Amazonía han desarrollado a lo largo de millones de años un conjunto de estrategias de adaptación complejas para recuperarse de perturbaciones naturales como las inundaciones, las enfermedades y los incendios ocasionales. Estas estrategias incluyen la gran diversidad genética, la rápida regeneración de plantas, y la intrincada red de interacciones ecológicas que facilitan la resiliencia y la recuperación del ecosistema (Flores *et al.*, 2024). Sin embargo, la situación actual presenta desafíos sin precedentes que amenazan estas adaptaciones naturales. La magnitud de la degradación ambiental, impulsada por una deforestación rampante y un cambio climático acelerado, está poniendo a prueba la capacidad de resiliencia de estos bosques. El cambio climático, en particular, está alterando los patrones de precipitación y aumentando las temperaturas, lo que no sólo

afecta el crecimiento y la salud de las plantas, sino que también cambia la composición de especies del bosque. Estas alteraciones climáticas pueden reducir la humedad del suelo y de la vegetación, incrementando su vulnerabilidad ante los incendios, que históricamente han sido raros y de baja intensidad en estas regiones húmedas.

En Brasil se han determinado los umbrales críticos de los factores de estrés hídrico que podrían desencadenar el colapso forestal y llevar a un punto de no retorno, o de inflexión, en la región amazónica. Estos umbrales críticos están asociados con los siguientes factores (Flores *et al.*, 2024).

- Calentamiento global: hay un rango de umbrales críticos potenciales en el calentamiento global entre los 2 y los 6 °C, más allá de los cuales el sistema forestal amazónico podría enfrentar desafíos significativos.

- Cambios en las condiciones climáticas de los patrones de lluvia (con un umbral de 1.800 mm de lluvia anual), los aumentos de temperatura y la duración de la temporada seca (con un umbral de cinco meses), que podrían exponer el bosque a niveles sin precedentes de déficit de presión de vapor y estrés hídrico (con un umbral de 350 mm), con la posibilidad de llevarlo al colapso forestal.

- Perturbaciones compuestas: el 20 % de la deforestación en la región sigue siendo uno de los umbrales críticos a partir del cual se acelerarían los cambios. Para el 2050, se estima que entre el 10 y el 47 % de los bosques amazónicos estará expuesto a perturbaciones compuestas que pueden desencadenar transiciones ecosistémicas inesperadas, exacerbando el cambio climático regional y aumentando el riesgo de colapso.

Nos encontramos ante un escenario inédito en el que las nuevas interacciones entre el bosque y las condiciones ambientales están impactando la resiliencia del ecosistema amazónico y alterando los mecanismos de retroalimentación que tradicionalmente habían sostenido la estabilidad de estos bosques. Con la región sometida a presiones sin precedentes, como el aumento de las temperaturas, sequías extremas, deforestación e incendios, estos ciclos de retroalimentación y los cambios en los mecanismos de interacción ecológica pueden, adicionalmente, reducir la vulnerabilidad de los bosques amazónicos ante nuevas perturbaciones y reducen aún más su capacidad de recuperación.

El buen fuego y el mal fuego en la Amazonía

El uso del fuego puede ser beneficioso o perjudicial, dependiendo del contexto y los actores involucrados (Berlinck & Batista, 2020a). En algunos ecosistemas, el fuego cumple una función crucial para mantener la salud ecológica, como en el manejo de combustibles o en la regeneración de especies que dependen del fuego para su reproducción y supervivencia. No obstante, en la Amazonía, donde el fuego es un elemento ajeno, su impacto suele ser mayoritariamente negativo. Las selvas tropicales húmedas, altas y de dosel cerrado de la Amazonía, con su microclima húmedo y elevadas precipitaciones, crean condiciones casi ininflamables, haciendo que los incendios naturales sean prácticamente imposibles, pero a la vez las hace particularmente vulnerables a los efectos del fuego. De hecho, el fuego se considera una de las perturbaciones que podrían desencadenar transiciones ecosistémicas inesperadas en los bosques amazónicos (Flores *et al.* 2024). En este sentido, además de otros factores como las tendencias de calentamiento global, los eventos repetidos de sequías extremas y la permanente deforestación, los incendios pueden contribuir a una mayor vulnerabilidad y posibles transiciones irreversibles del bosque.

El fuego es, todavía, mayoritariamente utilizado como herramienta en la deforestación del bosque amazónico y causa incendios que exacerbaban estos desafíos (Armenteras & Retana, 2012; Armenteras *et al.*, 2013). A diferencia de los incendios naturales, que el bosque podría resistir o incluso aprovechar para ciertos procesos ecológicos, los incendios provocados por actividades humanas son generalmente más intensos y frecuentes. El fuego sigue empleándose para despejar el bosque y convertirlo en pasto o en sistemas agrícolas, una práctica intensificada por su uso ilegal en la expansión de pastizales y el acaparamiento de tierras para la agroindustria. La mayoría de los incendios en el

bosque amazónico están vinculados a delitos ambientales como la ocupación irregular, la apropiación de tierras, la deforestación y, en el caso de Brasil, a conflictos con agencias ambientales (**Berlinck & Batista, 2020b**). Las sequías, cada vez más frecuentes por el cambio climático en la Amazonía, también aumentan el riesgo de incendios al incrementar la flamabilidad y la sequedad del aire y disminuir la humedad en el combustible presente en el bosque, además de reducir la humedad del suelo e, indirectamente, aumentar la mortalidad de la vegetación (**Berlinck & Batista, 2020b**). Más allá de la deforestación, la fragmentación del bosque húmedo tropical no solo aumenta la frecuencia e intensidad de los incendios, sino que también los localiza principalmente en los bordes del bosque, lo que aumenta la vulnerabilidad y el avance de la frontera de colonización (**Armenteras et al., 2013**)

Después de los incendios en la Amazonía, la irreversibilidad de la deforestación tropical

La flora y la fauna amazónicas están gravemente amenazadas por los incendios, ya que se trata de especies que históricamente no evolucionaron ni fisiológica ni morfológicamente para adaptarse al fenómeno. Cuando están asociados a la tala y quema del bosque, los incendios no sólo consumen grandes áreas de bosque talado, sino que degradan el bosque en pie al alcanzarlo y penetrar en él. Esto causa una alta mortalidad de árboles, incluso cuando son incendios de superficie, asimismo, destruye semillas y reduce los bancos de germoplasma, cruciales en los procesos de regeneración natural (**Berlinck & Batista, 2020b**). Además, el suelo sufre de erosión y pérdida de nutrientes, lo que dificulta aún más el rebrote de la vegetación nativa. En estudios recientes se ha demostrado el impacto negativo del fuego al impedir el rebrote posterior al fuego en el 56 a 82 % del área boscosa de la Amazonía (**Drüke et al., 2023**). La presencia de fuego crea una biestabilidad (bosque-sabana), la cual produce un efecto de bloqueo que depende de la historia y promovería el estado de sabana en más de la mitad de la cuenca del Amazonas, ya que el fuego obstaculiza en gran medida la recuperación del bosque amazónico (**Drüke et al., 2023**).

Por otro lado, recientes modelos indican que un clima regional más cálido y seco, resultante del estado de sabana, aumentaría aun más la actividad del fuego, llevando a que una mayor extensión del bosque amazónico se transforme y permanezca en dicho estado de sabana, impidiendo, así, la recuperación del bosque. Esta combinación de factores está empujando a los bosques amazónicos hacia un punto de inflexión crítico. Un punto de inflexión en ecología se refiere a un umbral que, una vez cruzado, causa cambios drásticos y a menudo irreversibles en el funcionamiento de un ecosistema. En el caso de la Amazonía, esto podría significar la transición de selvas tropicales húmedas a sabanas o matorrales, ecosistemas con menor biodiversidad y servicios ecológicos diferentes, lo cual tendría consecuencias catastróficas para la biodiversidad regional y el clima global, dado el rol de la Amazonía en el almacenamiento de carbono y la regulación de los ciclos de agua.

¿El aumento de la deforestación y los incendios forestales y sus efectos resulta de la ineficacia de las políticas de emergencia?

El impacto de los incendios, exacerbado por prácticas humanas y por el cambio climático, plantea serios desafíos para la sostenibilidad de estos ecosistemas. Frente a esta realidad, se hace imprescindible la implementación de políticas efectivas que reconozcan algunos roles ecológicos pero aborden las causas subyacentes y emergentes de la crisis actual.

Sin duda, las amenazas que la Amazonía enfrenta debido principalmente a la deforestación y los incendios son múltiples y complejas, y su control efectivo requiere un enfoque integral que reconozca que no hay una única estrategia de manejo para todos los ecosistemas. Por ejemplo, a pesar de las políticas para reducir la deforestación en la Amazonía, el mercado de tierras, influenciado por un contexto de caos institucional y una presencia estatal débil, fomenta la deforestación a gran escala (**de Assis Costa et al.,**

2023). Los incendios forestales volvieron a incrementarse desde finales del 2023 e inicios del 2024 (Figura 2), particularmente en Colombia, con un remonte de la deforestación que representa una amenaza significativa para la biodiversidad regional y el clima global (Armenteras & González, 2024; de Oliveira *et al.*, 2023).

Las políticas de emergencia, como las prohibiciones temporales de quemas, aunque populares y mediáticas, no han logrado abordar las causas profundas de los incendios en la Amazonía (Machado *et al.*, 2024). Estas medidas suelen tener un impacto limitado y no sustituyen las estrategias más sostenibles y bien planificadas. Por ejemplo, aunque la prohibición de fuego del 2019 en Brasil tuvo cierto éxito inicial en la reducción de incendios, en años siguientes estas no fue efectiva, lo que subraya la necesidad de intervenciones más estructurales que trasciendan las medidas de emergencia. Se necesita una acción gubernamental decidida para combatir estas ilegalidades, detener el acaparamiento de tierras, reconocer su legítima propiedad e implementar en la práctica medidas de largo plazo (Armenteras *et al.*, 2019).

Control de la deforestación, ¿realmente sabemos lo que tenemos, o lo perderemos irremediablemente?

Para evitar el punto de no retorno en el Amazonas y mantener la resiliencia de sus vastos ecosistemas forestales, el Panel Científico de la Amazonia (<https://www.theamazonwewant.org/>) recomienda varias acciones urgentes (Flores *et al.*, 2023). En primer lugar, es esencial reducir significativamente las emisiones globales de gases de efecto invernadero y detener las actividades locales de deforestación y degradación forestal. Si no implementamos políticas efectivas y coordinadas para mitigar la deforestación, podríamos perder irremediablemente este recurso invaluable, cuyas consecuencias ambientales, sociales y económicas serían devastadoras. Estas medidas son cruciales para prevenir un mayor debilitamiento del flujo de humedad a través del Amazonas, lo cual es vital para mantener la resiliencia del bosque y evitar un colapso ecosistémico a gran escala.

Prevenir la deforestación es más efectivo y menos costoso que intentar restaurar ecosistemas una vez dañados. Los procesos de restauración pueden ser largos y complejos, y no siempre garantizan la recuperación de la biodiversidad original o de las funciones ecosistémicas perdidas. Además, la Amazonía es hogar de una biodiversidad incomparable; perder especies a causa de la deforestación podría llevar a algunas a la extinción permanente, imposibilitando su recuperación incluso con esfuerzos de restauración, dado que estos ecosistemas pueden tardar décadas en recuperar completamente su funcionalidad. Además, las comunidades indígenas y locales dependen de los bosques para su subsistencia, su cultura y su salud, y la deforestación amenaza directamente su modo de vida.

Asimismo, la implementación de proyectos de restauración a gran escala, como la regeneración natural y la reforestación, especialmente a lo largo de un ‘arco de restauración’, es crucial (Flores *et al.*, 2023), ya que ello fortalecerá los mecanismos de retroalimentación entre el bosque y la lluvia en todo el Amazonas, reduciendo así el riesgo de eventos críticos y mejorando la conectividad del bosque, especialmente a través de la vulnerable frontera andino-amazónica.

La combinación de ciencia, política y prácticas comunitarias puede ser crucial para prevenir un punto de no retorno climático en la Amazonía.

El Panel Científico (Flores *et al.*, 2023) también propone que se debe reconocer y empoderar el liderazgo de los pueblos indígenas y las comunidades locales en la gobernanza amazónica. Su profundo conocimiento ecológico y sus conexiones bioculturales son invaluable para mejorar la resiliencia del bosque frente a cambios globales. Es crucial reconocer y apoyar de forma más categórica los derechos territoriales de los pueblos

indígenas, quienes han demostrado ser guardianes efectivos de la Amazonía. Sus territorios albergan aproximadamente 24,5 Gt de carbono sobre el suelo y actúan como barreras significativas contra la deforestación y la degradación forestal (**Moutinho et al.**, 2022).

Además, el monitoreo continuo de la dinámica del bosque amazónico y su respuesta a los factores de estrés ambientales es necesario para proporcionar información oportuna que pueda ayudar a fortalecer la gobernanza local y las estrategias de manejo forestal (**Flores et al.**, 2023). Todo esto sin olvidar la ciencia, ya que es urgente invertir en investigaciones que se centren en los impactos de las perturbaciones sinérgicas y compuestas en la resiliencia del bosque para informar y optimizar los esfuerzos de conservación y desarrollo sostenible.

Por último, debemos adoptar un enfoque equilibrado que respete las prácticas tradicionales, como, por ejemplo, el uso tradicional del fuego, mientras se aplican controles rigurosos y técnicas modernas para mitigar los incendios destructivos. Estas estrategias deben ser integradas y gestionadas de manera que respeten tanto la biodiversidad única de la Amazonía como los derechos y modos de vida de las comunidades indígenas y locales. La cooperación internacional y el financiamiento adecuado son urgentes para apoyar y asegurar un enfoque sostenible y efectivo, sobre todo para mejorar la resiliencia del bosque amazónico, y alcanzar una Amazonía con menos fuego.

Agradecimientos

A mi estimado colega, el profesor Jhon Charles Donato, por sus comentarios y sugerencias.

Dolors Armenteras

Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia; Académica Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; miembro del Panel Científico por la Amazonia (SPA).
darmenterasp@unal.edu.co

Referencias

- Armenteras, D. & González, T. M.** (2024). Repensando la gestión de incendios forestales en Suramérica: un enfoque integrado en la era del cambio climático. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 48 (186), 210-215. <https://doi.org/10.18257/racefyn.2600>
- Armenteras, D., González, T. M., Retana, J.** (2013). Forest fragmentation and edge influence on fire occurrence and intensity under different management types in Amazon forests. *Biological Conservation*, 159, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.10.026>
- Armenteras, D., Negret, P., Melgarejo, L. F., Lakes, T. M., Londoño, M. C., García, J., Krueger, T., Baumann, M., Davalos, L. M.** (2019). Curb land grabbing to save the Amazon. *Nature Ecology and Evolution*, 3 (11), 1497. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1020-1>
- Armenteras, D. & Retana, J.** (2012). Dynamics, patterns and causes of fires in Northwestern Amazonia. *PLoS One*, 7 (4), e35288. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035288>
- Berlinck, C. N. & Batista, E. K. L.** (2020a). Good fire, bad fire: It depends on who burns. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 268, 151610. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151610>
- de Assis Costa, F., Larrea, C., Araújo, R., Benatti, J. H., Giraldo, V., Hecht, S., Murmis, M. R., Peters, S., Schmink, M., Terán, E., Treccani, J.** (2023). *Land market and illegalities: the deep roots of deforestation in the Amazon*. <https://doi.org/10.55161/SLBQ1069>
- de Oliveira, G., Mataveli, G., Stark, S. C., Jones, M. W., Carmenta, R., Brunsell, N. A., Santos, C. A. G., da Silva Junior, C. A., Cunha, H. F. A., da Cunha, A. C., dos Santos, C. A. C., Stewart, H., Boanada Fuchs, V., Hellenkamp, S., Artaxo, P., Alencar, A. A. C., Moutinho, P., Shimabukuro, Y. E.** (2023). Increasing wildfires threaten progress on halting deforestation in Brazilian Amazonia. *Nature Ecology and Evolution*, 7 (12), 1945-1946. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02233-3>
- Drüke, M., Sakschewski, B., von Bloh, W., Billing, M., Lucht, W., Thonicke, K.** (2023). Fire may prevent future Amazon forest recovery after large-scale deforestation. *Communications Earth and Environment*, 4(1), 248. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00911-5>

- Flores, B. M., Esquivel-Muelbert, A., Ehrlich, M., Vilanova, E., Tupinambá, R., Hirota, M., Kalamandeen, M. (2023).** *Nine ways to avoid the amazon tipping point.* <https://doi.org/10.55161/SVVO2555>
- Flores, B. M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R. A., Levis, C., Lapola, D. M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Nobre, C. A., Oliveira, R. S., Borma, L. S., Nian, D., Boers, N., Hecht, S. B., ter Steege, H., Arieira, J., Lucas, I. L., ... Hirota, M. (2024).** Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626(7999), 555-564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>
- Machado, M. S., Berenguer, E., Brando, P. M., Alencar, A., Oliveras Menor, I., Barlow, J., Malhi, Y. (2024).** Emergency policies are not enough to resolve Amazonia's fire crises. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 204. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01344-4>
- Moutinho, P., Leite, I., Baniwa, A., Mirabel, G., Josse, C., Macedo, M., Alencar, A., Salinas, N., Ramos, A. (2022).** *Policy Brief: The role of Amazonian Indigenous Peoples in fighting the climate crisis.* Science Panel for the Amazon. <https://doi.org/10.55161/HWOO4626>

Un helecho diminuto desafía los límites de la expansión genómica en eucariotas

A tiny fern defies the limits of genome expansion in eukaryotes

A medida que la actividad humana impacta negativamente los ecosistemas, acelerando la pérdida de hábitats y, por ende, de especies, somos más y más conscientes de la necesidad acuciante de conocer la diversidad que nos rodea a escala global. Es por ello que en las últimas décadas hemos sido testigos del lanzamiento de grandes iniciativas y consorcios, por ejemplo, el Proyecto del Biogenoma de la Tierra (Earth Biogenome Project, EBP, <https://www.earthbiogenome.org>), que buscan documentar la biodiversidad de eucariotas en el planeta desde una perspectiva genómica. Sin duda, el desarrollo continuo de técnicas de biología molecular y citogenéticas nos está permitiendo ampliar aceleradamente nuestro conocimiento sobre la biodiversidad, en general, y sobre los atributos más íntimos de los genomas, en particular. Ello está haciendo posible la caracterización de las especies desde una perspectiva holística a múltiples niveles, que parten de su tamaño genómico hasta el desciframiento de la secuencia completa de su ADN y su organización cromosómica.

Es indudable el papel fundamental que las plantas (Viridiplantae) tienen en la dinámica de los ecosistemas y su influencia directa en el bienestar de la humanidad, por ejemplo, a través de su impacto en la economía global (Schaal, 2019). Es por ello que, además de conocer su identidad a través de la información crítica que guardan en sus genomas, necesitamos identificar qué atributos de dichos genomas contribuyen e influyen en la evolución y en la resiliencia de las especies en un contexto de cambio global. En este sentido, el contenido de ADN nuclear, es decir, el tamaño del genoma, más allá de proporcionarnos información básica y aplicada sobre los costos aproximados que tendremos que afrontar para secuenciar genomas completos, es un carácter extremadamente diverso en los organismos eucarióticos. El tamaño genómico, especialmente el de las plantas terrestres, puede multiplicarse más de 2.400 veces dentro del rango de variación conocido, y desempeña un papel muy relevante en su evolución (Pellicer *et al.*, 2018), que incluye cómo y dónde pueden vivir y las implicaciones directas e indirectas que tiene en su probabilidad de extinción (Soto Gómez *et al.*, 2023).

Nótese que el último lanzamiento (versión 7.1) de la base de datos de valores-C de plantas (Plant DNA C-values Database, <https://cvalues.science.kew.org>), repositorio que en su última actualización incluye los datos sobre el tamaño del genoma de alrededor de 12.000 especies pertenecientes a los grandes linajes de plantas terrestres (angiospermas, briófitos, gimnospermas y pteridófitos) y de algas, ha acumulado más de 250 citas en menos de cuatro años (Pellicer & Leitch, 2020), lo que es un claro indicador del interés que la comunidad científica tiene en el análisis de este parámetro y sus múltiples implicaciones en la evolución de las plantas en general. A pesar de los esfuerzos que supone compilar y mantener este repositorio, no hay duda alguna sobre la cantidad de trabajo que aún queda por realizar, ya que los datos disponibles tan solo representan un pequeño porcentaje del total de la biodiversidad vegetal que conocemos. Hasta la fecha, el menor genoma vegetal conocido pertenece a una pequeña planta carnívora de la familia de las Lentibulariaceae, *Genlisea aurea*, con un genoma de apenas 64 Mb (Fleischmann *et al.*, 2014). En el extremo opuesto, y hasta hace muy poco, el récord lo ostentaba el genoma gigantesco, de unos 149 Gb, descubierto en *Paris japonica*, una especie perteneciente a la familia de

las *Melanthiaceae* (Pellicer *et al.*, 2010). Sin embargo, el reciente hallazgo de un genoma de más de 160 Gb en la especie *Tmesipteris oblancoolata*, un pequeño helecho horquilla (*Psilotaceae*) de la isla de Grande Terre en Nueva Caledonia y otros archipiélagos del Pacífico Sur, ha pulverizado esta marca (**Figura 1**) (Fernández *et al.*, 2024). Este hallazgo plantea nuevas preguntas sobre dónde está el límite en la expansión de los genomas, una cuestión para nada trivial, sobre todo si tenemos en cuenta las múltiples consecuencias biológicas y los ingentes costos energéticos y metabólicos asociados al mantenimiento de estos impresionantes (giga)genomas.

En el estudio de Fernández y colaboradores, los autores utilizan la técnica de la citometría de flujo, la cual permite analizar miles de núcleos del tejido vegetal de la muestra de estudio, que, una vez aislados junto a los de la muestra de control en una suspensión, son teñidos con un fluorocromo que se adhiere al ADN nuclear (ioduro de propidio en el caso que nos ocupa) para ser finalmente irradiados con un láser. El instrumento consta de dos detectores de fluorescencia que captan la luz emitida por estos núcleos y representan la intensidad de la luz captada en un histograma de fluorescencia relativa (**Figura 2**) (Doležel *et al.*, 2017). Cuanto mayor sea el tamaño de los núcleos, mayor cantidad de fluorocromo se habrá adherido y mayor será la intensidad de la fluorescencia. Esta es una técnica que, además de ser efectiva y muy asequible para estimar el contenido de ADN nuclear, solamente requiere de una pequeña muestra de tejido fresco y es altamente reproducible. Una posible alternativa, el cálculo del tamaño del genoma mediante el análisis de k-meros, necesita de la secuenciación de alto rendimiento y resulta mucho más costosa, aunque es un método válido utilizado en genomas pequeños. Para un genoma de las dimensiones del de *T. oblancoolata*, la profundidad de secuenciación que permite obtener la cobertura mínima requerida para una estimación robusta de su tamaño genómico mediante el análisis de k-meros, conllevaría una inversión económica varios órdenes de magnitud mayor al costo de la citometría de flujo. Además, la citometría de flujo permite el análisis simultáneo de varias especies en una única muestra, una aproximación que hemos aplicado con el



Figura 1. Población del helecho horquilla *Tmesipteris oblancoolata* del S de Grande Terre, Nueva Caledonia. Imagen: Jaime Pellicer

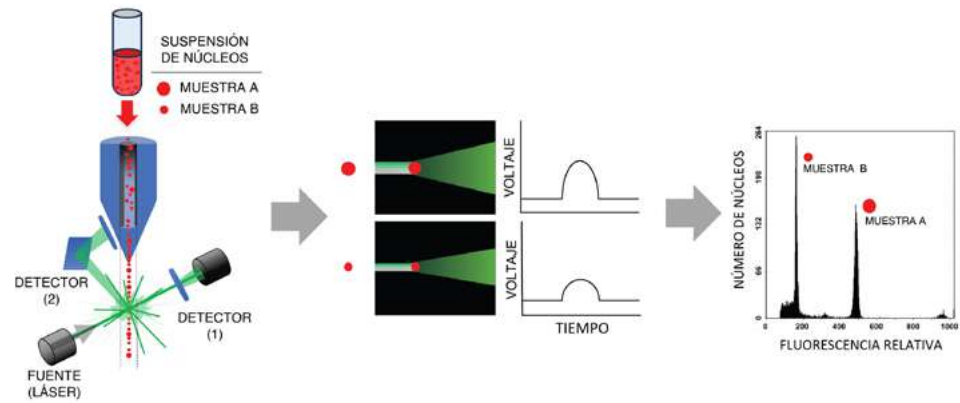


Figura 2. Esquema representativo del proceso de análisis del contenido de ADN de núcleos en suspensión con citometría de flujo

fin de eliminar cualquier tipo de duda sobre la magnitud del tamaño del genoma de *T. oblancoolata* y confirmar que es aproximadamente un 7 % mayor que el de *P. japonica* (poseedora del récord durante más de una década, 2010-2024), reduciendo al mínimo cualquier error o limitación que pudiera atribuirse a la técnica empleada.

Si bien nuestro estudio se centra únicamente en el hallazgo y en lo que representa la magnitud del genoma descubierto en *T. oblancoolata*, también se explora en él la forma en que algunos linajes de plantas han evolucionado hasta alcanzar genomas de un calibre notable, algo que es realmente extraordinario si tenemos en cuenta que la mayoría de los helechos presentan genomas pequeños o medianos (media de 12,3 Gb; valor modal de 5,8 Gb) (Fujiwara *et al.*, 2023). En el caso que nos ocupa y, con base en los estudios anteriores del género *Tmesipteris* (Fernández *et al.*, 2023), el efecto combinado de la poliploidía (*T. oblancoolata* es un octoploide con 416 cromosomas) y de la acumulación de secuencias de ADN altamente repetidas podrían haber desempeñado un papel crítico en la expansión extrema de su genoma.

Estas secuencias repetidas se encuentran presentes de forma generalizada en múltiples copias en los genomas eucariotas y los elementos transponibles son especialmente conocidos por su capacidad de replicación y movilización en los genomas (Wicker *et al.*, 2007). Sin embargo, la mayoría de las especies que conocemos poseen genomas relativamente pequeños, ya que presentan sistemas de control de la expansión sin límite de dichos elementos repetidos, los cuales son eliminados a través de mecanismos como la recombinación, entre otros. Gracias al avance en las técnicas de secuenciación y al desarrollo de diversas herramientas bioinformáticas, los análisis de genomas gigantes en plantas comienzan a ser una realidad y apuntan a que dichos genomas exhiben una composición muy variada de elementos repetidos, presentes en frecuencias relativamente bajas y con una elevada tasa de heterogeneidad entre copias (p.ej., *Fritillaria*) (Kelly *et al.*, 2015). Esto, muy probablemente, no representa un escenario en el que se contemple una amplificación explosiva y generalizada del ADN repetido, si no que, muy posiblemente, sea el resultado de la incapacidad de estos organismos de eliminar de forma eficiente ese ADN repetitivo, que acaba por acumularse en zonas del genoma altamente condensadas donde se fosilizan, mutan y se degradan durante largos períodos de tiempo.

En resumen, la extraordinaria diversidad de tamaños genómicos encontrados en los organismos eucariotas, su significado biológico, o la aparente desconexión entre la complejidad de los organismos y el tamaño de sus genomas, ha planteado multitud de cuestiones para las que todavía no tenemos respuesta. Sin duda, tal como lo señalan los autores de este estudio, el descubrimiento de un genoma de tamaño récord en este diminuto helecho representa un hito en este campo de investigación y, en general, una aportación muy significativa a la biología, ya que refuerza la necesidad de abordar aspectos de la genómica de

la biodiversidad desde una perspectiva holística. Por ello es fundamental que reforcemos la investigación y el análisis profundo de estas rarezas de la naturaleza, más aún si pretendemos profundizar y materializar el conocimiento sobre las consecuencias ecológicas y evolutivas de la diversidad de tamaños genómicos y de la arquitectura del genoma a lo largo del árbol de la vida. Entender dichas consecuencias es vital, especialmente si tenemos en cuenta el impacto del cambio climático y, como ya apuntan diversos estudios, la influencia que el tamaño del genoma tiene en la resiliencia de las especies (Bureš *et al.*, 2024).

● Lisa Pokorny^{1,3}, ● Jaume Pellicer^{2,3}

¹ Real Jardín Botánico (RJB-CSIC), Madrid, España

² Institut Botànic de Barcelona (IBB), CSIC-CMNCB, Barcelona, España

³ Royal Botanic Gardens, Kew, Richmond, Reino Unido

Referencias

- Bureš, P., Elliott, T.L., Veselý, P., Šmarda, P., Forest, F., Leitch, I.J., Lughadha, E.N., Soto Gómez, M., Pironon, S., Brown, M.J.M., Šmerda, J., Zedek, F. (2024). The global distribution of angiosperm genome size is shaped by climate. *New Phytologist*, 242(2), 744-759. <https://doi.org/10.1111/nph.19544>
- Doležel, J., Greilhuber, J., Suda, J.J. (2007). Estimation of nuclear DNA content in plants using flow cytometry. *Nature Protocols*, 2, 2233-2244. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.310>
- Fernández, P., Leitch, I.J., Leitch, A.R., Hidalgo, O., Christenhusz, M.J.M., Pokorny, L., Pellicer, J. (2023). Giant Fern Genomes Show Complex Evolution Patterns: A Comparative Analysis in Two Species of *Tmesipteris* (Psilotaceae). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 2708. <https://doi.org/10.3390/ijms24032708>
- Fernández, P., Amice, R., Bruy, D., Christenhusz, M.J.M., Leitch, I.J., Leitch, A.R., Pokorny, L., Hidalgo, O., Pellicer, J. (2024). A 160 Gbp fork fern genome shatters size record for eukaryotes. *iScience*, 109889. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109889>
- Fleischmann, A., Michael, T.P., Rivadavia, F., Sousa, A., Wang, W., Temsch, E.V., Greilhuber, J., Müller, K.F., Heubl, G. (2014). Evolution of genome size and chromosome number in the carnivorous plant genus *Genlisea* (Lentibulariaceae), with a new estimate of the minimum genome size in angiosperms. *Annals of Botany*, 114(8), 1651-1663. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu189>
- Fujiwara, T., Liu, H., Meza-Torres, E.I., Morero, R.E., Vega, A.J., Liang, Z., Ebihara, A., Leitch, I.J., Schneider, H. (2023). Evolution of genome space occupation in ferns: linking genome diversity and species richness. *Annals of Botany*, 131(1), 59-70. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab094>
- Kelly, L. J., Renny-Byfield, S., Pellicer, J., Macas, J., Novák, P., Neumann, P., Lysak, M.A., Day, P.D., Berger, M., Fay, M.F., Nichols, R.A., Leitch, A.R., Leitch, I.J. (2015). Analysis of the giant genomes of *Fritillaria* (Liliaceae) indicates that a lack of DNA removal characterizes extreme expansions in genome size. *New Phytologist*, 208, 596-607. <https://doi.org/10.1111/nph.13471>
- Pellicer, J., Fay, M.F., Leitch, I.J. (2010). The largest eukaryotic genome of them all? *Botanical Journal of the Linnean Society*, 164(1), 10-15. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2010.01072.x>
- Pellicer, J., Hidalgo, O., Dodsworth, S., Leitch, I.J. (2018). Genome size diversity and its impact on the evolution of land plants. *Genes*, 9(2): 88. <https://doi.org/10.3390/genes9020088>
- Pellicer, J. & Leitch, I.J. (2020). The Plant DNA C-values database (release 7.1): an updated online repository of plant genome size data for comparative studies. *New Phytologist*, 226(2), 301-305. <https://doi.org/10.1111/nph.16261>
- Schaal, B. (2019). Plants and people: Our shared history and future. *Plants, People, Planet*, 1(1), 14-19. <https://doi.org/10.1002/ppp3.12>
- Soto-Gómez, M., Brown, M.J.M., Pironon, S., Veselý, P., Bureš, P., Elliott, T.L., Zedek, F., Pellicer, J., Forest, F., Lughadha, E.N., Leitch, I.J. (2023). Genome size is positively correlated with extinction risk in herbaceous angiosperms. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2023.09.10.557053>
- Wicker, T., Sabot, F., Hua-Van, A., Bennetzen, J.L., Capy, P., Chalhoub, B., Flavell, A., Leroy, P., Morgante, M., Panaud, O., Paux, E., SanMiguel, P., Schulman, A.H. (2007). A unified classification system for eukaryotic transposable elements. *Nature Reviews Genetics*, 8(12), 973-982.

Comentario bibliográfico



A monograph of the genus *Geranium* L. (Geraniaceae).

Aedo, Carlos. Real Jardín Botánico, CSIC. Madrid. 2023. ISBN 978-84-00-11123-6 e ISBN 978-84-00-11124-3. 900 págs., 780 figs. 30 x 23,5 cm. Encuadernación en rústica.

Carlos Aedo Pérez acaba de publicar una monografía monumental sobre el género más importante de la familia Geraniaceae: el género *Geranium*, que consta, según el autor, de 307 especies. Los otros cuatro géneros considerados en la familia son *Pelargonium* (208 especies), *Erodium* (80), *Monsonia* (40) e *Hypseocharis* (2), según se indica en la introducción.

El libro tiene un tamaño un poco mayor que el del folio DIN A4. Sus tapas blandas frontal y posterior están cubiertas por 11 fotografías en cuadrículas de *Geranium*, sobre todo de sus flores, pero también de hojas y frutos, y dos dibujos con el fondo en verde; en el centro, abajo, aparecen el título y el autor. El texto se estructura en dos columnas en la introducción, una en las claves y tres en el capítulo de taxonomía. Después de la página de créditos aparece el índice de contenidos y después una frase extraída de la obra *Etimologías* de nuestro gran autor San Isidoro de Sevilla: “Se dice botánico de hierbas al sitio donde las hierbas son anotadas”. Le sigue la amplia introducción, con la discusión de los géneros de la familia, de su distribución, y el comentario de los principales trabajos sobre el género publicados a comienzos del siglo XX por Knuth en alemán. Después de un bosquejo histórico y un apartado sobre materiales y métodos, se da paso a un gran capítulo de morfología del género, que incluye un mapa del mundo con todos los puntos geográficos en donde se encuentran ejemplares de dicho género. Para ello se estudiaron casi 26.000 pliegos de 245 herbarios. En este apartado se analizan los diferentes caracteres utilizados, así como las partes de la planta, con profusión de fotografías macro y micromorfológicas y algún dibujo. A continuación, se incluye un *conspectus* de clasificación que tiene en cuenta cuatro subgéneros con cuatro, cinco, dos y seis secciones, respectivamente; se consideran, además, 31 grupos dentro de la sección más numerosa en especies: subgen. *Geranium* sect. *Geranium*.

En la página 41 comienza la taxonomía del género con la clave, que se ha dividido según áreas geográficas: América del Norte y Central, Suramérica, área del Pacífico, y Eurasia y África en conjunto. Dentro del apartado de las especies, numeradas de 1 a 307, se encuentra el nombre aceptado de cada una, la indicación locotípica y el material tipo, la lista de sinónimos con los mismos apartados, la descripción, el tipo de polen, el número de cromosomas, la fenología, la distribución y el hábitat; por **último**, los especímenes examinados más representativos se presentan por países en orden alfabético; a continuación en otro apartado se discuten diversas facetas como las diferencias morfológicas para justificar los tratamientos, las variaciones geográficas, los criterios de autores que han trabajado en el género, etc. Cada especie tiene un dibujo de gran calidad, la mayoría realizados por Juan Castillo y Román García Mora, y otros por M. Cartaña, M. Chirino, E. Ortúñez y J. Pizarro. Un mapa de su distribución geográfica acompaña también a cada especie, así como un grupo de una a nueve fotografías en muchas de ella. Los dibujos siempre ocupan dos columnas y el mapa de distribución una, salvo en 16 que ocupan dos, debido a la necesidad de un mapa mayor por la amplia distribución de la especie o para indicar detalles en caso de subespecies; las fotografías ocupan un espacio variable dependiendo del número, pero, aunque haya más de una, cuentan como una figura.

Las cerca de 100 páginas finales del libro contienen, en primer lugar, una lista de nombres inválidos de *Geranium*; a continuación los agradecimientos a personas e instituciones; después la extensa bibliografía con 26 referencias propias del autor; el Apéndice 1 con los números de cromosomas conocidos en *Geranium*; el Apéndice 2 con los nombres de *Geranium* que corresponden a otros géneros; un índice de las colecciones examinadas por orden alfabético de autores y, finalmente, el índice de nombres científicos y otros dos de nuevos nombres o combinaciones.

El trabajo tiene un volumen realmente notable. Es probablemente la mayor monografía de la historia de la botánica en España. Está escrita en inglés y ha sido publicada por la institución que nos acoge, cosa que ha entrañado cierta dificultad y que al autor de estas líneas le parece un logro conseguido por la mucha paciencia de Carlos Aedo.

No se puede dejar de comentar ciertas facetas del autor de la monografía, que, por cierto, es poco dado a figurar en lugar alguno, lo que sin duda le honra de manera especial. Apareció por el Real Jardín Botánico de Madrid en el año 1992; allí trabajó bajo contrato activamente en su género y en el proyecto *Flora iberica* hasta 1997, cuando consiguió por oposición la plaza de investigador del CSIC en el nivel de científico titular. En el 2009, después de la muerte de Santiago Castroviejo, el investigador principal del proyecto *Flora iberica*, afortunadamente Carlos Aedo tomó las riendas de dicho proyecto hasta llevarlo, gracias a su tesón, a su culminación exitosa en septiembre de 2021, con la publicación de la segunda parte del volumen XIX de Gramíneas. Dos años después nos sorprende con la magnífica y monumental monografía de *Geranium*. En mi modesta opinión ya puede estar satisfecho el autor por semejantes logros. Aunque dentro de la tendencia actual de la Botánica española, estos dos grandes proyectos son poco valorados, es de esperar que revierta tal tendencia y algún día se compruebe, en su justa medida, la gran importancia que tienen en el contexto de los estudios de biodiversidad vegetal. Por lo menos, estas grandes obras quedan impresas en papel y perdurarán mucho más que cientos de artículos publicados en revistas mediatizadas y de pago.

Sirva la publicación de esta monografía como ejemplo de la culminación de un trabajo continuo y laborioso, realizado con ilusión y vocación, en este mundo absorbente de todo lo relacionado con el conocimiento del mundo vegetal. Sin duda es otra gran aportación a la ciencia de las plantas y al conocimiento de la biodiversidad.

Ramón Morales

Real Jardín Botánico de Madrid, CSIC
rmmmvtp@gmail.com

Comentario bibliográfico



La tesis que me parió. Manual para abordar, elaborar y terminar un trabajo académico (2024). Yolanda Blasco Gil, Armando Pavón Romero, Fernanda Peset, Toni García Peralta. La tesis que me parió. Manual para abordar, elaborar y terminar un trabajo académico. Tirant – Humanidades

La tesis que me parió. Manual para abordar, elaborar y terminar un trabajo académico

Este libro, publicado en la colección Humanidades de la prestigiosa editorial Tirant Lo Blanch (primera posición entre las editoriales españolas en el ranking Scholarly Publisher Indicators), llega en un momento en que la investigación multidisciplinaria y traslacional está ganando cada vez más relevancia, por lo que resulta valioso para cualquier investigador, independientemente de su área de especialización, familiarizarse con las perspectivas de otras disciplinas. Además, es especialmente esclarecedor para quienes están dando sus primeros pasos en la investigación en áreas relacionadas con las humanidades, las ciencias sociales o las disciplinas artísticas, en las que la cosmovisión del investigador tiene un gran peso y la metodología desempeña un papel crucial.

La tesis que me parió está dirigido a una audiencia que incluye desde estudiantes de bachillerato hasta doctorandos, que tienen que elaborar trabajos en un entorno académico en permanente transformación. Como docentes universitarios hemos observado que el proceso de adquisición de conocimientos evoluciona año tras año. Por ejemplo, hemos pasado de la lectura tradicional a la inclusión de formatos como el video y la realidad aumentada para el aprendizaje. Asimismo, la duración de los temas en muchos casos se ha reducido y es común hablar de *microaprendizaje*. El texto representa un ejercicio de humildad por parte de sus autores, quienes reconocen la necesidad de adaptarse a las nuevas formas de estudio que adoptarán las generaciones futuras. Es un experimento creativo e innovador que involucra no sólo a los académicos Yolanda Blasco Gil (Universitat de València), Armando Pavón Romero (Universidad Nacional Autónoma de México) y Fernanda Peset (Universitat Politècnica de València), sino también a profesionales externos a la Academia expertos en comunicar ideas y emociones. Las ilustraciones de Carla Fuentes aportan fuerza y personalidad estéticas, mientras que Toni García Peralta se encargó de hacer el contenido académico más digerible. El “antiprólogo”, a cargo del profesor de filosofía Nicolás Sánchez Durá (Universitat de València), ofrece una perspectiva muy aguda del alcance y la pertinencia de la obra.

El manual se estructura en cinco bloques que guían al lector a través del recorrido que debe transitarse en todo trabajo académico: desde aquello que se requiere antes de iniciar la investigación (i); la planificación del recorrido (ii); lo que debe tenerse en cuenta cuando la investigación ya está en marcha (iii), y en el momento en que está terminada y se va a escribir la memoria (iv). El bloque (v) está dedicado a la escritura de las conclusiones y proporciona algunas claves para lograr la máxima difusión del trabajo. Además, el texto viene con una “prima” adicional en forma de precisiones e instrucciones para, por ejemplo, citar fuentes y bibliografía; de hecho, en el manual se destaca la importancia de reconocer y citar adecuadamente las publicaciones y obras consultadas, con el fin de evitar la terrible lacra del plagio. En este sentido, el texto es tajante: “Una apropiación indebida es inaceptable en el mundo académico. Podría ser el fin de tu carrera”.

Como dicen sus autores, “*La tesis que me parió* no tiene ochocientos cincuenta y nueve páginas. No es un tratado sesudo acerca de la transustanciación del conocimiento. No es cariñoso con sus lectores ni les anticipa éxitos sino resultados. Estimula su talento con herramientas formidables y un plan de actuación muy preciso. *La tesis que me parió* es un manual”.

El texto invita al investigador a profundizar en su análisis crítico y a perder el miedo a valorar las fuentes y la bibliografía para ir forjando su propia opinión, y utiliza la metáfora del embarazo para describir la experiencia de escribir una tesis. “Vamos a parir”, se lee en uno de sus capítulos, haciendo alusión al momento crucial de dar a luz el trabajo final. Llevar hasta la culminación una tesis es tomar una decisión importante, pues, como afirma el manual, “cuando concluye, somos otras personas”.

Al disponernos a la lectura de esta obra, pensamos que sería otro manual típico sobre metodología de la investigación, similar a los que habíamos consultado en otras ocasiones, aunque la portada y el título de la obra provocaban cierta intriga. De hecho, basta dar una rápida mirada al texto para darse cuenta de que es un escrito diferente, que “transmite, directamente en vena, toda la experiencia de sus autores, no sólo como investigadores sino como docentes que han empleado la mayor parte de sus carreras enseñando a sus alumnos el método más eficaz para preparar tesis de licenciatura o trabajos de fin de grado, de máster y tesis doctorales. Pero lo más interesante de *La tesis que me parió* es su poder para despertar en sus lectores una inesperada pasión por la creación de conocimiento, por la creatividad, por la resolución de enigmas, por la curiosidad intelectual”. A manera de pleno reconocimiento de la mencionada intención de estimular la pasión por la investigación, hemos decidido escribir esta breve reseña y compartir nuestras impresiones sobre la obra con los lectores presentes y futuros.

Pedro Fernández de Córdoba

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Académie Nationale des Sciences, Arts et Lettres du Bénin
Academia de Ciencias de Cuba
Universitat Politècnica de València – España

Víctor M. Castaño

Academia Mexicana de Ciencias
Academia de Ingeniería de México
Academia Nacional de Medicina de México
Canadian Academy of Engineering-Académie Canadienne du Génie
The Royal Academy of Chemistry
Universidad Nacional Autónoma de México – México

A nuestros lectores y autores

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, psicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research*), *Current Mathematical Publications*, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik*, *Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

Proceso de evaluación por pares

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará como un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Ética de la publicación

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN), acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Ver documento pdf (anexo)

Política de acceso abierto

La página web de la Revista (www.raccefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

Directrices para autores

Tipología de los artículos publicados en la Revista

Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

Artículos cortos: documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

Artículos de posesión o artículos de revisión de tema: documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

Cartas al editor: posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

Comentarios bibliográficos: son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

Corrección de los autores

Fe de erratas

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).
3. La participación de los autores en el trabajo deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.
5. La terminología debe regirse por el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. La terminología física, química o bioquímica, deberá seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deberán usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos deberán ser escritos en la forma recomendada por el *Internacional Code of Botanical Nomenclature* y por el *International Committee on Systematics of Prokaryotes* o ICSP.

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deberán ser enviados a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito incluirá además de la página correspondiente al título, el resumen, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de las figuras, todos los cuales deberán estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No debe olvidarse el usar la numeración en todo el manuscrito. Extensión máxima de 30 páginas, entre 5.000 a 8.000 palabras.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una hoja de presentación, página en Word con los nombres y apellidos (si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos. Agregar aquí un párrafo en el que los autores declaren su aporte personal al manuscrito bajo consideración.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés (máximo 30 palabras, 165 caracteres)
3. Título corto (máximo 10 palabras, 50 caracteres)
4. Resumen en español e inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis, separadas por punto y coma.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico, dirección electrónica y código ORCID. *Open Researcher and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Researcher and Contributor ID*.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo en conjunto con las leyendas de las figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales y con una resolución mayor a 300 dpi (*dots per inch*).
9. El número máximo de tablas y figuras es de 7. Para enviar información adicional se puede emplear la sección de *Información suplementaria* debidamente referenciada en el texto: tabla 1S, 2S, etc.; figura 1S, 2S, etc.

Estructura del manuscrito

Introducción: se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio indicando, además, la delimitación de la pregunta problema.

Materiales y métodos: se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y metodologías empleadas en el estudio. La descripción de la metodología debe tener referencias de los métodos usados.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y la manera de analizar los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y las figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

Discusión: debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada, en cuyo caso la sección se denominará *Resultados y Discusión*.

Conclusiones: deberán responder al objetivo de la investigación reportada e incluir el planteamiento de objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Referencias: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre entre paréntesis el apellido del primer autor y el año de publicación. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si no forma parte de la estructura formal del texto, por ejemplo: ... como indica Barbudo (2003). Si son solo dos autores se pondrán los dos apellidos, si son más de dos sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo “*et al.*”

La Revista ACCEFYN utiliza las normas del Manual APA, estas emplean un sistema de citación de autor-fecha.

Lista de referencias. Se organizan alfabéticamente y se citan de la siguiente manera:

Artículo de revista

Apellido, A. A., Apellido, B. B., Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen:** pp-pp.

Ejemplo

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, **7:** 33-40.

Libro

Apellido, A. A. (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Ejemplo

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Capítulo de libro

Apellido, A. A., Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplo

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

Revista en línea

Apellido, A. A. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen** (número): pp-pp. Disponible en: <http://www...>

Ejemplo

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Disponible en: <http://www.jstor.org/pss/2388013>.

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab*. doi: 10.1177/0271678X16662476

Citas páginas web

Anotar la fecha de la consulta

Ejemplo

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en <http://www.algaebase.org>., accedida entre enero y junio de 2015.

Tablas y figuras: las tablas y cuadros se denominarán tablas y llevarán numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilizar las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan todos como Figuras, las cuales se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se describen en hoja separada. Si se trata de micro-fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías pero se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

Agradecimientos: podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado en la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoyó económicamente.

Consideraciones

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Corrección de estilo y publicación del manuscrito

Una vez aceptados los artículos, éstos se enviarán a corrección orto-tipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará el registro de cada una de las sugerencias llevadas a cabo y los comentarios o dudas para que el autor o los autores aprueben y contesten apropiadamente.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha aproximada y el número del volumen en el que el trabajo será publicado.

Rectificaciones y correcciones de errores

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores orto-tipográficos, de manejo visual de la información o de imprecisiones involuntarias, el o los autores podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan efectuarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificación de artículos

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

Conflicto de intereses

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, tal conflicto debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, entre otros.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, entre otros).

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Aviso de derechos de autor

Los autores certifican que son los creadores originales del trabajo y declaran que:

- a) Los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y,

en los casos que así lo requieran, se cuenta con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales.

- b) Todos los materiales que se presentan están totalmente libres de derecho de autor y, por lo tanto, el autor de la correspondencia se hace responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.
- c) El trabajo es inédito y no será enviado a otras revistas mientras se espera la decisión de los editores de tal revista. El primer autor declara que no existe un posible conflicto de intereses en este manuscrito.
- d) En caso de ser publicado, los autores del artículo transfieren todos los derechos de autor a la Revista ACCEFYN, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados en la misma.
- e) A través de este documento, y si el trabajo es aceptado para su publicación, la Revista ACCEFYN asume los derechos para editar y publicar los artículos en índices nacionales, e internacionales o bases de datos con fines académicos y científicos no comerciales en medios impresos, electrónicos, Internet en texto completo o cualquier otro medio conocido o por conocer con respeto de los derechos de autoría.

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También se pueden publicar el título del trabajo, el resumen, las tablas y las figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, dando también el crédito a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y de los coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico incluidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros ni serán usados con otros fines.

Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

1. Carta de sometimiento del artículo, donde informa que todos los autores han leído, aprueban y declaran que:

- Están de acuerdo con el manuscrito remitido, en su contenido, organización y presentación.
- El trabajo es original, el cual no ha sido publicado previamente y, de igual forma, no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del Comité Editorial.
- En caso de ser aceptado el manuscrito, se autoriza su publicación bajo las normas establecidas por la revista.

- El documento no cuenta con texto o figuras que tengan reserva de derechos y si los tuviere se cuenta con la autorización escrita para su reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carezcan de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se incluye un párrafo donde los autores declaran cuál fue el aporte de cada uno de ellos al documento.
- Esta carta firmada debe ser adjuntada en el paso 4 del presente proceso de envío en formato PDF.

2. Presentación

- Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo, apellido y segundo apellido separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grados académicos), filiaciones y correos electrónicos.
- Título completo del manuscrito en español e inglés y título corto.
- Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras. Figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales.

3. Estructura del artículo. Se incluyen

- El resumen en español e inglés (Abstract).
- Las palabras clave (máximo 6) en español e inglés (Keywords).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y/o instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.
- Referencias.
- Declaración de conflicto de interés.

4 Información adicional: figuras

- Se incluyen como archivo independiente, cada figura en página aparte.
- Se incluyen las leyendas correspondientes al final del original. Estas figuras deberán ser cargadas en el paso 4 del presente proceso de envío en formato JPG o TIF.

5. Información adicional: tablas

- Se incluyen al final del original, elaborados en el modelo más sencillo de tablas del programa Word.
- Se ordenan secuencialmente.
- Se incluye el título correspondiente.

6. Referencias

- Se han seguido las normas de la revista de ACCEFYN en las instrucciones a los autores.

7. Abreviaturas:

- Se introducen entre paréntesis la primera vez que se usan.

8. Nomenclatura:

- Los nombres de género y especie están en letra cursiva.
- Los nombres de microorganismos, plantas y animales se escriben completos la primera vez que se citan, en el título y en el resumen.

9. Ética

- Todos los autores conocen y aprueban la presentación del manuscrito, su contenido, la autoría y el orden de la autoría.
- El manuscrito ha sido postulado solo a la Revista ACCEFYN y no se encuentra postulado ni ha sido publicado en otra revista.
- Si el artículo incluye la investigación en humanos o con animales se han seguido las directrices de la Declaración de Helsinki y el uso de primates no humanos en la investigación.
- Se incluye los agradecimientos a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.

10. Revisores

Se suministran indicaciones sobre tres o cuatro posibles revisores con sus nombres completos, formación académica y direcciones de correos electrónicos.

To our readers and authors

Focus and Scope

The Journal of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences (ACCEFYN) is a multidisciplinary quarterly journal that publishes high quality original research articles.

The journal publishes scientific articles in the disciplines of Biomedical Sciences, Behavioral Sciences (philosophy, psychology, anthropology, and sociology), Natural Sciences (Biology, Botany, Microbiology, Zoology, Ecology), Physical Sciences, Chemical Sciences, Earth Sciences (Geology, Environmental Sciences) and Mathematics. It is included in several national and international directories and indexing services like Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, On-line Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal's website (www.racefyn.co) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website (www.racefyn.co) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

Author Guidelines

Research articles. A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

Brief articles. Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

Inaugural articles or Review articles. Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

Letters to the editor. Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

Book reviews. Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

Authors correction

Errata

Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.acefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Arial font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript. Maximum extension 30 pages, 5,000 to 8,000 words.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name, first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references, and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or TIF format.

Manuscript Structure

Introduction: there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

Materials and methods: a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

Statistical analysis: indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

Results: these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

Discussion: emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies. The results and the discussion may also be presented in a combined form.

Conclusions: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

References: these citations must be verifiable. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way: last name of the first author and year of publication Pérez (1996). If there are only two authors use both last names Perez and Ribas (1996). If there are more than two authors use only the first last name followed by *et al.*

Reference list: alphabetically and following the examples

Journal article

Last name, A. A., Last name, B. B., Last name, C. C. (Year). Title. Journal name, **volume:** pp-pp.

Example

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, **7:** 33-40.

Book

Last name, A. A. (year). Title, City, Country: Publisher

Example

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). *Fisiología Vegetal*. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Book chapter

Last name, A. A., Last name, B. B. (Year). Chapter title. In A. A. Last name. (Ed.), Book title (pp. xx-xx). City, Country: Publisher.

Example

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. *La enseñanza: Su teoría y su práctica* (148-165). Madrid, España: Akal.

Journal on line

Last name, A. A. (Year). Article title. Journal, **volume** (issue): pp-pp. Available in <http://www...or DOI>

Examples

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Available in: <http://www.jstor.org/pss/2388013>

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

References web pages

Date of the access

Example

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available in <http://www.algaebase.org>., accessed in June 2015.

Tables and graphics: The tables and frames are called tables and carry an Arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column

headings. If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures, or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

Acknowledgments: These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

Considerations

They will be published in the following issue to the announcement of the correction. They are responsibility of the authors. Errata are responsibility of the Journal.

Fabrication of evidence, data omission, duplicity of data or plagiarism will be penalized. The authors and their institutions, research center or university and sponsors will be notified.

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments, and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc.).

Copyright Notice

Declaration of originality and transfer author's rights

The authors declare:

The published data and reference materials have been duly identified with their respective credits and have been included in the bibliographic notes and citations that have been so identified and that should it be required, I have all releases and permissions from any copyrighted material.

All material presented is free from any copyright and that I accept full legal responsibility for any legal claims relating to copyrighted intellectual property, fully exonerating from responsibility the **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

This work is unpublished and will not be sent to any other journal while waiting for the editorial decision of this journal. I declare that there is no conflict of interest in this manuscript.

In case of publication of this article, all author's rights are transferred to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, and so cannot be reproduced in any form without the express permission of it.

By means of this document, if the article is accepted for publication by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, the Revista assumes the right to edit and publish the articles in national and international indices or data bases for academic and scientific use in paper, electronic, CD-ROM, internet form either of the complete text or any other known form known or to be known and non-commercial, respecting the rights of the authors.

Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights of the corresponding article to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, except in the following cases:

The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations, and distribution to some colleagues of reprints of their own published work, if the corresponding credit is given to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables, and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista.

If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce, or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

If the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** were approached for permission by a third party for using, printing, or publishing specifically articles already published, the Revista must obtain the express permission of the author and co-authors of the work or of the employer except for use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work. The **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

No other right, other than the author's right, can be claimed by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

Privacy Statement

The names and e-mail addresses appearing in the journal will be used solely for the purposes explicitly therein expressed and by no means will they be supplied to third parties.

Submission Preparation Checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

1. Letter of submission, where it is stated that all authors have read and approved that:

- The submitted manuscript conforms in content, organization and presentation with established norms.
- The original article has not been previously published in any form nor has it been submitted to another journal nor will it be until an answer is received from the Editorial Committee.
- In the case the manuscript is accepted, it is then authorized to be published under the journal's norms.
- The document may not be published without authorization of all copyrighted texts and figures.
- The document is fully cited in a list of references.

2. Appearance

- The first page written in Word with names and surnames (complete name, first and second surnames separated by a hyphen) of all authors (without job titles or academic titles), affiliations and e-mail address.
- Complete title of the manuscript in Spanish and English. Short title.
- Name of person responsible for correspondence with their complete address, telephone number and electronic address.
- E-mail of all coauthors.
- Text, references and tables in the same file together with legends of the figures. Figures in jpg or TIF format.

3. Structure of the article

The following sections are to be included:

- An abstract should be included in both Spanish and English.
- Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
- Introduction.
- Materials and methods.

- Results and Discussion for short communications.
- Discussion.
- Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
- Declaration of conflict of interest.

4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or TIF format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o TIF format

5. Additional information: Tables

- Tables are included on a separate page and are presented in a simple manner as a Word table
- Tables are ordered sequentially

6. References

Citations must follow the journal ACCEFYN's norms found in the authors' instructions

7. Abbreviations

The first use is introduced in parentheses

8. Nomenclature

- The generic and specific names are written in italics
- Names of micro-organisms, plants and animals are written out completely the first time that they are cited in the title and in the abstract.

9. Ethics and malpractice considerations

- All authors must know and approve of the form, content, authors, and the order of the authors
- An article that has been submitted to the journal ACCEFYN has not be submitted or published in any other journal.
- If the article includes research on human or animals have all authors read and followed the guiding principles of the Declaration of Helsinki and the use of non-human primates in the research?

10. Reviewers

List 3 or 4 possible reviewers with their complete names, academic background and e-mails.



